中国科学: 地球科学 2024 年 第 54 卷 第 12 期: 3832 ~ 3859
SCIENTIA SINICA Terrae earthcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS

评 述

大气水汽稳定同位素: 特征、机制与前景

尚白军[1,2], 高晶[1*], 陈葛般若[1,2], 武予清[1,2]

1. 中国科学院青藏高原研究所, 青藏高原地球系统与资源环境重点实验室, 北京 100101;
2. 中国科学院大学, 北京 100101
* 通讯作者, E-mail: gaojing@itpcas.ac.cn

收稿日期: 2023-10-28; 收修改稿日期: 2024-06-11; 接受日期: 2024-08-09; 网络版发表日期: 2024-11-13
第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0208)和青藏高原地球系统与资源环境重点实验室青年创新重大项目(QNCX2022ZD-01)资助

摘要 大气水汽氢氧稳定同位素是探究水汽输送、混合和相变过程的重要示踪剂. 近年来, 随着分析技术的快速发展, 有关大气水汽氢氧稳定同位素的研究在全球广泛开展. 本研究介绍了大气水汽氢氧稳定同位素的基本理论, 概括了传统方法、激光吸收光谱、卫星遥感反演技术和同位素大气环流模式(iGCMs)等方法的最新进展, 总结了大气水汽氢氧稳定同位素在追踪水分来源、理解降水模式和重建过去气候方面的关键作用. 未来, 应加强大气水汽氢氧稳定同位素连续观测, 将大气水汽氢氧稳定同位素观测数据与其他气候指标相结合以提高气候模式模拟精度, 并将大气水汽氢氧稳定同位素应用到干旱区植被水分利用、生态系统服务功能评估等潜在领域. 本研究不仅总结了大气水汽氢氧稳定同位素最新的研究成果, 而且为未来大气水汽氢氧稳定同位素的研究指明了方向, 加深了对大气水汽氢氧稳定同位素及其在气候学和水文学中应用的认识.

关键词 大气水汽稳定同位素, 水分来源, 降水模式, 古气候重建

1 引言

水体中氢(^{1}H, ^{2}H)、氧(^{16}O, ^{17}O, ^{18}O)稳定同位素有助于理解关键的水循环过程, 如对流活动、大气混合、水汽传输和地表蒸散发等(Wolf等, 2020; Liu等, 2022; Pierchala等, 2022; 刘宇佳等, 2023; Wang等, 2023a). 与降水不同, 水汽作为水汽源区到云下凝结降水的中间产物, 其包含有关水汽来源和云下凝结过程产生降水的信息(图1)(章新平等, 2012; 杨言, 2020; Wang等, 2023b). 水汽稳定同位素的时空变化可以揭示季风区极端降水的关键机理(Xu等, 2022, 2023), 评估大气环流模式性能(宋献方等, 2007), 定量探究水汽传输距离和水汽来源(Carroll等, 2022; Du等, 2022; Singh等, 2023; Zhang等, 2023a; Pan等, 2023). 长期的水汽稳定同位素监测在大气环流、陆地水平衡和古气候重建等研究中也起着重要作用(Galewsky和Rabanus, 2016; Wahl等, 2022; Shi等, 2022; Tharammal等, 2023; Zhang等, 2023b).

过去几十年水汽稳定同位素观测技术的进步、遥感技术的应用、同位素大气环流模式的完善极大地推动了水汽稳定同位素相关研究的发展. 最初水汽稳定同位素的观测主要有冷阱冷凝法、干燥剂脱水法(Han

中文引用格式: 尚白军, 高晶, 陈葛般若, 武予清. 2024. 大气水汽稳定同位素: 特征、机制与前景. 中国科学: 地球科学, 54(12): 3832–3859, doi: 10.1360/N072023-0271
英文引用格式: Shang B, Gao J, Chen G, Wu Y. 2024. Stable isotopes in atmospheric water vapour: Patterns, mechanisms and perspectives. Science China Earth Sciences, 67(12): 3789–3813, https://doi.org/10.1007/s11430-023-1410-6

© 2024 《中国科学》杂志社

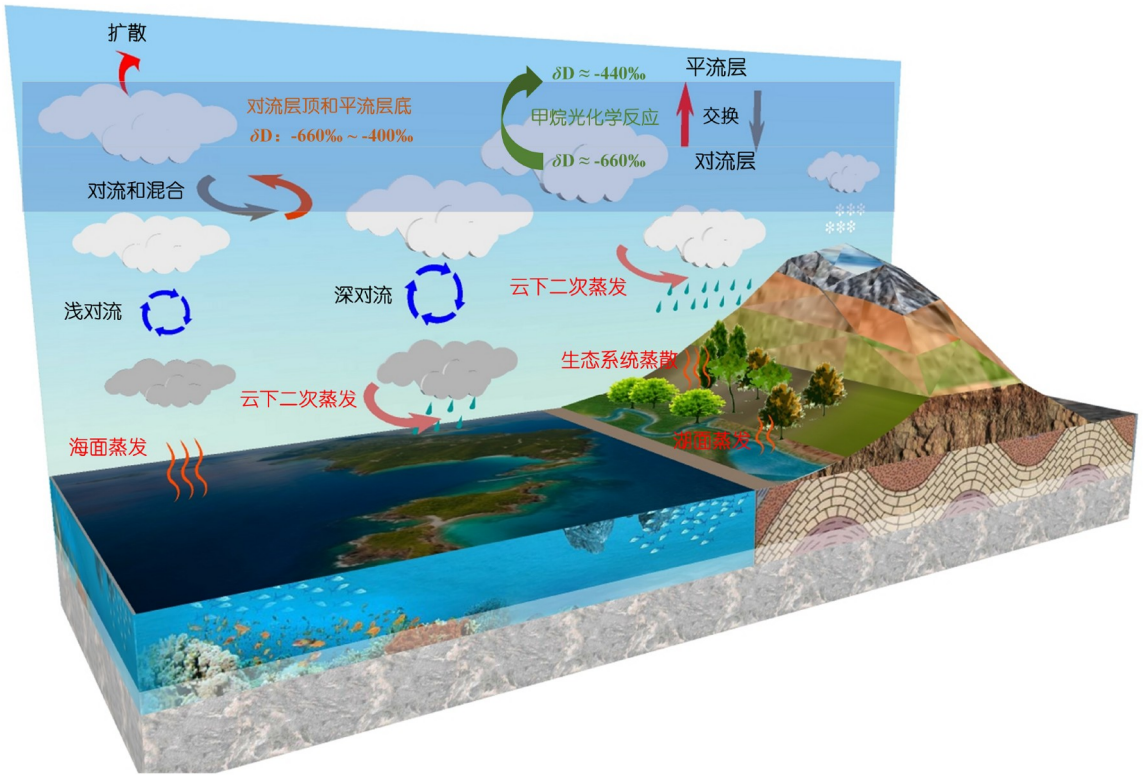


图 1　大气水汽稳定同位素关键过程示意图

淡黄色的波浪线表示海面和湖泊的蒸发、植被的蒸腾, 蓝色的箭头表示对流活动, 红色的箭头表示云下二次蒸发, 绿色的箭头表示甲烷的光化学反应

等, 2006)、Flask真空采集瓶法(Strong等, 2007)和Peltier制冷法, 以上方法都不能实现水汽稳定同位素长时间的连续观测. 后来发展的激光光谱技术弥补了该缺陷, 实现了定点长时间的连续观测. 卫星遥感反演技术的发展使得探究全球尺度的水汽稳定同位素空间变化特征成为可能. 近年来, 卫星遥感技术在大气成分研究中的应用已经十分成熟, 成为一种能够提供大尺度、长期观测大气水汽稳定同位素的有力工具. 稳定同位素大气环流模式(iGCMs)模拟为探究大气水汽稳定同位素连续变化过程提供了有效方式. Joussaume等(1984)首次运用GCM模型对同位素进行了模拟, 后来发展的水同位素比较计划(SWING)极大地推动了同位素大气环流模式的发展.

近几十年, 大气水汽稳定同位素研究蓬勃发展. 本文在Galewsky等(2016)综述的基础上, 总结了国内外水汽稳定同位素研究的最新进展, 并指出未来研究应重点关注化学因素对水汽稳定同位素的潜在影响、水汽稳定同位素在干旱区植物水分利用机制研究中的潜在应用, 以及水汽稳定同位素在生态系统蒸散发中的作用.

2　水体稳定同位素基本理论

2.1　大气水汽稳定同位素分馏

轻、重稳定同位素离解能存在差异(图2), 使得水体在相态转化时存在同位素分馏现象. 水汽传输过程中同位素分馏现象是普遍存在的, 通常用分馏系数α表示, 其定义为

$$\alpha=\frac{R_{\text{react}}}{R_{\text{prod}}}, \tag{1}$$

其中, R_{react}为反应物中同位素比; R_{prod}为生成物中同位素比.

以不同的水分子$H_2{}^{18}O$和$H_2{}^{16}O$为例, 说明影响轻、重稳定同位素分馏过程的主要因素. 化学键主要

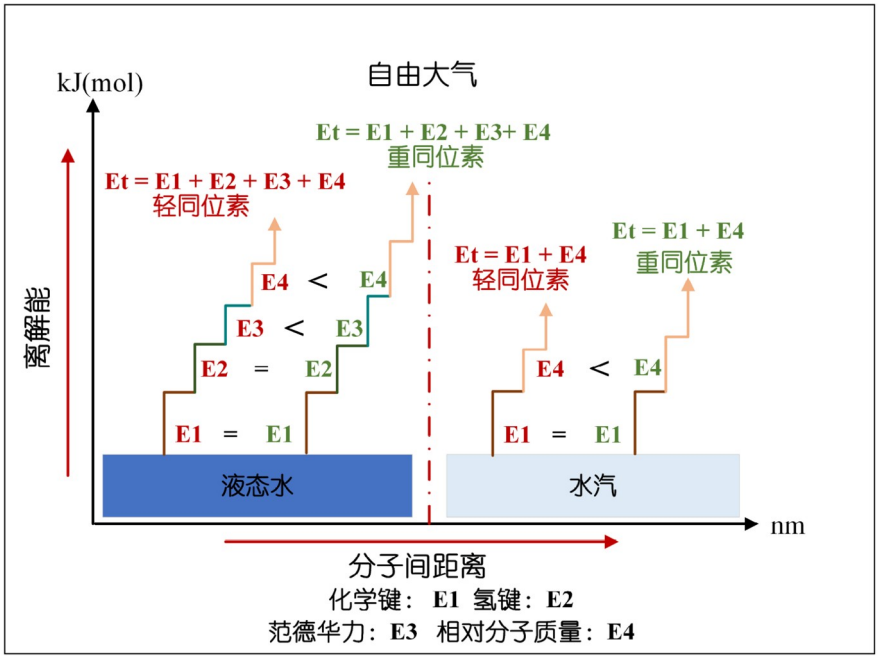


图 2　水体稳定同位素分馏时的离解能

液态水的离解能与化学键、氢键、范德华力、相对分子质量有关; 水汽中氢键和范德华力可忽略, 离解能主要与化学键、相对分子质量有关

由氧原子和氢原子的质子和电子决定，氢键主要与水分子间距离相关. 在液态水中，水分子间的排列更加紧密，氢键较高; 而水汽中，水分子间的距离较大，氢键可忽略不计. 范德华力取决于水分子间的距离和相对分子质量, 距离越小, 相对分子质量越大, 范德华力越强. 因此，当外界条件一定时，由于中子数不同，$H_2{}^{18}O$中的范德华力和相对分子质量比$H_2{}^{16}O$强(大)，从而导致$H_2{}^{18}O$的反应速率比$H_2{}^{16}O$慢.

液态水中，水分子的离解能受化学键、氢键、范德华力和相对分子质量的共同影响(图2). 水汽中，氢键和范德华力可以忽略，离解能主要由化学键和相对分子质量决定. 由于重同位素具有较强(大)的范德华力和相对分子质量，因此重同位素($H_2{}^{18}O$)的离解能高于轻同位素($H_2{}^{16}O$).

平衡分馏与轻、重稳定同位素之间反应速率和范德华力的差异有关. 具有较强范德华力和较慢反应速率的重稳定同位素在高密度相(液态)中较富集，而具有较弱范德华力和较快反应速率的轻稳定同位素在低密度相(气态)中较富集.

云下降水的形成过程通常伴随着水汽稳定同位素的平衡分馏. 在这个过程中, 云中的稳定同位素与雨滴(雪花)中的稳定同位素处于平衡状态. 当发生平衡分馏时，可假设相对湿度接近100%，此时的分馏系数与气温密切相关. 随着雨滴(雪花)的不断产生, 其在降落过程中存在云下二次蒸发现象，并与环境大气进行稳定同位素交换，这可能导致平衡分馏向非平衡分馏转变(图3). 这一转变过程取决于相对湿度、气温和风速等因素.

同位素在某一种介质或者真空中扩散时，由于扩散速率存在差异，使得同位素发生分馏，这个过程称为扩散分馏. 扩散分馏发生在真空时，分馏系数为两种同位素扩散速度之比, 速度计算公式为

$$\upsilon=\sqrt{\frac{kT}{2\pi m}}, \tag{2}$$

$$\alpha_{m*-m}=\frac{\upsilon*}{\upsilon}=\frac{\sqrt{\frac{kT}{2\pi m*}}}{\sqrt{\frac{kT}{2\pi m}}}=\sqrt{\frac{m}{m*}}, \tag{3}$$

式中，υ为分子速度(cm s^{-1})；k为玻尔兹曼常数，k=n×1.380649×10^{-23}(J K^{-1})；m*和m分别为轻、重稳定同位素相对分子质量(kg)；T为绝对温度(K).

当气体或者液体通过另外一种介质扩散时，必须

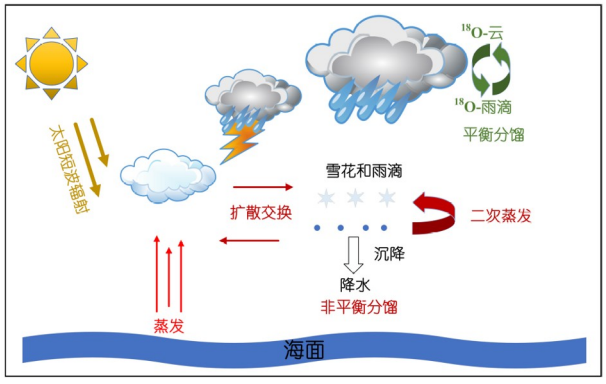


图 3　云下水汽稳定同位素变化

绿色箭头表示平衡状态时云中稳定同位素与雨滴(雪花)中稳定同位素交换(平衡分馏). 随着雨滴(雪花)降落, 雨滴存在云下二次蒸发现象, 并与环境大气进行稳定同位素交换(非平衡分馏)

考虑介质的质量, 以空气为例, 分馏系数为

$$\alpha=\left[\frac{m^{*}\left(m+28.8\right)}{m\left(m^{*}+28.8\right)}\right]^{\frac{1}{2}}. \tag{4}$$

式中, m^{*}和m分别为轻、重稳定同位素相对分子质量(kg).

2.2　瑞利分馏

在水汽传输过程中, 随着环境条件(露点温度、相对湿度、海拔、地形、大陆度等)的变化, 水汽逐渐凝结并产生降水. 在这个过程中, 气团中水体稳定同位素比率一直在变化. Dansgaard(1964)提出的瑞利分馏理论可以很好地解释同位素分馏对大气水汽稳定同位素组成的渐进影响. 瑞利耗散理论的前提是形成的凝结水被完全移除, 且不考虑外界水汽的补充. 此时水汽中的轻、重同位素比率可以描述为

$$\mathrm{d}\ln R_{\mathrm{r}}=(\alpha_{v}^{\mathrm{l}}(T)-1)\mathrm{d}\ln q, \tag{5}$$

式中, R_{r}是水汽同位素比率, $\alpha_{\mathrm{v}}^{\mathrm{l}}(T)$是与温度相关的同位素分馏系数, q是水汽混合比.

水体蒸发过程中剩余水体的重同位素不断富集, 轻同位素不断贫化, 水体稳定同位素发生分馏, 且该分馏与相对湿度密切相关. 若相对湿度为0, 那么剩余水体中同位素比率R_{r}与剩余水比例f、平衡分馏系数$\alpha_{\mathrm{v}}^{\mathrm{l}}(T)$和初始水体中同位素比率$R_0$存在如下关系(Gat, 1996):

$$R_{\mathrm{r}}=R_0 f^{\alpha_{\mathrm{v}}^{\mathrm{l}}(T)-1}. \tag{6}$$

理想条件下, 如果不考虑水汽混合, 降水过程就是典型的瑞利分馏过程, 其本质是不断损失水汽的过程, 随着降水的产生, 水汽逐渐减少, 降水和水汽中重稳定同位素逐渐贫化.

2.3　全球大气降水线和水汽水线

Craig(1961)提出将标准平均海洋水(Standard Mean Ocean Water, SMOW)作为测量水中^{18}O和D的标准:

$$\left(\frac{^{18}\mathrm{O}}{^{16}\mathrm{O}}\right)_{\mathrm{SMOW}}=1.0008\left(\frac{^{18}\mathrm{O}}{^{16}\mathrm{O}}\right)_{\mathrm{NBS-1}}=(1993.4\pm2.5)\times10^{-6}, \tag{7}$$

$$\left(\frac{^{2}\mathrm{H}}{^{1}\mathrm{H}}\right)_{\mathrm{SMOW}}=1.050\left(\frac{^{2}\mathrm{H}}{^{1}\mathrm{H}}\right)_{\mathrm{NBS-1}}=(158\pm2)\times10^{-6}. \tag{8}$$

国际原子能机构(IAEA)提出了维也纳平均海洋水标准(VSMOW):

$$\left(\frac{^{18}\mathrm{O}}{^{16}\mathrm{O}}\right)_{\mathrm{SMOW}}=1.0008\left(\frac{^{18}\mathrm{O}}{^{16}\mathrm{O}}\right)_{\mathrm{NBS-1}}=(1993.4\pm2.5)\times10^{-6}, \tag{9}$$

$$\left(\frac{^{2}\mathrm{H}}{^{1}\mathrm{H}}\right)_{\mathrm{SMOW}}=1.050\left(\frac{^{2}\mathrm{H}}{^{1}\mathrm{H}}\right)_{\mathrm{NBS-1}}=(158\pm2)\times10^{-6}. \tag{10}$$

数学上, 同位素组成用δ表示, 记作

$$\delta^{18}\mathrm{O}_{\mathrm{Sample}}=\left[\frac{\left(^{18}\mathrm{O}/^{16}\mathrm{O}\right)_{\mathrm{Sample}}-\left(^{18}\mathrm{O}/^{16}\mathrm{O}\right)_{\mathrm{VSMOW}}}{\left(^{18}\mathrm{O}/^{16}\mathrm{O}\right)_{\mathrm{VSMOW}}}\right]\times1000\text{‰ VSMOW}. \tag{11}$$

全球淡水中δD和δ^{18}O的拟合线式(12)被定义为全球大气降水线(Global Meteoric Water Line, GMWL), 局地或区域尺度降水中δD和δ^{18}O的拟合线被定义为局地大气降水线(Local Meteoric Water Line, LMWL). 由于气象条件、下垫面、海陆分布、气候型的差异使得LMWL与GMWL存在差异. 参照GMWL, 局地大气降水线的斜率和截距对水汽来源的环境条件(气温、相

对湿度等)有一定的指示意义.

$$\delta D=8\delta^{18}O+10‰ \quad VSMOW. \tag{12}$$

本研究利用GNIP的降水稳定同位素资料(Global Network of Isotope in Precipitation, https://nucleus.iaea.org/wiser/gnip.php)和文献中的水汽稳定同位素资料, 探讨降水和水汽中δD和δ^{18}O的关系, 分别得到了局地大气降水线(LMWL)和大气水汽水线(Meteoric Water Vapor Line, MWVL). LMWL和MWVL的斜率分别为8.0和7.5(图4), 接近GMWL的斜率(8.0); LMWL和MWVL的截距分别为8.8‰和–0.84‰, 与GMWL的截距差别较大, 这可能是由于云下二次蒸发引起的同位素分馏所致. 此外, MWVL具有明显的空间异质性.

虽然LMWL的截距和斜率对水汽源区有指示意义, 但是水滴在降落过程中云下二次蒸发及不同高度的水汽交换会引起同位素分馏. 同位素分馏会导致气团原有信息失真, 而直接观测水汽稳定同位素则可以避免出现此现象. 因此与LMWL相比, MWVL能更准

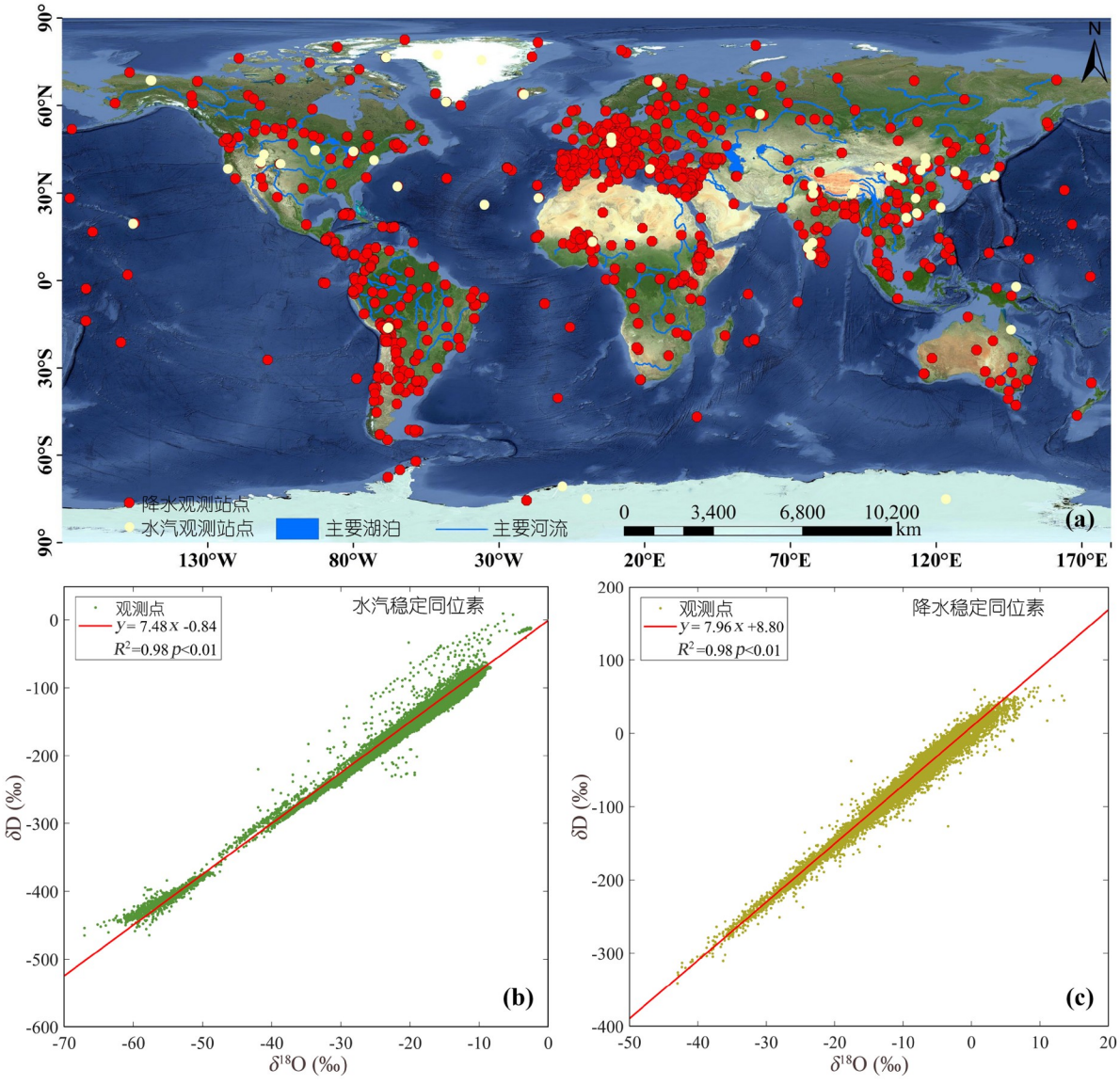


图 4　大气水汽水线和大气降水线的差异

(a) 降水稳定同位素、水汽稳定同位素观测点分布; (b) 大气水汽水线(MWVL); (c) 局地大气降水线(LMWL)

确地反映水汽源区的环境变化信息.

2.4　大气水汽稳定同位素D和^{18}O的关系

在平衡条件下，D和^{18}O的平衡分馏系数与温度成反比，两者平衡分馏系数的比值随着温度的升高逐渐减小(表1).

温度为25℃时，D的平衡分馏系数约为^{18}O平衡分馏系数的8倍，动力学非平衡分馏的存在打破了此平衡关系，并产生了过量氘(d-excess). 因此，d-excess与动力学非平衡分馏过程密切相关. Dansgaard(1964)首次将d-excess定义为

$$\text{d-excess} = \delta\text{D} - 8\,\delta^{18}\text{O}. \tag{13}$$

已有的研究表明动力学非平衡分馏系数与水汽源区的相对湿度、风速和海表温度密切相关, 所以d-excess在水汽来源方面得到了广泛应用(图5)(Gat等，2013; Pfahl和Sodemann, 2014).

Merlivat和Jouzel(1979)提出了一个闭合假设，即一个被蒸发水汽完全填充的独立气团会在其运行轨迹上完全沉降. 此外, 如果来自大气边界层的水汽完全沉降，则降水中的稳定同位素组成与大气边界层的稳定同位素组成是相同的. 在此闭合假设的前提下，理论上大气边界层水汽d-excess与海表温度、相对湿度、风速等海表条件密切相关(Merlivat和Jouzel, 1979), 且只要不发生动力学非平衡分馏，气团在传输过程中d-excess是守恒的(Bonne等，2014). 但近年的观测结果表明对流层d-excess与海洋源区条件无关, 其可能受其他过程控制，如云下微物理过程和云下二次蒸发等

表 1　不同温度稳定同位素D和^{18}O平衡分馏系数[a)]

温度(℃)	平衡分馏系数(^{18}O)	平衡分馏系数(D)	αD/α^{18}O
−10	12.8	122	9.53
5	11.1	100	9.01
10	10.6	93	8.77
15	10.2	87	8.53
20	9.7	82	8.45
25	9.3	76	8.17
30	8.9	71	7.98
40	8.2	62	7.56
50	7.5	55	7.33
75	6.1	39	6.39
100	5.0	27	5.40

a) 表格数据来自于Majoube(1971)

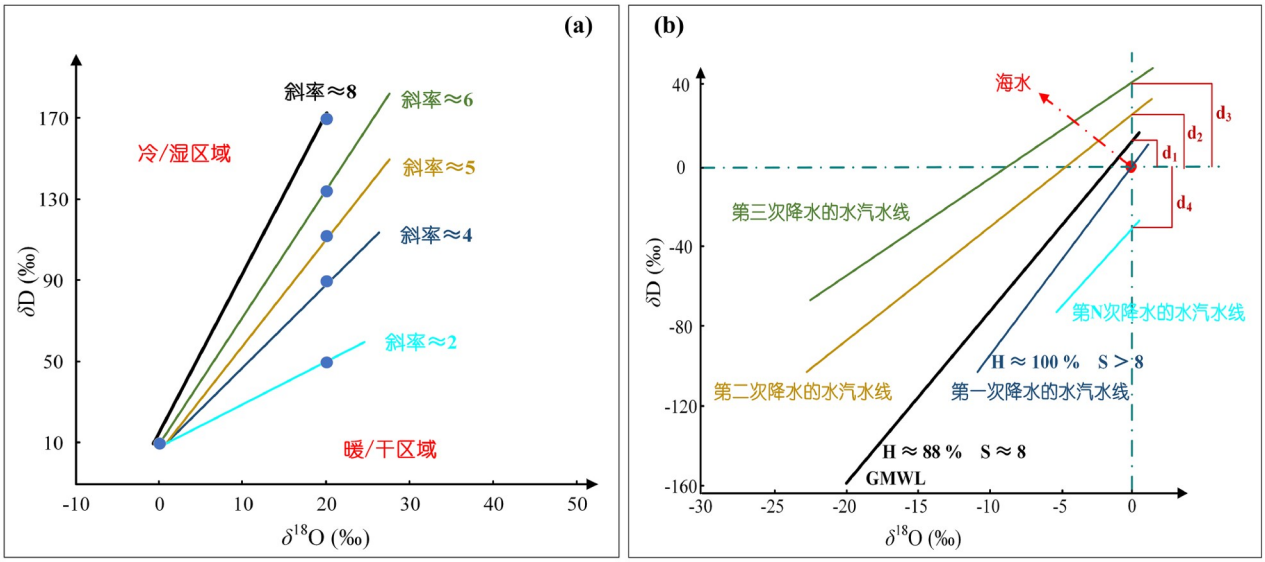


图 5　水汽水线斜率(a)与截距(b)的指示意义

GMWL和LMWL的斜率对应特定环境下δD和δ^{18}O分馏系数的比值. 在平衡条件下, GMWL和LMWL的斜率接近8.0. 由于δD和δ^{18}O分馏系数的比值随着温度的升高而降低(表1), 当相对湿度足够低, 外部蒸散发较强时, 水汽水线的斜率会减小. 因此在温暖或干燥的环境下, 水汽水线的斜率较小, 而在寒冷或湿润的环境下, 水汽水线的斜率较大. 理想条件下, 海水发生平衡分馏时截距为0. 外部环境(温度, 相对湿度等)的改变和降水的产生均会影响水汽水线的斜率和截距. d_1–d_4表示非平衡分馏的发生, 并且产生d-excess

(Samuels-Crow等, 2014; Galewsky, 2015; Lu和DePaolo, 2016; Xing等, 2023a).

2.5 非质量相关分馏(MIF)和^{17}O-excess

Clayton等(1973)首次在陨石中发现了^{17}O异常, Thiemens和Heidenreich(1983)通过臭氧合成实验证实了非质量相关分馏(the mass-independent fractionation, MIF)过程的存在. 已有研究表明平流层臭氧的光化学反应过程会将MIF信号传递至CO_2、NO_3^-、SO_4^{2-}、H_2O_2、大气水汽等(Thiemens, 2006), 后通过大气环流过程进入对流层, 最终通过化学反应将MIF信号保留在岩石和矿物中.

^{17}O在自然界中的丰度仅为0.039%, 其测定受到同位素分析仪器观测精度的制约, 并且一般认为同位素分馏遵循质量相关分馏, 因此样品中δ^{17}O的值约等于δ^{18}O值的一半(Matsuhisa等, 1978; 刘熙, 2019; 胡月等, 2019; Voigt等, 2022). 随着分析仪器测量精度的提高和非质量相关分馏理论的提出, δ^{17}O和δ'^{17}O的演化特征及变化机理逐渐成为研究热点, δ'^{17}O是微小的δ^{17}O异常. Luz和Barkan(2010)推导出δ'^{17}O全球大气降水线:

$$\ln(\delta^{17}\mathrm{O}+1) = 0.528\ln(\delta^{18}\mathrm{O}+1) + 0.000033. \quad (14)$$

δ'被定义为

$$\delta' = \ln(\delta+1) = \ln(\frac{R_{\mathrm{sample}}}{R_{\mathrm{ref}}}), \quad (15)$$

式(14)可简化为

$$\delta'^{17}\mathrm{O} = 0.528\,\delta'^{18}\mathrm{O} + 0.000033. \quad (16)$$

斜率0.529(±0.001)对应于平衡分馏条件下(相对湿度接近100%)的海水蒸发, 当水汽扩散至干燥大气(相对湿度接近0)时, 斜率减小到0.5185(±0.0003). 岩石矿物中的δ^{17}O可以反映地质历史时期的CO_2浓度和生物生产力(Bao等, 2008; Sansjofre等, 2011; Cao和Bao, 2013; Killingsworth等, 2013; Crockford等, 2018), δ'^{17}O可以反映地质历史时期的相对湿度(Evans等, 2018). Barkan和Luz(2007)将^{17}O-excess定义为

$$^{17}\mathrm{O\text{-}excess} = \delta'^{17}\mathrm{O} - 0.528\,\delta'^{18}\mathrm{O}, \quad (17)$$

并得出结论, ^{17}O-excess越高, 对应海洋蒸发区的相对湿度越低.

^{17}O-excess对扩散分馏更敏感, 其不仅可以表征水汽源区的环境条件, 也能反应水汽再循环过程(Kelson等, 2022; Xia等, 2023). Noone(2008)的研究结果进一步证明了海洋上空水汽存在^{17}O-excess, 并且^{17}O-excess与相对湿度存在负相关关系, 其主要受蒸发过程中的动力学非平衡分馏过程控制. Uemura等(2010)的研究结果表明^{17}O-excess与相对湿度存在明显的负相关关系. 由于观测对流层水汽中MIF信号极具挑战性, 因此目前对水汽中MIF、δ^{17}O和^{17}O-excess的研究相当有限. 未来应致力于平流层和极地内陆地区上空MIF信号的观测, 同时要加强冰芯气泡中水汽稳定同位素的分析, 这些工作将有助于改进和完善^{17}O-excess和MIF相关理论.

3 大气水汽稳定同位素监测方法

3.1 传统采样方法

过去的二十多年水汽稳定同位素的观测技术取得了重大进展. 然而, 由于高精度的观测仪器成本较高, 它们的使用仍然受到一定限制, 难以在全球尺度探究水汽稳定同位素的时空变化特征(Lee等, 2012; Yu等, 2015, 2016). 早期的大气水汽稳定同位素传统观测方法包括液氮冷阱冷凝法(Ganguly等, 2023)、干燥剂脱水法(Han等, 2006)、Flask真空采集瓶(Strong等, 2007)和Peltier制冷法(柳景峰等, 2015). 液氮冷阱冷凝法以液氮为制冷剂, 在冷阱表面通过凝结方式捕集水汽; Peltier制冷法通过半导体制冷芯片冷凝捕集水汽; 干燥剂脱水法通过分子筛选吸附捕集水汽; Flask真空采集瓶直接捕集水汽. 以上方法原理不同, 且各有优缺点(表2).

3.2 激光吸收光谱技术

激光吸收光谱技术的基本原理是朗伯-比尔(Lambert-Beer)定律, 该定律阐明了吸收介质与单色光吸收强度之间的关系, 其数学表达式为

$$\mathrm{A} = \lg\frac{I_0(\lambda)}{I_t(\lambda)} = \varepsilon(\lambda)bc, \quad (18)$$

式中, A是吸光率, $I_0(\lambda)$为入射光强度, $I_t(\lambda)$为透射光强度, $\varepsilon(\lambda)$为吸收系数, b为介质厚度, c为吸收介质浓度.

基于朗伯-比尔(Lambert-Beer)定律的激光吸收光谱技术主要有离轴积分震腔输出光谱技术(Off-Axis

ICOS)(Steen-Larsen等, 2011)、光腔衰荡光谱技术(CRDS)(Steen-Larsen等, 2014)和TDL-可调谐二极管激光吸收光谱技术(TDLAS)(Wen等, 2010). 激光吸收光谱技术的应用使得长时间连续水汽稳定同位素观测成为可能, 极大地推进了水汽稳定同位素的研究发展.

3.3　卫星遥感反演

卫星遥感技术可以反演大尺度的同位素分布特征(Gunson等, 1996; Frankenberg等, 2009; Schneider等, 2012). 卫星观测采用连续覆盖模式, 从三维空间观测水汽稳定同位素的水平和垂直分布特征, 并且可以提供沙漠腹地、海洋上空的水汽稳定同位素数据(章新平等, 2012; 黄一民, 2013). 目前比较常见的水汽稳定同位素遥感数据产品主要有: 红外大气探测干涉仪(infrared atmospheric sounding interferometer, IASI)、对流层发射光谱仪(tropospheric emission spectrometer, TES)、高光谱傅里叶变换光谱仪(Fourier-transform spectrometer, FTS)、温室气体干涉监测仪(interferometric monitor for greenhouse gases, IMG)、大气扫描成像吸收光谱仪(scanning imaging absorption spectrometer for atmospheric chartography, SCIAMACHY)和迈克逊无源大气探测干涉仪(Michelson interferometer for passive atmospheric sounding, MIPAS)(Zakharov等, 2004; Frankenberg等, 2009; 史晓宜等, 2016, 2020). 表3列出了各水汽稳定同位素卫星遥感产品的详细情况.

目前基于卫星遥感产品的水汽稳定同位素研究主要集中在两个方面, 一是将卫星遥感产品反演结果与实测数据、稳定同位素大气环流模式模拟结果进行对比, 评估卫星遥感产品反演精度(Worden等, 2006; Steinwagner等, 2007; Yoshimura等, 2011), 如已有研究结果表明SCIAMACHY、MIPAS和TES反演的平流层和对流层顶部平均δD的绝对总误差在36‰~111‰之间, HDO/H_2O比率的估计精度约为1%~2%; 另一方面是基于卫星遥感产品, 分析水汽稳定同位素时空变化规律(Imasu等, 2000; Zakharov等, 2004; Payne等, 2007; Frankenberg等, 2009; Liu等, 2014a; Galewsky等, 2016), 如有研究表明卫星反演的大气水汽稳定同位素在高纬度贫化, 低纬度富集, 且从沿海向高海拔地区逐渐贫化, 对流层顶δD可贫化至约–700‰.

IASI和GOSAT时间分辨率较高, 可以用于探究日

表 2　传统水汽稳定同位素观测方法及优缺点[a)]

水汽同位素收集方法	原理	优点	缺陷
液氮冷阱冷凝	液氮等冷凝剂在约–78℃环境下将水汽分子完全冷凝	足够低的温度使水分子完全凝结	需要持续供给液氮; 冷阱极高的气流造成额外的分馏或冰晶流失; 极端制冷剂造成CO_2和O_2凝结
Peltier制冷法	半导体制冷会产生约–50℃的冷凝温度	避免其他气体的过冷凝结	冷凝温度不够低造成凝结水量少, 不能满足质谱仪分析的精度要求; 会造成重同位素富集
干燥剂脱水法	分子筛选吸附	精度较高	干燥剂含有O_2会引起同位素交换; 需要集成以适应野外工作
Flask真空采集瓶	真空直接采样	直接取样, 没有冷凝等造成的信息失真	采样点少, 可用于HDO, 无法满足$\delta^{18}O$测量需求

a) 表格内容修改自柳景峰等(2015)

表 3　水汽稳定同位素卫星遥感产品的基本信息

传感器	卫星	开发机构	空间分辨率(km)	参考文献
红外大气探测干涉仪(IASI)	METOP	欧洲气象卫星应用组织	25~100	García等, 2016
对流层发射光谱仪(TES)	AURA	美国国家航空航天局	5.3×8.5	Worden等, 2006
高光谱傅里叶变换光谱仪(FTS)	GOSAT	日本宇宙航空开发研究机构	88~800	Holl等, 2016
温室气体干涉监测仪(IMG)	ADEOS	日本	80	Zakharov等, 2004
大气扫描成像吸收光谱仪(SCIAMACHY)	ENVISAT	欧洲航天局	6~68	Frankenberg等, 2009
迈克逊无源大气探测干涉仪(MIPAS)	ENVISAT	欧洲航天局	30	Steinwagner等, 2007

尺度δD的时空变化特征，但GOSAT空间分辨率较低; FTS主要用于反演整层大气的δD; TES反演精度较高, 可以探索H_2O、HDO、O_3、CH_4和NO_2等气体的含量和时空分布特征, 但其时空分辨率较低, 且反演结果易受水汽浓度和温度影响; MIPAS反演结果具有较大的不确定性，并且其只能反演特定高度的水汽稳定同位素值; 与iGCMs相比，SCIAMACHY反演结果高估了水汽稳定同位素δD值.

TES和GOSAT是常用的两种水汽稳定同位素遥感产品, 其反演精度易受经度、纬度和季节影响(Gryazin等, 2014). 综上所述, 不同卫星遥感产品的反演精度具有空间异质性, 并且影响因素也不同. 因此, 需要将卫星遥感和地面观测、iGCMs等方法相结合，从而更准确地开展全球或区域尺度水汽稳定同位素的相关研究.

4 大气水汽稳定同位素模型模拟

虽然卫星遥感数据可以反演大气水汽稳定同位素的时空变化，但是其无法反映水汽稳定同位素变化机制. 稳定同位素大气环流模式(isotopic general circulation models, iGCMs)已被广泛用于研究全球尺度水汽稳定同位素的时空变化特征和变化机制(Tindall等, 2009; Sjolte等, 2011; Zhang等, 2012; Risi等, 2013; Samuels-Crow等, 2014; 王学界, 2018), 这极大地推进了水体稳定同位素相关理论的发展. 早期的大气环流模型并不包括稳定同位素，Joussaume等(1984)首次将同位素引入大气环流模式. 同位素大气环流模式不仅可以刻画水汽稳定同位素分馏机理，还可以用于补充地面观测(余秀秀, 2019). 此外，iGCMs为理解水汽稳定同位素的动态过程提供了独特优势(石梦雨等, 2018), 如iGCMs可以基于物理机制在全球尺度模拟水汽稳定同位素在不同高度的时空变化特征(图6). 为了对比分析不同模式模拟结果，并评估水体稳定同位素在气候反馈机制方面的作用，国际原子能机构(IAEA)、戈达德太空研究所(GISS)和其他机构联合开展了水稳定同位素比较计划(the Stable Water Isotope Intercomparison Group, SWING). 在该计划实施的第一阶段(SWING1)，主要有GISS-E、MUGCM、HadAM3等同位素大气环流模式，在该计划实施的第二阶段(SWING2，https://data.giss.nasa.gov/swing2/)，主要有LMDZ4、isoGSM、GENESIS3、CAM2、GISSE-F、GISSE-N等iGCMs模式，以上稳定同位素大气环流模式可以模拟全球尺度水体稳定同位素分布特征(Conroy等, 2013), 极大地促进了大气水汽稳定同位素的研究进展(Joussaume等, 1984; Schmidt等, 2005; Risi等, 2012; 章新平等, 2016; Nimya等, 2022; Li等, 2023a).

同位素大气环流模式仍处于不断完善和改进阶段. 目前研究主要运用iGCMs分析水汽和水汽稳定同位素的时空变化特征及影响因素，包括海表温度、陆地蒸散发、降水和云下二次蒸发对水汽稳定同位素的影响(Christner等, 2018; Xie等, 2020). 此外, 不少研究致力于提升iGCMs性能，包括模拟误差归因、模拟精度和预测能力的提高等(Steen-Larsen等, 2017; Fiorella等, 2019; Tada等, 2021).

尽管目前已开展了许多同位素大气环流模式的研究，但是引入稳定同位素效应的iGCMs模式十分复杂，并且计算成本较高，这阻碍了iGCMs模式的推广. 此外，不同的iGCMs模式模拟结果差异较大(图7)，并且空间分辨率较低(表4)，需要根据研究区域和科学问题选择合适的iGCMs模式.

值得注意的是, iAWBM(isotope Atmosphere Water Balance Model)是一种简化的大气环流模式, 它引入了瑞利分馏过程, 具有1.5°×1.5°的空间分辨率, 它将整层大气的水汽和水汽稳定同位素进行积分，即垂直空间仅有一层. 重要的是，iAWBM由外部观测的气象数据驱动，其能够更真实地再现水循环过程和水稳定同位素变化过程(Zhang等, 2015; 章新平等, 2016).

5 大气水汽稳定同位素效应

水汽在运移过程中，重同位素随着降水进入地表，使得降水中的重同位素随着水汽运移距离的增加而逐渐贫化, 表现出明显的“大陆效应”(Taylor, 1964; Ingraham和Taylor, 1986; Yamanaka和Shimizu, 2007). 水汽在运移过程发生的蒸发-冷凝物理现象伴随着稳定同位素的分馏，这一过程中稳定同位素的分馏与温度密不可分(温度效应)(Jouzel等, 1987; Yu等, 2007; Akers等, 2017; Jasechko, 2019; Xing等, 2023b). 降水中稳定同位素会随着该地区降水量的增加而贫化，该现象在两极和赤道地区不明显，在中纬度地区尤为突出(降雨量效应)(Yapp, 1982; 章新平等, 2001; Guan等, 2013;

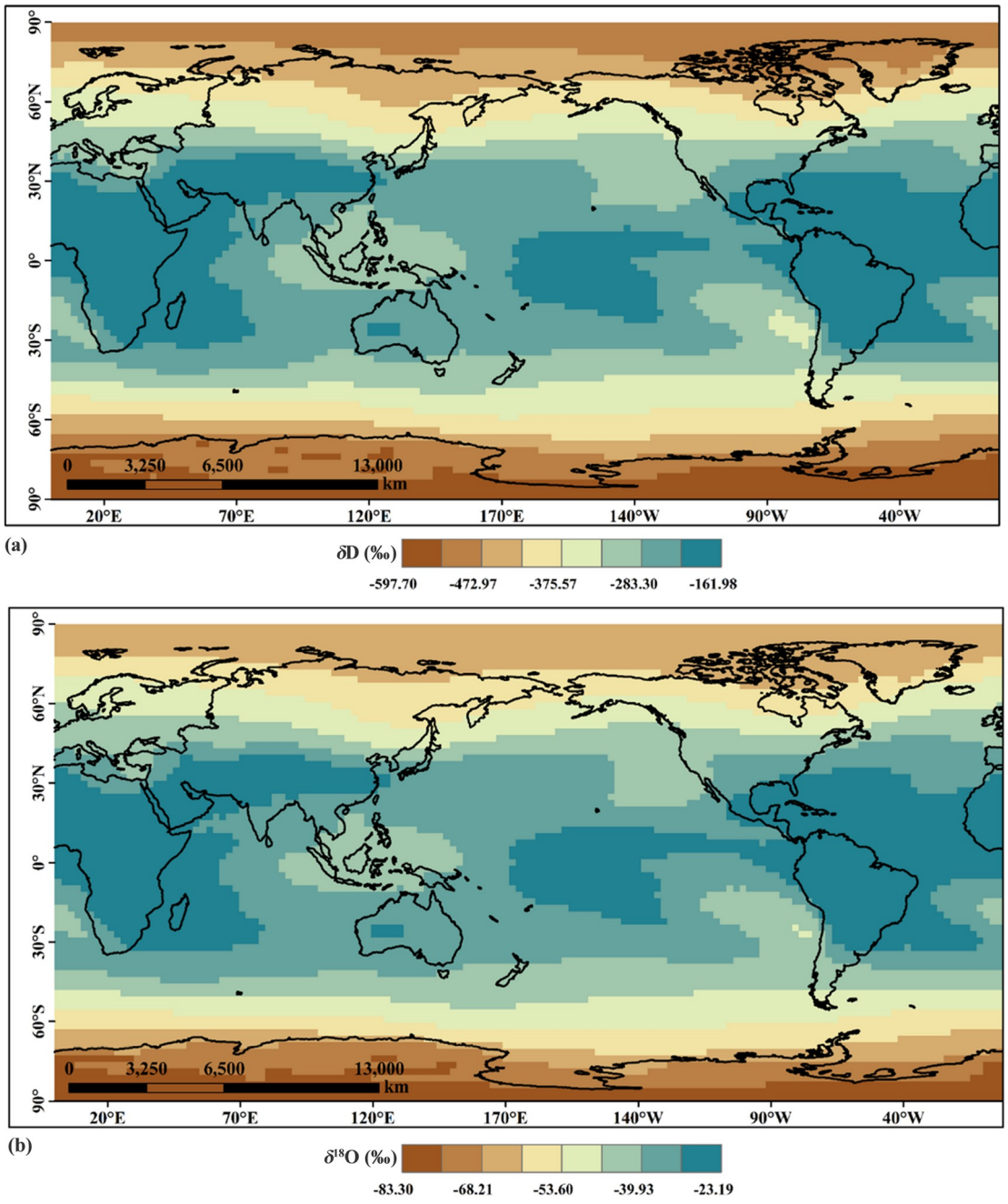


图 6　1979~2022年500hPa的大气水汽稳定同位素δD(a)和δ^{18}O(b)的全球分布特征

δ^{18}O的变化范围为–83.30‰~–23.19‰, δD的变化范围为–597.70‰~–161.98‰. δ^{18}O和δD具有明显的纬度效应, 这与Worden等(2006)和Frankenberg等(2009)的研究结果一致

Tharammal等, 2017; Sun等, 2023). 水汽运移过程中随着海拔的升高会产生降水, 降水中稳定同位素组成会随海拔升高而逐渐贫化(高程效应)(Rozanski等, 1992; Jasechko, 2019). Jing等(2022)的研究结果表明高同位素值的水汽补给和对流层中下部水汽的强烈混合将导致稳定同位素出现反高程效应. 此外, 中高纬度地区, 降水稳定同位素夏季富集冬季贫化(季节效应).

与降水稳定同位素效应相似, 伴随着降水的产

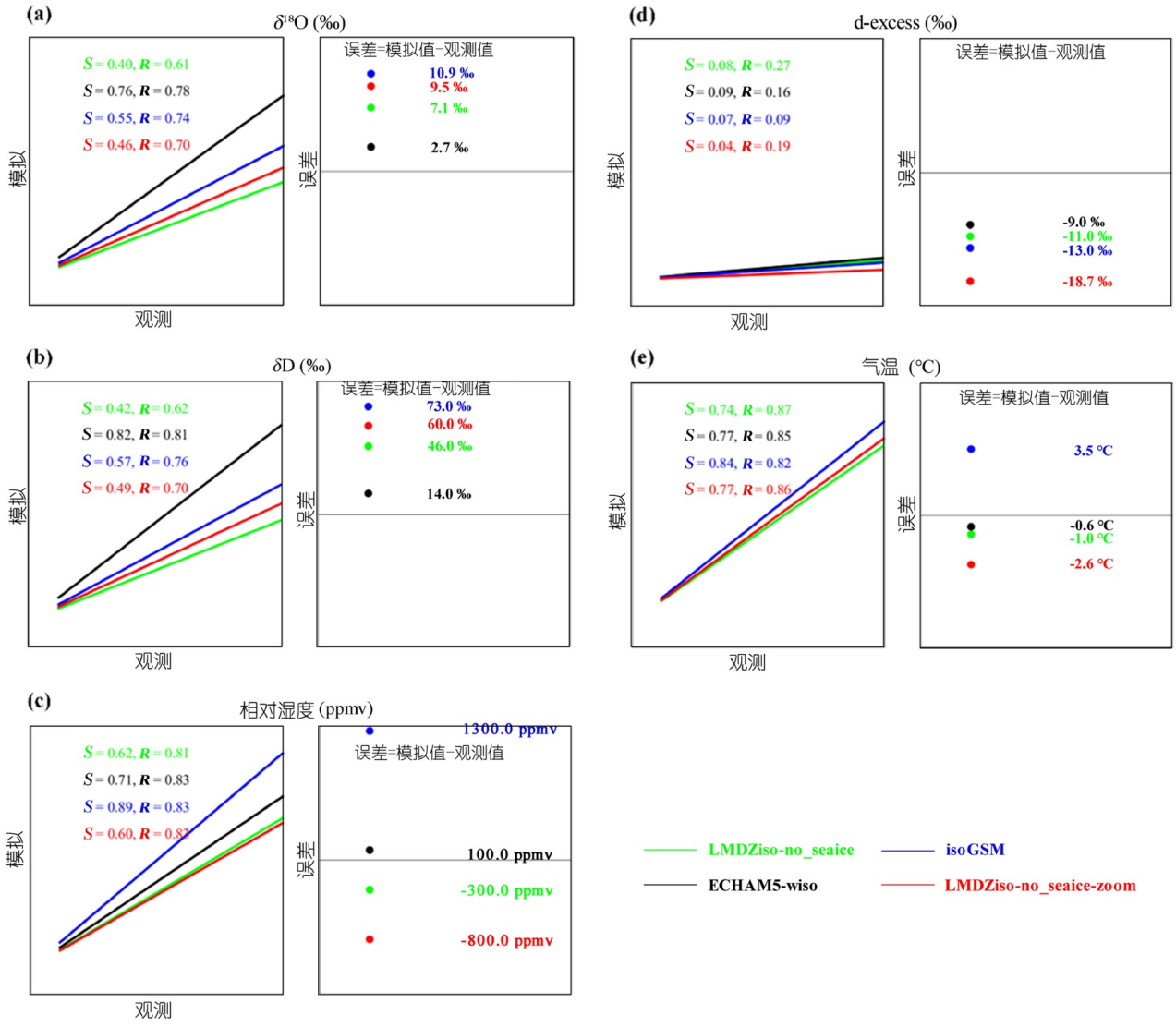


图 7　不同iGCMs模式模拟值与观测值的线性回归和模拟误差

(a) δ^{18}O, (b) δD, (c) 相对湿度, (d) d-excess, (e) 气温. LMDZiso-no_seaice模式具有2.5°(纬度)×3.75°(经度)和39层的空间分辨率, 而LMDZiso-no_seaice-zoom模式具有以北极为中心的缩放网格, 在65°N–90°N(0.37°)之间具有较高的纬度分辨率, 但是在低纬度地区的分辨率较低(40°N为1.1°, 25°N为2.5°). isoGSM模式具有1.875°×1.875°和28层的空间分辨率. ECHAM5-wiso模式具有1.125°×1.125°和31层的空间分辨率. 图中模拟误差为模拟值与观测值之间的差值. 更多详情请参考Steen-Larsen等(2017). 图中S表示模拟值与观测值拟合线的斜率

生、温度变化、季节变化、海拔升高、海陆边界层过程、水汽传输距离增加等物理过程, 大气水汽稳定同位素也存在相似的变化特征(Dansgaard, 1964). Jacob和Sonntag(1991)在德国的研究结果表明, 水汽稳定同位素存在更显著的“温度效应”. Yu等(2015)在那曲的研究结果表明, 降水事件的发生会导致水汽稳定同位素逐渐贫化(降雨量效应). He和Smith(1999)的研究结果表明, 随着海拔的上升, 水汽稳定同位素逐渐贫化(高程效应). Angert等(2008)发现7月份δ^{18}O的变化最大(4‰), 并且主要受温度、相对湿度和大气边界层的季节性变化影响(季节效应和温度效应). 需要说明的是只有在地貌类型单一、气象条件稳定的环境中上述各种同位素效应才有可能单独发生. 在外部环境复杂的区域, 上述各种同位素效应同时存在, 这使得稳定同位素效应出现紊乱(如青藏高原东南边缘).

虽然降水稳定同位素与大气水汽稳定同位素具有

表 4　稳定同位素大气环流模式(iGCMs)的基本信息

模式名称	来源说明	网格精度(°)	参考文献
CAM2	美国国家大气研究中心(NCAR)	2.81×2.81	Lee等, 2007
CAM5	美国国家大气研究中心(NCAR)	0.9×1.25	Nusbaumer等, 2017
ECHAM4	德国马普研究所(MPI)	2.0×2.81	Hoffmann等, 1998
GENESIS3	美国科罗拉多大学	3.75×3.75	Mathieu等, 2002
GISS E-F	美国戈达德太空研究所(GISS)	2.5×2.0	Schmidt等, 2006
HadCM3	英国哈德莱气候研究与预测中心	3.75×2.75	Tindall等, 2009
HadAM3	英国哈德莱气候研究与预测中心	3.75×2.75	Sime等, 2009
isoGSM	日本东京大学	2.5×2.5	Kanamitsu等, 2002
LMDZ4	法国国家气象动力实验室	3.75×2.75	Hourdin等, 2006
MUGCM	澳大利亚墨尔本大学	2.0×2.0	Noone和Simmonds, 2002
REMOiso	德国气候中心	0.5×0.5	Fischer和Sturm, 2006
SPEEDY-IER	美国普林斯顿大学地球物理实验室	T30	Dee等, 2015
MIROC	日本东京大学气候系统研究中心	2.8×2.8	Kurita等, 2011

相同的同位素效应, 并且相对湿度、水汽混合比、地面蒸散、外来水汽、季风活动、强烈的海-气相互作用、太阳辐射、湍流/对流运动、极端天气事件均会对降水和水汽稳定同位素产生影响, 但是影响降水和水汽稳定同位素的主导因素存在差异(Martinez-FrÍAs等, 2005; Li等, 2023b; Sun等, 2023). 如在大气行星边界层, 强烈的风的铅直切变和下垫面非均匀增热常会引起湍流的发展. 湍流运动会引起动量和其他物理属性的改变, 其结果不但使水汽在传输方向的物理属性发生变化, 也会改变水汽水平运移规律, 这可能会导致水汽稳定同位素效应发生改变. 相反, 在较稳定的高层大气中, 水汽和降水的稳定同位素效应更为相似, 温度、降水和海拔对水汽和降水稳定同位素的影响更为明显. 因此, 在讨论水汽稳定同位素效应时, 需要说明气团高度. 此外, 不同的水汽凝结过程, 如大尺度缓慢上升运动和积云对流活动引起的水汽凝结过程(Bony等, 2008; Villiger等, 2023)也会影响稳定同位素效应. 中纬度锋区附近缓慢的大尺度上升运动使气团绝热膨胀达到饱和产生降水, 低纬度热带地区, 水平温度梯度很小, 较少产生大规模的缓慢降水过程, 积云对流活动引起的水汽凝结过程是主要降水形式. 不同纬度带不同的降水形式也会使得稳定同位素效应存在差异. 因此, 未来大气水汽稳定同位素效应的研究应在不同纬度带(热带、温带、寒带)、对流层不同高度进行, 以进一步阐明降水和水汽稳定同位素效应的差异.

目前对降水稳定同位素的研究已经相对成熟, 观测站点也遍布全球, 而大气水汽稳定同位素长时间的连续原位观测才开始不久. 大气水汽稳定同位素观测网络的建立保证了高精度、连续实测数据的可获得性, 也使得大范围、长时间序列实测数据与卫星遥感反演数据、同位素大气环流模式模拟数据的结合成为可能. 本研究统计了近10年全球范围时间跨度一年以上的水汽稳定同位素观测站点(图8), 供读者参考. 部分站点的研究成果尚未公布, 本研究将在第7节总结图中观测站点的可用信息.

6　化学过程对大气水汽稳定同位素的可能影响

大气水汽在传输时, 化学过程也可能会导致水汽稳定同位素分馏, 如对流层顶部甲烷(CH_4)的光化学反应会引起水汽稳定同位素分馏, 导致平流层底部的$\delta^{18}O$和δD富集. 此外, 人类活动引起的与大规模土地利用变化相关的区域影响可在降水数据和模型中检测到(Gordon等, 2005; DeAngelis等, 2010; Lo和Famiglietti, 2013), 并且温室气体排放导致的地表蒸散发和城市热岛效应会使城市中心出现湿度异常(Holmer和Eliasson, 1999; Richards, 2005; Fortuniak等, 2006; Gorski等, 2015), 并通过直接和间接作用导致同位素分馏. 因此

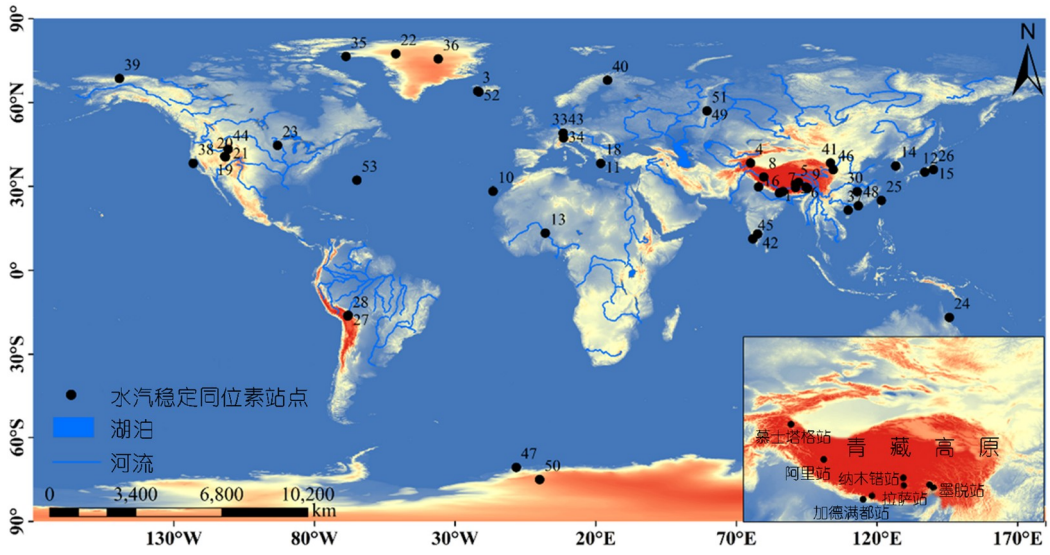


图 8　近10年时间跨度一年以上的水汽稳定同位素连续观测站点分布

水汽稳定同位素在城市气候、生态水文和光化学过程等区域环境变化方面具有广阔应用前景, 如d-excess结合其他示踪物可以区分城市温室气体和其他污染物排放源.

平流层臭氧(O_3)的光化学反应会导致$\delta^{17}O$异常, $\delta^{17}O$异常信号会被传递至平流层水汽, 平流层空气下沉至对流层时, 包含有$\delta^{17}O$异常的水汽会与高纬度对流层水汽混合. 因此, 对流层观测到$\delta^{17}O$异常信号可能是平流层向对流层输送的有效示踪剂. 对流层顶部甲烷(CH_4)的光化学反应过程会导致平流层底部的$\delta^{18}O$和δD富集, 具体过程如下(Eichinger等, 2015a, 2015b):

$$CH_4 + 4O_2 = 2O_3 + H_2O + CO + H_2 \quad (19)$$

除了臭氧和甲烷的光化学反应外, 水汽与温室气体、大气污染物之间的化学反应也可以导致水汽稳定同位素分馏, 如水汽与二氧化碳(CO_2)的反应:

$$C^{16}O_2 + H_2{}^{18}O \rightleftharpoons H_2C^{18}O^{16}O_2 \rightleftharpoons C^{18}O^{16}O + H_2{}^{16}O \quad (20)$$

水汽稳定同位素^{18}O的分馏系数为

$$\alpha^{18}OH_2O\text{-}CO_2 = \frac{\left(\frac{^{18}O}{^{16}O}\right)H_2O}{\left(\frac{^{18}O}{^{16}O}\right)CO_2}. \quad (21)$$

由以上的分析可知, 人类活动排放的温室气体和大气污染物会通过直接和间接作用导致水汽稳定同位素分馏(图9). 直接影响包括水汽与温室气体、大气污染物之间的化学反应, 其会直接导致水汽稳定同位素分馏. 间接影响与温室气体、大气污染物引起的气候变化(更高的温度、相对湿度或极端天气的强度和频率等)有关. 厘清化学过程对水汽稳定同位素的可能影响机制不仅有助于完善稳定同位素分馏理论, 还能使人类活动对水汽稳定同位素的影响得以量化.

7　大气水汽稳定同位素的应用

随着水汽稳定同位素观测技术的进步和理论的完善, 水汽稳定同位素已广泛应用于岩石圈、生物圈、水圈、大气圈和冰冻圈(图10). 本研究将总结、概括水汽稳定同位素在五大圈层的应用, 并重点讨论水汽稳定同位素在干旱区植被水分利用机制和生态系统蒸散发中的潜在应用.

7.1　大气圈

大气水汽稳定同位素在大气圈的应用较为成熟. 本节先整理、总结已有的水汽稳定同位素在边界层过程、水汽来源、极端降水、平流层中的研究, 后概括水汽稳定同位素对季风、热带气旋、季节内震荡(MJO)、ENSO等事件的响应机制.

聚焦于探究气象要素对水汽稳定同位素影响过程的研究表明, 海洋上空的相对湿度和海表温度是d-excess的主要影响因素(Noone等, 2011; Liu等, 2014b;

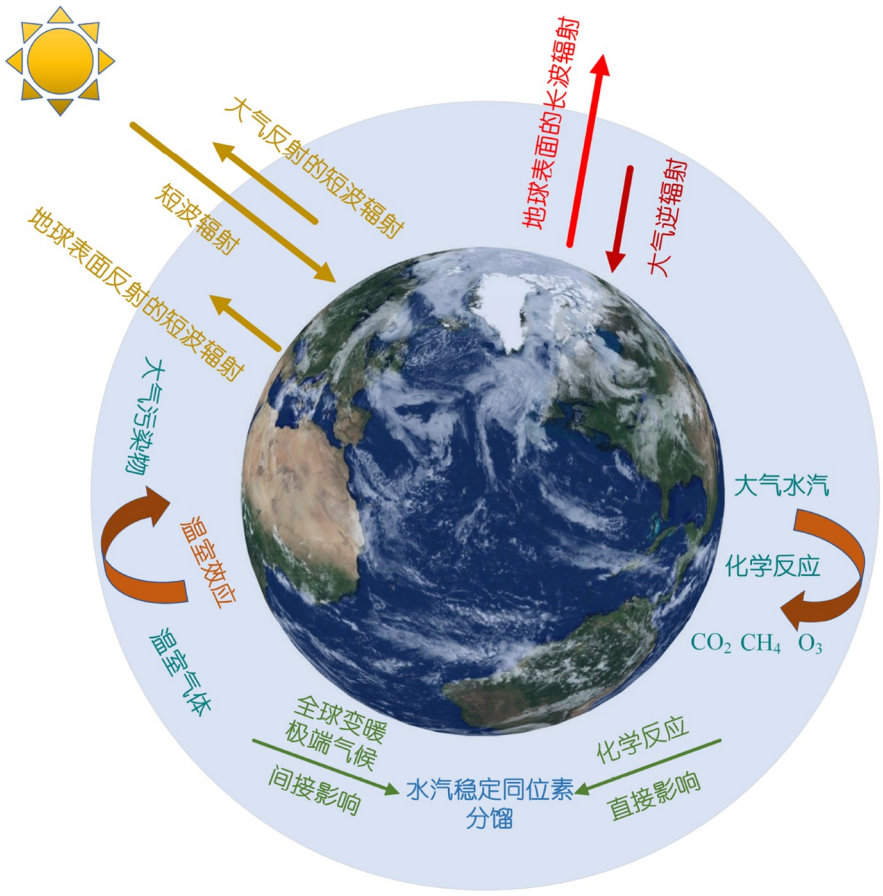


图 9　温室气体、大气污染物对水汽稳定同位素的可能影响

水汽稳定同位素与温室气体、大气污染物的化学反应会直接影响水汽稳定同位素分馏; 温室气体、大气污染物导致的全球变暖、极端降水等间接影响水汽稳定同位素分馏; 人类活动引起的土地利用变化改变了地表反射率, 也会对水汽稳定同位素分馏产生影响

Benetti等, 2014; He和Richards, 2016; Bonne等, 2019), 而风速对d-excess没有影响(Steen-Larsen等, 2014; Bonne等, 2019). 温度对水汽δ^{18}O的影响比降水δ^{18}O更显著(Salamalikis等, 2015). 此外, IASI和TES反演结果表明, 自由对流层中水汽稳定同位素对深对流和浅对流活动都很敏感, 其中深对流活动会使水汽稳定同位素相对贫化(Yu等, 2015; Lacour等, 2018; Lekshmy等, 2018; Yu等, 2020; Wu等, 2022). 云微物理过程、降水事件、生态系统蒸散发和大尺度环流也会对水汽稳定同位素产生影响(Delattre等, 2015; Graf等, 2019; Tsai等, 2019; Vries等, 2022; Torri, 2022; Hu等, 2022). 最值得注意的是, 对流层顶部甲烷的光化学反应会导致平流层底部δD富集(Eichinger等, 2015a, Eichinger等, 2015b). 关注水汽稳定同位素时空变化特征的研究表明, δ^{18}O在冷季较富集(Yao等, 2018), δ^{18}O和δ^{17}O的垂直分布特征随海拔高度变化不显著(Alday等, 2019), 并且对流层顶部水汽沉降时稳定同位素存在明显的垂直梯度(Sodemann等, 2017). 此外, 水汽δ^{18}O和δD的日变化在强降雨事件中较明显, 在季风期间明显较弱(Srivastava等, 2015).

此外, 有研究表明可以使用δD重建过去到现在的大尺度大气传输过程(Vimeux和Risi, 2021). 水汽稳定同位素还可以用于研究水汽来源和水汽传输距离(Zhang, 2021). 虽然模型能够解释水汽传输路径的稳定同位素组成, 但是在大气边界层可能还存在其他水汽来源, 如降水再蒸发水汽、海雾蒸发和冰雪升华等(Dar等, 2020), 这些水汽来源也会改变水汽传输路径的水汽稳定同位素组成.

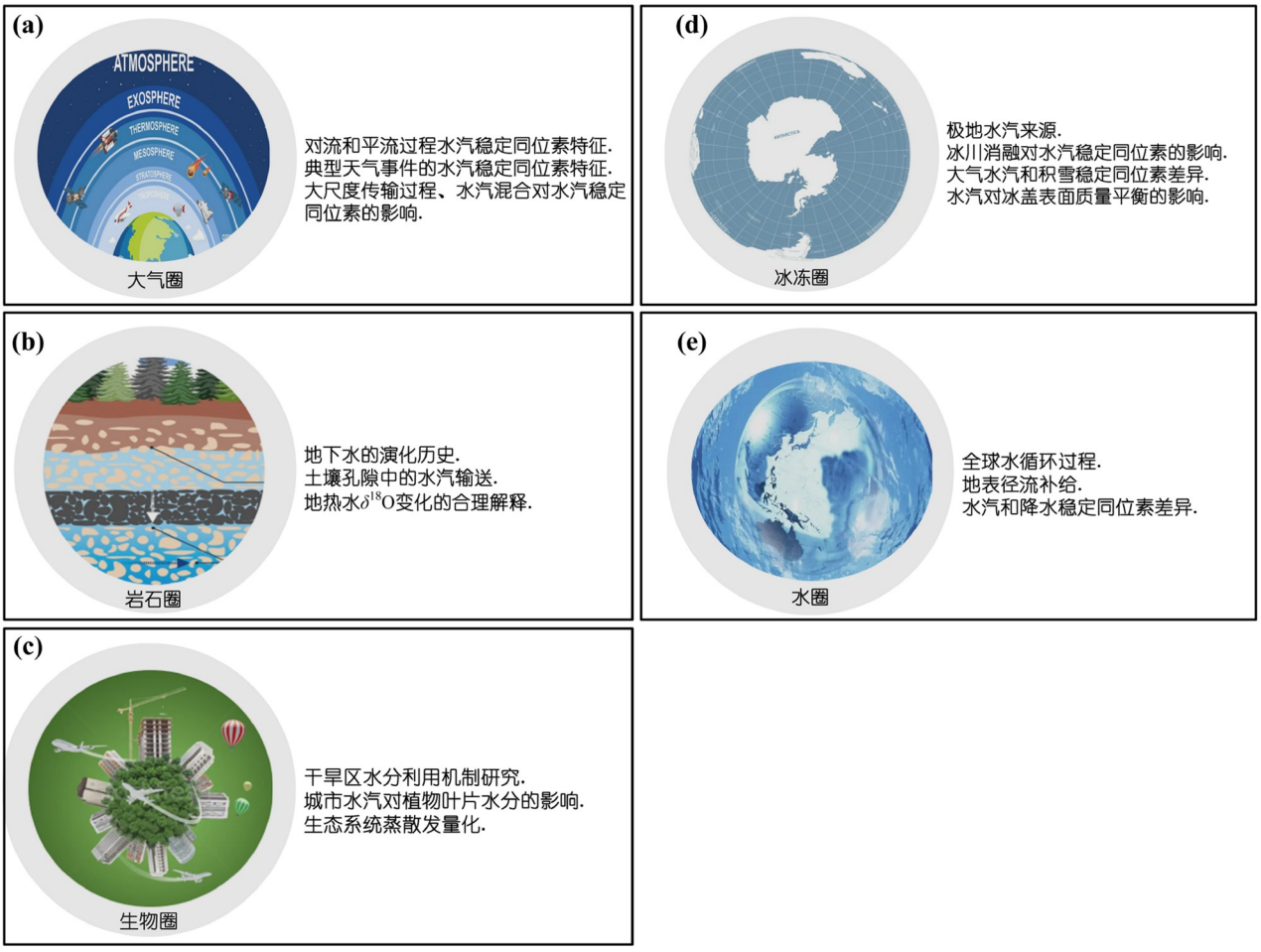


图 10　水汽稳定同位素在五大圈层的应用

(a) 大气圈; (b) 岩石圈; (c) 生物圈; (d) 冰冻圈; (e) 水圈

近年来, 一些学者分析了ENSO事件对水汽稳定同位素组成的影响(图11). 随着降水的减少和对流活动的增强, 低纬度地区的降水和水汽稳定同位素均表现为"V"形的径向变化特征. 在ENSO事件期间, 当对流活动减弱时, δD相对富集, 当对流活动增强时, δD较贫化(Cai和Tian, 2016), 此时进入到平流层的水汽也会增加(Scaife等, 2003; Xie等, 2018). 此外, 水汽稳定同位素δ^{18}O与气候代用指标显著相关, 这种关系表明可以利用气候代用指标重建历史时期的季风活动和ENSO事件(Okazaki等, 2015). Garfinkel等(2021)的研究结果表明对流层和平流层底部对ENSO事件有相同的响应过程, 但是关于ENSO事件对平流层水汽的影响尚未达成一致的结论.

热带气旋(台风和飓风)通过传输、对流活动和混合过程强烈影响降水和水汽稳定同位素组成. 有研究表明热带气旋发生期间降水稳定同位素突然贫化, 并将这种突然贫化归因为高凝结效率(Lawrence等, 2002)和深对流活动(Xu等, 2019). 越来越多的研究通过分析气旋路径沿线降水稳定同位素的变化探究热带气旋的演变过程(Lawrence等, 1998; Klein等, 2015; Sánchez-Murillo等, 2019; Ansari等, 2020; Thurnherr和Aemisegger, 2022). Gedzelman等(2003)的研究结果表明, 热带气旋会产生稳定同位素较贫化的降水. 与降水稳定同位素相比, 只有少数研究分析了热带气旋对水汽稳定同位素的影响, 并且结论不一致(Lawrence等, 2002; Fudeyasu等, 2008). 与热带气旋相比, 极地气旋发生时水汽稳定同位素变化更大(Klein等, 2015). Laskar等(2014)和Wang等(2021)的研究结果表明, 台风期

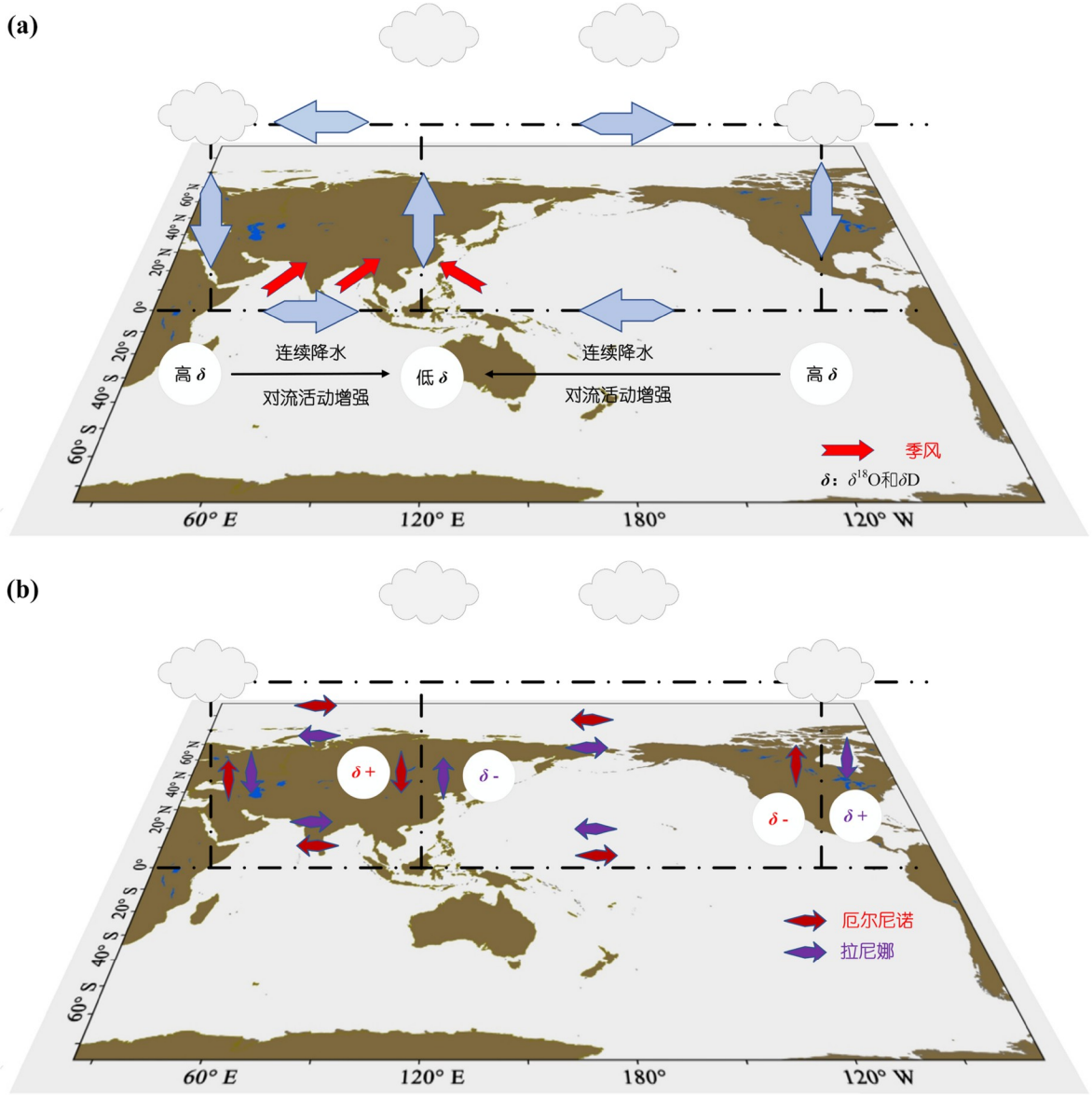


图 11　ENSO事件对水汽稳定同位素的影响

(a) 无ENSO事件时水汽稳定同位素时空分布特征: 赤道东太平洋以下沉气流为主, 总体降水较少, 水汽稳定同位素相对富集, 而赤道西太平洋以上升气流为主, 容易产生降水, 降水使得水汽稳定同位素相对贫化(正常年). (b) ENSO事件发生时, 厄尔尼诺事件抑制赤道西太平洋原有上升气流, 降水较正常年减少, 导致赤道西太平洋地区水汽稳定同位素出现正异常; 同时厄尔尼诺事件会增强赤道东太平洋上升气流, 降水较正常年增加, 导致赤道东太平洋地区水汽稳定同位素出现负异常; 拉尼娜事件对水汽稳定同位素的影响与厄尔尼诺事件相反. 更多详情请参考Cai和Tian(2016)

间降水和水汽稳定同位素值接近, 台风发生前水汽含量较高, δD普遍较富集, 梅雨时期降水和水汽稳定同位素差异明显.

季节内震荡(MJO)通过与季风活动、ENSO、热带气旋的相互作用对水文循环产生深远影响. 有很多研究探索了MJO的垂直湿热力学结构(Kiladis等, 2005; Tian等, 2006; Benedict和Randall, 2007; Jiang等, 2009). 由于水汽和降水稳定同位素值在气团运移和凝结过程中存在差异, 因此可以使用水汽稳定同位素描述MJO事件的水文过程. 在强对流期间, MJO事件发

生区域的HDO/H_2O比值会显著下降, 且MJO事件发生前、后降雨类型不同, 对流和层状过程的水汽稳定同位素变化机制差异较大(Kurita等, 2011). 大气水汽稳定同位素的应用可为同位素大气环流模式(iGCMs)参数化MJO提供科学指导.

7.2 冰冻圈

青藏高原是高寒高海拔气候条件下形成的独立陆地生态系统, 也是全球重要的碳汇和氮汇. 独特的地理区位, 使青藏高原成为水汽稳定同位素研究热点地区. 水汽稳定同位素在青藏高原的应用主要集中在两部分, 一是探究水汽稳定同位素的影响因素, 如局地气温、相对湿度、季风期的降水、水汽传输量和边界层高度对水汽稳定同位素的日变化和空间变化的影响(Li等, 2016; Tian等, 2020; Dai等, 2021); 二是使用冰芯稳定同位素探究历史时期生态系统生产力(Luz等, 1999), 追踪水汽源区和地下水补给源(Yang和Wang, 2020).

除青藏高原外, 南北极也是水汽稳定同位素研究热点地区. 有研究表明相对湿度是^{17}O-excess的决定性因素, 因此可以使用^{17}O-excess探究水汽源区的环境湿度(Landais等, 2012; Winkler等, 2012), 并且^{17}O-excess对陆地温度较为敏感, 冰期和间冰期^{17}O-excess显著地从低值变为高值(Landais等, 2008). 此外, 雪面和周围环境的水汽交换、边界层的动态变化、与大尺度对流相关的水汽通量变化均会对水汽稳定同位素产生影响(Steen-Larsen等, 2013, 2015). 有研究表明海冰面积的微小变化可以使水汽源区的d-excess从正值变为负值(Klein和Welker, 2016), 并且d-excess的减小可能是海冰面积变化引起的, 而不是之前所说的水汽源区和大气环流强度的改变(Steffensen等, 2008). 在海冰覆盖区域, 如果不考虑积雪的升华作用, 同位素大气环流模式模拟结果与实测结果相差较大, 如果考虑积雪的升华, 模拟结果与实测数据接近(Bonne等, 2019).

由以上分析可知, 在使用冰芯和石笋d-excess恢复古气候时, 要将d-excess作为相对湿度和海水表面温度的综合指标, 并且在有海冰存在的区域, 须考虑升华过程对水汽稳定同位素的影响. 此外, 积雪升华、融水再蒸发、水汽传输量、海冰面积和温度均会对水汽稳定同位素产生影响, 并且温度对水汽稳定同位素的影响可能会被对流活动掩盖(Casado等, 2016; Akers等, 2020; Sigmund等, 2023; Cauquoin等, 2023). 地表蒸发对近地表水汽δD有强烈的影响, 融水的蒸发会增加剩余融水的δD值, 再结晶过程则会增加积雪的δD值. 如果忽略蒸发分馏, 水体稳定同位素在古温度、古地形等方面的研究会增加不确定性(Christner等, 2017).

7.3 岩石圈

氧(O)是地壳中较为丰富的元素之一, 地壳中各类岩石的^{18}O丰度存在差异, 氢(H)在地壳中的丰度较低, 仅存在于几种造岩矿物中. 与^{18}O不同, D(^{2}H)在岩石、矿物中丰度较低, 在水中较为富集. 通常情况下, 地下水的δ^{18}O、δD组成与气象要素密切相关, 地下基岩的δ^{18}O、δD组成与地质环境密切相关. 但是在地质时期或者高温条件下, 地下水汽与含水层基质、地下气体的反应或碳酸钙溶解和沉淀过程中水汽与角闪石间δ^{18}O的交换($CaCO_2{}^{18}O+H_2O \leftrightarrow CaCO_3+H_2{}^{18}O$), 均会改变地下水$\delta^{18}$O、$\delta$D的组成. 因此, 地下水稳定同位素的组成可以反应地下水的演化历史和相应的地球化学过程(Yang等, 2023).

一般来说, 当土壤水分饱和时, 土壤空隙中充满液态水, 土壤水汽含量较低. 在非饱和状态下, 由于蒸发作用, 部分土壤孔隙会被水汽填充, 该过程会引起土壤水汽稳定同位素分馏. 因此, 可以利用土壤孔隙中水汽稳定同位素分馏过程评估土壤蒸发对区域蒸散的贡献, 以及阐明干旱区作物和短命植物对土壤水分的吸收和利用机制.

7.4 水圈

过去几十年降水稳定同位素的研究已经取得了丰硕成果, 但是降水稳定同位素不是本研究的谈论主题, 有关降水稳定同位素的更多细节请查阅Jasechko (2019)的文献. 本研究将以生态系统中的水循环为例讨论水汽稳定同位素在水圈中的应用.

Keeling(1958)构建了碳同位素变化与大气二氧化碳浓度倒数之间的响应方程, 即Keeling曲线:

$$\delta^{13}\mathrm{C} = I(^{13}\mathrm{C}) + M\left(1/\mu\mathrm{CO}_2\right), \tag{22}$$

式中, δ^{13}C为大气二氧化碳同位素组成, $I(^{13}$C)为输入源的同位素组成, M为响应系数, μCO_2为大气二氧化碳浓度.

Keeling曲线的核心是生态系统的物质平衡原理,

它将大气中稳定同位素与大气中二氧化碳浓度和水汽浓度结合起来, 构建稳定同位素与气体浓度的关系. 由式(22)可以看出, 该方程的截距即为生态系统呼吸释放的二氧化碳或者蒸散水汽的同位素组成. 土壤蒸发往往伴随着明显的水汽稳定同位素分馏, 而植物中水分运移过程不会发生稳定同位素分馏现象, 因此发生分馏现象的土壤水汽与未发生分馏现象的植物蒸腾水汽的稳定同位素组成存在明显差异. 此外, 土壤水汽和植被蒸腾水汽是大气水汽的重要组成部分, 它们的混合过程会显著改变大气水汽稳定同位素组成, 这将导致大气水汽、土壤蒸发水汽和植被蒸腾水汽的稳定同位素组成具有显著差异.

Keeling曲线法与微气象学相结合, 可以区分光合作用和呼吸作用对整个生态系统碳通量的贡献, 以及土壤蒸发和植被蒸腾占生态系统蒸散发的相对比例. Keeling曲线法认为相邻边界层大气水汽浓度是大气本底水汽浓度和外源水汽浓度之和(物质平衡), 该关系可表示为

$$\mathrm{H_2O_{total}}=\mathrm{H_2O_{background}}+\mathrm{H_2O_{addition}}, \tag{23}$$

式中, $\mathrm{H_2O_{total}}$为大气总的水汽浓度, $\mathrm{H_2O_{background}}$为大气本底水汽浓度, $\mathrm{H_2O_{addition}}$为外源增加的水汽浓度. 将式(22)各组分分别乘以对应的δ^{18}O值, 即可得到水汽稳定同位素δ^{18}O的质量平衡方程:

$$\delta^{18}\mathrm{O_{total}}\times\mathrm{H_2O_{total}}=\delta^{18}\mathrm{O_{background}}\times\mathrm{H_2O_{background}}+\delta^{18}\mathrm{O_{addition}}\times\mathrm{H_2O_{addition}}, \tag{24}$$

式中, $\delta^{18}\mathrm{O_{total}}$为大气总水汽的同位素组成, $\delta^{18}\mathrm{O_{background}}$大气本底水汽的同位素组成, $\delta^{18}\mathrm{O_{addition}}$为外源增加水汽的同位素组成.

将式(23)和(24)合并后可得:

$$\delta^{18}\mathrm{O_{total}}=\mathrm{H_2O_{background}}\left(\delta^{18}\mathrm{O_{background}}-\delta^{18}\mathrm{O_{addition}}\right)\times\left(1/\mathrm{H_2O_{total}}\right)+\delta^{18}\mathrm{O_{addition}}. \tag{25}$$

从上式不难发现, Keeling曲线的截距即为外源增加水汽的同位素组成. 如果已经观测了某一生态系统中净水汽通量F_{total}, 并通过取样获得了土壤蒸发水汽的同位素组成$\delta^{18}\mathrm{O_{soil}}$和植被蒸腾水汽同位素组成$\delta^{18}\mathrm{O_{plant}}$. 结合Keeling曲线就可求得该生态系统中土壤蒸发水汽通量F_{soil}和植被蒸腾水汽通量F_{plant}:

$$F_{\mathrm{total}}=F_{\mathrm{soil}}+F_{\mathrm{plant}}, \tag{26}$$

$$\delta^{18}\mathrm{O_{total}}\times F_{\mathrm{total}}=\delta^{18}\mathrm{O_{soil}}\times F_{\mathrm{soil}}+\delta^{18}\mathrm{O_{plant}}\times F_{\mathrm{plant}}. \tag{27}$$

由式(26)和(27)可得:

$$F_{\mathrm{soil}}=F_{\mathrm{total}}\times\left(d^{18}\mathrm{O_{total}}-\delta^{18}\mathrm{O_{plant}}\right)/\left(\delta^{18}\mathrm{O_{soil}}-\delta^{18}\mathrm{O_{plant}}\right), \tag{28}$$

$$F_{\mathrm{plant}}=F_{\mathrm{total}}\times\left(\delta^{18}\mathrm{O_{total}}-\delta^{18}\mathrm{O_{soil}}\right)/\left(\delta^{18}\mathrm{O_{plant}}-\delta^{18}\mathrm{O_{soil}}\right). \tag{29}$$

基于以上分析可知, 可以利用水汽稳定同位素准确估算区域或全球蒸散量, 并评估土壤蒸发和植被蒸腾对区域或全球水循环的贡献. 此外, 区域或全球的再循环过程也可以使用水汽稳定同位素进行定量分析.

7.5　生物圈

同位素标记和示踪技术在生态学中的应用较为广泛, 比如使用C、N同位素分析生态系统内物质循环、能量流动过程. 也有不少学者使用水稳定同位素δ^{18}O探究植物水分利用来源. 本节仅讨论已有的水汽稳定同位素在生物圈的应用.

水汽稳定同位素被用于探究植物叶片和树干中氧同位素的变化特征(Li等, 2017; Magh等, 2022; McInerney等, 2023), 植物叶片内部水分的运输和调节机制(Barbour, 2017; Cernusak等, 2022), 以及植被冠层的水分来源. 部分研究分析水汽交换和吸收对C_3植物和CAM植物的影响, 并发现C_3植物和CAM植物叶片水δ^{18}O在雨季更为贫化(Mejia-Chang等, 2021). 此外, 有研究表明水汽稳定同位素δ^{18}O会对植物叶片水、植物同化物中δ^{18}O产生影响, 对植物叶片水δ^{18}O影响更显著(Lehmann等, 2018), 且韧皮部运输和生物合成过程中同位素分馏会对同位素比率产生影响(Studer等, 2015).

水汽稳定同位素在生物圈中的应用虽然处于发展初期, 但是已经取得了一系列重要成果. 未来, 应继续加强水汽稳定同位素在植物生理学、生态系统生态学等领域的研究.

8　挑战与机遇

与同位素大气环流模式(iGCMs)和卫星遥感产品相比, 近地表大气水汽稳定同位素的观测可能更易于

受到下垫面条件的影响, 因此需要思考如何合理地将这三种方法结合起来. 尽管有许多研究使用飞行器和浮空艇在高海拔地区开展了水汽稳定同位素垂直观测(Khaykin等, 2016; Sodemann等, 2017; Evan等, 2020; Kalnajs等, 2021), 但是水汽稳定同位素垂直分布特征的研究仍然是该领域的薄弱环节.

水汽稳定同位素的二阶变量(d-excess和^{17}O-excess)具有较强的应用潜力. 理论分析表明, d-excess和^{17}O-excess也可以反映δD、δ^{18}O和δ^{17}O所包含的信息. 此外, d-excess和^{17}O-excess对温度的敏感性较低, 其受水汽传输过程中平衡冷凝温度的影响较小. 因此, d-excess和^{17}O-excess能更准确地追踪水汽源区和研究水循环特征. 然而, 目前关于大气水汽中d-excess、δ^{17}O和^{17}O-excess的研究相对较少. 未来, 应当加强水汽稳定同位素二阶变量的研究, 以进一步发挥其应用潜力.

温室气体的光化学反应过程会对水汽稳定同位素产生显著影响, 如对流层顶甲烷的光化学反应产生水汽, 使平流层底部的δ^{18}O和δD富集. 温室气体和大气污染物也可以通过间接作用导致水汽稳定同位素分馏, 例如二氧化碳(CO_2)和氮氧化物(N_2O)可以吸收地表长波辐射, 通过大气逆辐射使地表升温, 增强地表蒸散发, 从而导致水汽稳定同位素分馏. 目前, 化学过程对水汽稳定同位素影响的研究相对较少, 特别是对流层化学过程与水汽稳定同位素之间的关联尚不清楚. 未来, 应当加强探索化学过程对水汽稳定同位素影响的研究, 这不仅能够进一步完善水汽稳定同位素分馏理论, 还能在水汽稳定同位素与温室气体、大气污染物之间建立联系, 将水汽稳定同位素应用到污染物溯源等领域.

虽然同位素大气环流模式(iGCMs)在表征水汽稳定同位素动力学方面具有独特优势, 但是由于其空间分辨率较低, 在流域尺度存在局限性. 此外, 由于初始和边界条件、参数优化方案和特征变量的不同, 不同iGCMs模式的模拟结果会有较大差异. 机器学习方法的潜力已经在遥感解译和数据挖掘等领域得到了证明, 其对海量数据的学习能力和较强的特征抽取能力可对改进iGCMs模式提供参考. 未来, 应当发展具有可解释性的机器学习模型, 用于流域尺度水汽稳定同位素的模拟, 同时将机器学习模型和iGCMs相结合, 开展更科学、合理的水汽稳定同位素相关研究.

此外, 可以利用土壤孔隙中水汽稳定同位素探究干旱区农作物、短命植物的水分利用机制. 当土壤含水量较高时, 土壤孔隙水汽对植物生长的影响相对较小, 通常可以忽略. 然而, 在干旱地区, 土壤孔隙水汽在植物供水方面起着重要作用. 因此, 土壤孔隙水汽稳定同位素在评估土壤蒸发对区域蒸散的贡献, 以及阐明干旱区作物和短命植物对土壤水分的吸收和利用机制方面具有巨大的潜力. 以前无法准确测量土壤孔隙中水汽稳定同位素是开展相关研究的主要障碍之一, Havranek等(2020)开发的观测系统可以克服该困难.

总之, 水汽稳定同位素的基础理论还在不断完善, 未来应当考虑化学过程, 如温室气体(CO_2、CH_4)和大气污染物(O_3、NH_3)对水汽稳定同位素的可能影响, 并重点探究d-excess、δ^{17}O和^{17}O-excess的潜在应用. 此外, 我们亟待找到合适的方法将地面观测、卫星遥感和iGCMs整合起来, 从而能够系统地开展水汽稳定同位素相关研究. 最后, 我们认为利用水汽稳定同位素阐明荒漠植物对土壤水分的吸收和利用机制具有重要意义.

致谢 感谢审稿人对本文提出的宝贵意见与建议.

参考文献

胡月, 刘国东, 孟玉川, 张文江, 夏成城. 2019. 成都次降水稳定氢氧同位素特征及水汽来源分析. 环境科学, 40: 1179–1187

黄一民. 2013. 洞庭湖流域水循环中稳定同位素的变化特征及其影响机制研究. 博士学位论文. 长沙: 湖南师范大学. 1–115

柳景峰, 丁明虎, 效存德. 2015. 大气水汽氢氧同位素观测研究进展—理论基础、观测方法和模拟. 地理科学进展, 34: 340–353

刘熙. 2019. 硅酸盐和碳酸盐矿物碳、氧同位素组成的非常规分析方法研究. 博士学位论文. 北京: 中国科学院大学. 1–160

刘宇佳, 满文敏, 周天军, 彭冬冬. 2023. 中国东部地区大气水汽稳定同位素的影响因子追踪研究. 大气科学, 47: 616–630

石梦雨, 王圣杰, 姚俊强, 王高飞, 张明军. 2018. 基于GCM的乌鲁木齐水汽稳定同位素变化特征及其与ENSO的关系. 干旱气象, 36: 895–904

史晓宜. 2020. 青藏高原南部降水稳定同位素影响机理及其模拟研究. 博士学位论文. 兰州: 兰州大学. 1–105

史晓宜, 蒲焘, 何元庆, 陆浩, 牛贺文, 夏敦胜. 2016. 典型温冰川区湖泊的稳定同位素空间分布特征. 环境科学, 37: 1685–1691

宋献方, 柳鉴容, 孙晓敏, 袁国富, 刘鑫, 王仕琴, 侯士彬. 2007. 基于CERN的中国大气降水同位素观测网络. 地球科学进展, 22: 738–747

王学界. 2018. 全球降水中稳定同位素GCM的模拟和比较. 硕士学位论文. 长沙: 湖南师范大学. 1–68

杨言. 2020. 上海地区大气水汽及降水氢氧同位素特征及其环境意义. 硕士学位论文. 上海: 华东师范大学. 1–59

余秀秀. 2019. 基于LMDZiso模式的西北干旱区夏半年再循环水汽贡献率时空特征及影响因素分析. 硕士学位论文. 兰州: 西北师范大学. 1–61

章新平, 关华德, 张新主, 贺新光, 张婉君, 王学界, 姚天次. 2016. 不同模式模拟的降水稳定同位素效应的比较和评估. 第四纪研究, 36: 1343–1357

章新平, 张新主, 关华德, 黄一民, 吴华武. 2012. 由TES反演的大气水汽中δD的时空分布特征. 气象学报, 70: 1367–1380

章新平, 中尾正义, 藤田耕史, 姚檀栋, 韩健康. 2001. 喜马拉雅山郎塘流域降水中δ^{18}O的变化. 中国科学D辑: 地球科学, 3: 206–213

Akers P D, Kopec B G, Mattingly K S, Klein E S, Causey D, Welker J M. 2020. Baffin Bay sea ice extent and synoptic moisture transport drive water vapor isotope (δ^{18}O, δ^{2}H, and deuterium excess) variability in coastal northwest Greenland. Atmos Chem Phys, 20: 13929–13955

Akers P D, Welker J M, Brook G A. 2017. Reassessing the role of temperature in precipitation oxygen isotopes across the eastern and central United States through weekly precipitation-day data. Water Resour Res, 53: 7644–7661

Alday J, Wilson C F, Irwin P G J, Olsen K S, Baggio L, Montmessin F, Trokhimovskiy A, Korablev O, Fedorova A A, Belyaev D A, Grigoriev A, Patrakeev A, Shakun A. 2019. Oxygen isotopic ratios in Martian water vapour observed by ACS MIR on board the ExoMars Trace Gas Orbiter. Astron Astrophys, 630: A91

Angert A, Lee J E, Yakir D. 2008. Seasonal variations in the isotopic composition of near-surface water vapour in the eastern Mediterranean. Tellus B-Chem Phys Meteor, 60: 674–684

Ansari M A, Noble J, Deodhar A, Mendhekar G N, Jahan D. 2020. Stable isotopic (δ^{18}O and δ^{2}H) and geospatial approach for evaluating extreme rainfall events. Glob Planet Change, 194: 103299

Barbour M M. 2017. Understanding regulation of leaf internal carbon and water transport using online stable isotope techniques. New Phytol, 213: 83–88

Bao H, Lyons J R, Zhou C. 2008. Triple oxygen isotope evidence for elevated CO_2 levels after a Neoproterozoic glaciation. Nature, 453: 504–506

Barkan E, Luz B. 2007. Diffusivity fractionations of HO/HO and HO/HO in air and their implications for isotope hydrology. Rapid Comm Mass Spectrom, 21: 2999–3005

Benedict J J, Randall D A. 2007. Observed characteristics of the MJO relative to maximum rainfall. J Atmos Sci, 64: 2332–2354

Benetti M, Reverdin G, Pierre C, Merlivat L, Risi C, Steen-Larsen H C, Vimeux F. 2014. Deuterium excess in marine water vapor: Dependency on relative humidity and surface wind speed during evaporation. J Geophys Res-Atmos, 119: 584–593

Bonne J L, Behrens M, Meyer H, Kipfstuhl S, Rabe B, Schönicke L, Steen-Larsen H C, Werner M. 2019. Resolving the controls of water vapour isotopes in the Atlantic sector. Nat Commun, 10: 1632

Bonne J L, Masson-Delmotte V, Cattani O, Delmotte M, Risi C, Sodemann H, Steen-Larsen H C. 2014. The isotopic composition of water vapour and precipitation in Ivittuut, southern Greenland. Atmos Chem Phys, 14: 4419–4439

Bony S, Risi C, Vimeux F. 2008. Influence of convective processes on the isotopic composition (δ^{18}O and δD) of precipitation and water vapor in the tropics: 1. Radiative-convective equilibrium and Tropical Ocean-Global Atmosphere-Coupled Ocean-Atmosphere Response Experiment (TOGA-COARE) simulations. J Geophys Res, 113: D19305

Cai Z, Tian L. 2016. Processes governing water vapor isotope composition in the Indo-Pacific region: Convection and water vapor transport. J Clim, 29: 8535–8546

Casado M, Landais A, Masson-Delmotte V, Genthon C, Kerstel E, Kassi S, Arnaud L, Picard G, Prie F, Cattani O, Steen-Larsen H C, Vignon E, Cermak P. 2016. Continuous measurements of isotopic composition of water vapour on the East Antarctic Plateau. Atmos Chem Phys, 16: 8521–8538

Carroll R W H, Deems J, Sprenger M, Maxwell R, Brown W, Newman A, Beutler C, Williams K H. 2022. Modeling snow dynamics and stable water isotopes across mountain landscapes. Geophys Res Lett, 49: e2022GL098780

Cao X, Bao H. 2013. Dynamic model constraints on oxygen-17 depletion in atmospheric O_2 after a snowball Earth. Proc Natl Acad Sci USA, 110: 14546–14550

Cauquoin A, Abe-Ouchi A, Obase T, Chan W L, Paul A, Werner M. 2023. Effects of Last Glacial Maximum (LGM) sea surface temperature and sea ice extent on the isotope-temperature slope at polar ice core sites. Clim Past, 19: 1275–1294

Cernusak L A, Barbeta A, Bush R T, Bögelein, R E, Ferrio J P, Flanagan L B., Gessler A, Martín-Gómez P, Hirl R T, Kahmen A, Keitel C, Lai C T, Munksgaard N C, Nelson D B, Ogée J, Roden J S, Schnyder H, Voelker S L, Wang L X, Stuart-Williams H, Wingate L, Yu W S, Zhao L J, Cuntz M. 2022. Do ^{2}H and ^{18}O in leaf water reflect environmental drivers differently? New Phytol, 235: 41–51

Christner E, Aemisegger F, Pfahl S, Werner M, Cauquoin A, Schneider M, Hase F, Barthlott S, Schädler G. 2018. The Climatological Impacts of Continental Surface Evaporation, Rainout, and Subcloud Processes on δD of Water Vapor and Precipitation in Europe. J

Geophys Res-Atmos, 123: 4390–4409
Christner E, Kohler M, Schneider M. 2017. The influence of snow sublimation and meltwater evaporation on δD of water vapor in the atmospheric boundary layer of central Europe. Atmos Chem Phys, 17: 1207–1225
Clayton R N, Grossman L, Mayeda T K. 1973. A component of primitive nuclear composition in carbonaceous meteorites. Science, 182: 485–488
Conroy J L, Cobb K M, Noone D. 2013. Comparison of precipitation isotope variability across the tropical Pacific in observations and SWING2 model simulations. J Geophys Res-Atmos, 118: 5867–5892
Craig H. 1961. Isotopic variations in meteoric waters. Science, 133: 1702–1703
Crockford P W, Hayles J A, Bao H, Planavsky N J, Bekker A, Fralick P W, Halverson G P, Bui T H, Peng Y, Wing B A. 2018. Triple oxygen isotope evidence for limited mid-Proterozoic primary productivity. Nature, 559: 613–616
Dai D, Gao J, Steen-Larsen H C, Yao T, Ma Y, Zhu M, Li S. 2021. Continuous monitoring of the isotopic composition of surface water vapor at Lhasa, southern Tibetan Plateau. Atmos Res, 264: 105827
Dansgaard W. 1964. Stable isotopes in precipitation. Tellus Ser A-Dyn Meteorol Oceanogr, 169: 436–468
Dar S S, Ghosh P, Swaraj A, Kumar A. 2020. Craig-Gordon model validation using stable isotope ratios in water vapor over the Southern Ocean. Atmos Chem Phys, 20: 11435–11449
Dee S, Noone D, Buenning N, Emile-Geay J, Zhou Y. 2015. SPEEDY-IER: A fast atmospheric GCM with water isotope physics. J Geophys Res-Atmos, 120: 73–91
Du J, Liu J, Zhang M. 2022. Monsoon fringe area moisture transportation revealed by water stable isotopes: A Lanzhou river valley case study. Front Environ Sci, 10: 843948
Delattre H, Vallet-Coulomb C, Sonzogni C. 2015. Deuterium excess in the atmospheric water vapour of a Mediterranean coastal wetland: Regional vs. local signatures. Atmos Chem Phys, 15: 10167–10181
DeAngelis A, Dominguez F, Fan Y, Robock A, Kustu M D, Robinson D. 2010. Evidence of enhanced precipitation due to irrigation over the Great Plains of the United States. J Geophys Res, 115: D15115
Eichinger R, Jöckel P, Lossow S. 2015b. Simulation of the isotopic composition of stratospheric water vapour – Part 2: Investigation of HDO/H_2O variations. Atmos Chem Phys, 15: 7003–7015
Eichinger R, Jöckel P, Brinkop S, Werner M, Lossow S. 2015a. Simulation of the isotopic composition of stratospheric water vapour – Part 1: Description and evaluation of the EMAC model. Atmos Chem Phys, 15: 5537–5555
Evan S, Brioude J, Rosenlof K, Davis S M, Vömel H, Héron D, Posny F, Metzger J M, Duflot V, Payen G, Vérèmes H, Keckhut P, Cammas J P. 2020. Effect of deep convection on the tropical tropopause layer composition over the southwest Indian Ocean during austral summer. Atmos Chem Phys, 20: 10565–10586
Evans R E, Bhaskar M K, Sukachev D D, Nguyen C T, Sipahigil A, Burek M J, Machielse B, Zhang G H, Zibrov A S, Bielejec E, Park H, Lončar M, Lukin M D. 2018. Photon-mediated interactions between quantum emitters in a diamond nanocavity. Science, 362: 662–665
Fortuniak K, Kłysik K, Wibig J. 2006. Urban-rural contrasts of meteorological parameters in Łódź. Theor Appl Climatol, 84: 91–101
Fiorella R P, West J B, Bowen G J. 2019. Biased estimates of the isotope ratios of steady-state evaporation from the assumption of equilibrium between vapour and precipitation. Hydrolog Process, 33: 2576–2590
Fischer M J, Sturm K. 2006. REMOiso forcing for the iPILPS Phase 1 experiments and the performance of REMOiso in three domains. Glob Planet Change, 51: 73–89
Frankenberg C, Yoshimura K, Warneke T, Aben I, Butz A, Deutscher N, Griffith D, Hase F, Notholt J, Schneider M, Schrijver H, Röckmann T. 2009. Dynamic processes governing lower-tropospheric HDO/H_2 O ratios as observed from space and ground. Science, 325: 1374–1377
Fudeyasu H, Ichiyanagi K, Sugimoto A, Yoshimura K, Ueta A, Yamanaka M D, Ozawa K. 2008. Isotope ratios of precipitation and water vapor observed in Typhoon Shanshan. J Geophys Res, 113: D12113
Ganguly A, Padhya V, Oza H, Strauch G, Deshpande R D. 2023. New insights into diffusive kinetic fractionation during liquid condensation under supersaturated environment: An alternative approach for isotope tagging of ground-level water vapour. Isotopes Environ Health Stud, 59: 1–26
Galewsky J. 2015. Constraining supersaturation and transport processes in a South American cold-air outbreak using stable isotopologues of water vapor. J Atmos Sci, 72: 2055–2069
Galewsky J, Rabanus D. 2016. A stochastic model for diagnosing subtropical humidity dynamics with stable isotopologues of water vapor. J Atmos Sci, 73: 1741–1753
Galewsky J, Steen-Larsen H C, Field R D, Worden J, Risi C, Schneider M. 2016. Stable isotopes in atmospheric water vapor and applications to the hydrologic cycle. Rev Geophys, 54: 809–865
Garfinkel C I, Harari O, Ziskin Ziv S, Rao J, Morgenstern O, Zeng G, Tilmes S, Kinnison D, O′Connor F M, Butchart N, Deushi M, Jöckel P, Pozzer A, Davis S. 2021. Influence of the El Niño-Southern Oscillation on entry stratospheric water vapor in coupled chemistry-

ocean CCMI and CMIP6 models. Atmos Chem Phys, 21: 3725–3740

Gat J R. 1996. Oxygen and hydrogen isotopes in the hydrologic cycle. Annu Rev Earth Planet Sci, 24: 225–262

Gat J R, Bowser C J, Kendall C. 2013. The contribution of evaporation from the Great Lakes to the continental atmosphere: Estimate based on stable isotope data. Geophys Res Lett, 21: 557–560

García O E, Sepúlveda E, Schneider M, Hase F, August T, Blumenstock T, Kühl S, Munro R, Gómez-Peláez Á J, Hultberg T, Redondas A, Barthlott S, Wiegele A, González Y, Sanromá E. 2016. Consistency and quality assessment of the Metop-A/IASI and Metop-B/IASI operational trace gas products (O_3, CO, N_2O, CH_4, and CO_2) in the subtropical North Atlantic. Atmos Meas Tech, 9: 2315–2333

Gedzelman S, Lawrence J, Gamache J, Black M, Hindman E, Black R, Dunion J, Willoughby H, Zhang X. 2003. Probing hurricanes with stable isotopes of rain and water vapor. Mon Wea Rev, 131: 1112–1127

Wang G, Lan H, Liu Z. 2021. Stable isotope record of super typhoon Lekima (2019). Atmos Res, 264: 105822

Gorski G, Strong C, Good S P, Bares R, Ehleringer J R, Bowen G J. 2015. Vapor hydrogen and oxygen isotopes reflect water of combustion in the urban atmosphere. Proc Natl Acad Sci USA, 112: 3247–3252

Gordon L J, Steffen W, Jönsson B F, Folke C, Falkenmark M, Johannessen Å. 2005. Human modification of global water vapor flows from the land surface. Proc Natl Acad Sci USA, 102: 7612–7617

Graf P, Wernli H, Pfahl S, Sodemann H. 2019. A new interpretative framework for below-cloud effects on stable water isotopes in vapour and rain. Atmos Chem Phys, 19: 747–765

Gryazin V, Risi C, Jouzel J, Kurita N, Worden J, Frankenberg C, Bastrikov V, Gribanov K, Stukova O. 2014. To what extent could water isotopic measurements help us understand model biases in the water cycle over Western Siberia. Atmos Chem Phys, 14: 9807–9830

Guan H, Zhang X, Skrzypek G, Sun Z, Xu X. 2013. Deuterium excess variations of rainfall events in a coastal area of South Australia and its relationship with synoptic weather systems and atmospheric moisture sources. J Geophys Res-Atmos, 118: 1123–1138

Gunson M R, Abbas M M, Abrams M C, Allen M, Brown L R, Brown T L, Chang A Y, Goldman A, Irion F W, Lowes L L, Mahieu E, Manney G L, Michelsen H A, Newchurch M J, Rinsland C P, Salawitch R J, Stiller G P, Toon G C, Yung Y L, Zander R. 1996. The Atmospheric Trace Molecule Spectroscopy (ATMOS) Experiment: Deployment on the ATLAS space shuttle missions. Geophys Res Lett, 23: 2333–2336

Han L, Gröning M, Aggarwal P, Helliker B R. 2006. Reliable determination of oxygen and hydrogen isotope ratios in atmospheric water vapour adsorbed on 3A molecular sieve. Rapid Comm Mass Spectr, 20: 3612–3618

Havranek R E, Snell K E, Davidheiser-Kroll B, Bowen G J, Vaughn B. 2020. The Soil Water Isotope Storage System (SWISS): An integrated soil water vapor sampling and multiport storage system for stable isotope geochemistry. Rapid Comm Mass Spectr, 34: e8783

He H, Smith R B. 1999. Stable isotope composition of water vapor in the atmospheric boundary layer above the forests of New England. J Geophys Res, 104: 11657–11673

He S, Richards K. 2016. Stable isotopes in monsoon precipitation and water vapour in Nagqu, Tibet, and their implications for monsoon moisture. J Hydrol, 540: 615–622

Hoffmann G, Werner M, Heimann M. 1998. Water isotope module of the ECHAM atmospheric general circulation model: A study on timescales from days to several years. J Geophys Res, 103: 16871–16896

Holmer B, Eliasson I. 1999. Urban-rural vapour pressure differences and their role in the development of urban heat islands. Int J Clim, 19: 989–1009

Hourdin F, Musat I, Bony S, Braconnot P, Codron F, Dufresne J L, Fairhead L, Filiberti M A, Friedlingstein P, Grandpeix J Y, Krinner G, LeVan P, Li Z X, Lott F. 2006. The LMDZ4 general circulation model: Climate performance and sensitivity to parametrized physics with emphasis on tropical convection. Clim Dyn, 27: 787–813

Holl G, Walker K A, Conway S, Saitoh N, Boone C D, Strong K, Drummond J R. 2016. Methane cross-validation between three Fourier transform spectrometers: SCISAT ACE-FTS, GOSAT TANSO-FTS, and ground-based FTS measurements in the Canadian high Arctic. Atmos Meas Tech, 9: 1961–1980

Hu J, Bailey A, Nusbaumer J, Dee S, Sasser C, Worden J. 2022. Tracking shallow convective mixing and its influence on low-level clouds with stable water isotopes in vapor. J Geophys Res-Atmos, 127: e2021JD035355

Imasu R, Ogawa T, Shimoda H. 2000. Meridional distribution feature of minor constituents as observed by IMG sensor aboard ADEOS satellite. Adv Space Res, 25: 959–962

Ingraham N L, Taylor B E. 1986. Hydrogen isotope study of large-scale meteoric water transport in Northern California and Nevada. J Hydrol, 85: 183–197

Jacob H, Sonntag C. 1991. An 8-year record of the seasonal variation of ^{2}H and ^{18}O in atmospheric water vapour and precipitation at Heidelberg, Germany. Tellus B-Chem Phys Meteor, 43: 291–300

Jasechko S. 2019. Global isotope hydrogeology—Review. Rev

Geophys, 57: 835–965

Jiang X, Waliser D E, Olson W S, Tao W K, L'Ecuyer T S, Li J L, Tian B, Yung Y L, Tompkins A M, Lang S E, Grecu M. 2009. Vertical heating structures associated with the MJO as characterized by TRMM estimates, ECMWF reanalyses, and forecasts: A case study during 1998/99 winter. J Clim, 22: 6001–6020

Joussaume S, Sadourny R, Jouzel J. 1984. A general circulation model of water isotope cycles in the atmosphere. Nature, 311: 24–29

Jouzel J, Lorius C, Petit J R, Genthon C, Barkov N I, Kotlyakov V M, Petrov V M. 1987. Vostok ice core: A continuous isotope temperature record over the last climatic cycle (160,000 years). Nature, 329: 403–408

Jing Z, Yu W, Lewis S, Thompson L G, Xu J, Zhang J, Xu B, Wu G, Ma Y, Wang Y, Guo R. 2022. Inverse altitude effect disputes the theoretical foundation of stable isotope paleoaltimetry. Nat Commun, 13: 4371

Kelson J R, Petersen S V, Niemi N A, Passey B H, Curley A N. 2022. Looking upstream with clumped and triple oxygen isotopes of estuarine oyster shells in the early Eocene of California, USA. Geology, 50: 755–759

Keeling C D. 1958. The concentration and isotopic abundances of atmospheric carbon dioxide in rural areas. Geochim Cosmochim Acta, 13: 322–334

Kalnajs L E, Davis S M, Goetz J D, Deshler T, Khaykin S, St. Clair A, Hertzog A, Bordereau J, Lykov A. 2021. A reel-down instrument system for profile measurements of water vapor, temperature, clouds, and aerosol beneath constant-altitude scientific balloons. Atmos Meas Tech, 14: 2635–2648

Kanamitsu M, Kumar A, Juang H M H, Schemm J K, Wang W, Yang F, Hong S Y, Peng P, Chen W, Moorthi S, Ji M. 2002. NCEP dynamical seasonal forecast system 2000. Bull Amer Meteor Soc, 83: 1019–1037

Khaykin S M, Pommereau J P, Riviere E D, Held G, Ploeger F, Ghysels M, Amarouche N, Vernier J P, Wienhold F G, Ionov D. 2016. Evidence of horizontal and vertical transport of water in the Southern Hemisphere tropical tropopause layer (TTL) from high-resolution balloon observations. Atmos Chem Phys, 16: 12273–12286

Kiladis G N, Straub K H, Haertel P T. 2005. Zonal and vertical structure of the Madden-Julian oscillation. J Atmos Sci, 62: 2790–2809

Killingsworth B A, Hayles J A, Zhou C, Bao H. 2013. Sedimentary constraints on the duration of the Marinoan Oxygen-17 Depletion (MOSD) event. Proc Natl Acad Sci USA, 110: 17686–17690

Klein E S, Welker J M. 2016. Influence of sea ice on ocean water vapor isotopes and Greenland ice core records. Geophys Res Lett, 43: 12475–12483

Klein E S, Cherry J E, Young J, Noone D, Leffler A J, Welker J M. 2015. Arctic cyclone water vapor isotopes support past sea ice retreat recorded in Greenland ice. Sci Rep, 5: 10295

Kurita S, Miyoshi Y, Tsuchiya F, Nishimura Y, Hori T, Miyashita Y, Takada T, Morioka A, Angelopoulos V, McFadden J P, Auster H U, Albert J M, Jordanova V, Misawa H. 2011. Transport and loss of the inner plasma sheet electrons: THEMIS observations. J Geophys Res, 116: D24101

Lacour J L, Risi C, Worden J, Clerbaux C, Coheur P F. 2018. Importance of depth and intensity of convection on the isotopic composition of water vapor as seen from IASI and TES δD observations. Earth Planet Sci Lett, 481: 387–394

Landais A, Barkan E, Luz B. 2008. Record of δ^{18}O and ^{17}O-excess in ice from Vostok Antarctica during the last 150,000 years. Geophys Res Lett, 35: 2007GL032096

Landais A, Steen-Larsen H C, Guillevic M, Masson-Delmotte V, Vinther B, Winkler R. 2012. Triple isotopic composition of oxygen in surface snow and water vapor at NEEM (Greenland). Geochim Cosmochim Acta, 77: 304–316

Laskar A H, Huang J C, Hsu S C, Bhattacharya S K, Wang C H, Liang M C. 2014. Stable isotopic composition of near surface atmospheric water vapor and rain-vapor interaction in Taipei, Taiwan. J Hydrol, 519: 2091–2100

Lawrence J R, Gedzelman S D, Zhang X, Arnold R. 1998. Stable isotope ratios of rain and vapor in 1995 hurricanes. J Geophys Res, 103: 11381–11400

Lawrence J R, Gedzelman S D, Gamache J, Black M. 2002. Stable isotope ratios: Hurricane Olivia. J Atmos Chem, 41: 67–82

Lehmann M M, Goldsmith G R, Schmid L, Gessler A, Saurer M, Siegwolf R T W. 2018. The effect of ^{18}O-labelled water vapour on the oxygen isotope ratio of water and assimilates in plants at high humidity. New Phytol, 217: 105–116

Lee J, Fung I, DePaolo D J, Henning C C. 2007. Analysis of the global distribution of water isotopes using the NCAR atmospheric general circulation model. J Geophys Res, 112: 2006JD007657

Lee J -, Risi C, Fung I, Worden J, Scheepmaker R A, Lintner B, Frankenberg C. 2012. Asian monsoon hydrometeorology from TES and SCIAMACHY water vapor isotope measurements and LMDZ simulations: Implications for speleothem climate record interpretation. J Geophys Res, 117: 2011JD017133

Lekshmy P R, Midhun M, Ramesh R. 2018. Influence of stratiform clouds on δD and δ^{18}O of monsoon water vapour and rain at two tropical coastal stations. J Hydrol, 563: 354–362

Li Y, Liu X, Xie X, Cauquoin A, Werner M. 2023a. Interannual modulation of the East and South Asian summer precipitation δ^{18}O by the Indian and western North Pacific summer monsoon strength.

Glob Planet Change, 227: 104187
Li S, Levin N E, Soderberg K, Dennis K J, Caylor K K. 2017. Triple oxygen isotope composition of leaf waters in Mpala, central Kenya. Earth Planet Sci Lett, 468: 38–50
Li Y, Zhang C, Wang Y. 2016. The verification of millennial-scale monsoon water vapor transport channel in northwest China. J Hydrol, 536: 273–283
Li Y, Yu W, Tian L, Lewis S, Yoshimura K, Wang C, Cui J, Ma Y, Guo R, Zhang J, Jing Z, Shao L, Guo X, Wang Y. 2023b. Diagnosis of atmospheric circulation shifts in the central Tibetan Plateau: Evidence from stable isotopes. Atmos Res, 282: 106536
Liu J, Xiao C, Ding M, Ren J. 2014b. Variations in stable hydrogen and oxygen isotopes in atmospheric water vapor in the marine boundary layer across a wide latitude range. J Environ Sci, 26: 2266–2276
Liu J, Du Z, Zhang D, Wang S. 2022. Diagnoses of Antarctic Inland water cycle regime: Perspectives from atmospheric water vapor isotope observations along the transect from Zhongshan Station to Dome A. Front Earth Sci, 10: 823515
Liu Z F, Yoshimura K, Kennedy C D, Wang X H, Pang S G. 2014a. Water vapor δD dynamics over China derived from SCIAMACHY satellite measurements. Sci China Earth Sci, 57: 813–823
Lu G, DePaolo D J. 2016. Lattice Boltzmann simulation of water isotope fractionation during ice crystal growth in clouds. Geochim Cosmochim Acta, 180: 271–283
Luz B, Barkan E. 2010. Variations of $^{17}O/^{16}O$ and $^{18}O/^{16}O$ in meteoric waters. Geochim Cosmochim Acta, 74: 6276–6286
Luz B, Barkan E, Bender M L, Thiemens M H, Boering K A. 1999. Triple-isotope composition of atmospheric oxygen as a tracer of biosphere productivity. Nature, 400: 547–550
Lo M, Famiglietti J S. 2013. Irrigation in California's Central Valley strengthens the southwestern U.S. water cycle. Geophys Res Lett, 40: 301–306
Mejia-Chang M, Reyes-Garcia C, Seibt U, Royles J, Meyer M T, Jones G D, Winter K, Arnedo M, Griffiths H. 2021. Leaf water δ. Funct Plant Biol, 48: 732–742
Magh R K, Gralher B, Herbstritt B, Kübert A, Lim H, Lundmark T, Marshall J. 2022. Technical note: Conservative storage of water vapour-practical *in situ* sampling of stable isotopes in tree stems. Hydrol Earth Syst Sci, 26: 3573–3587
Majoube M. 1971. Fractionnement en oxygène 18 et en deutérium entre l'eau et sa vapeur. J Chem Phys, 68: 1423–1436
Mathieu R, Pollard D, Cole J E, White J W C, Webb R S, Thompson S L. 2002. Simulation of stable water isotope variations by the GENESIS GCM for modern conditions. J Geophys Res, 107: ACL2–1
Matsuhisa Y, Goldsmith J R, Clayton R N. 1978. Mechanisms of hydrothermal crystallization of quartz at 250°C and 15 kbar. Geochim Cosmochim Acta, 42: 173–182
Martinez-FrÍAs J, Delgado A, MillÁN M, Reyes E, Rull F, Travis D, Garcia R, LÓPez-Vera F, RodrÍGuez-Losada J A, Martin-Rubi J A, Raya J, Santoyo E. 2005. Oxygen and hydrogen isotopic signatures of large atmospheric ice conglomerations. J Atmos Chem, 52: 185–202
Merlivat L, Jouzel J. 1979. Global climatic interpretation of the deuterium-oxygen 18 relationship for precipitation. J Geophys Res, 84: 5029–5033
McInerney F A, Gerber C, Dangerfield E, Cernusak L A, Puccini A, Szarvas S, Singh T, Welti N. 2023. Leaf water $\delta^{18}O$, $\delta^{2}H$ and *d*excess isoscapes for Australia using region-specific plant parameters and non-equilibrium vapour. Hydrolog Processes, 37: e14878
Nimya S S, Sengupta S, Parekh A, Bhattacharya S K, Pradhan R. 2022. Region-specific performances of isotope enabled general circulation models for Indian summer monsoon and the factors controlling isotope biases. Clim Dyn, 59: 3599–3619
Noone D. 2008. The influence of midlatitude and tropical overturning circulation on the isotopic composition of atmospheric water vapor and Antarctic precipitation. J Geophys Res, 113: D04102– D04114
Noone D, Simmonds I. 2002. Associations between $\delta^{18}O$ of water and climate parameters in a simulation of atmospheric circulation for 1979–95. J Clim, 15: 3150–3169
Noone D, Galewsky J, Sharp Z D, Worden J, Barnes J, Baer D, Bailey A, Brown D P, Christensen L, Crosson E, Dong F, Hurley J V, Johnson L R, Strong M, Toohey D, Van Pelt A, Wright J S. 2011. Properties of air mass mixing and humidity in the subtropics from measurements of the D/H isotope ratio of water vapor at the Mauna Loa Observatory. J Geophys Res, 116: D22113
Nusbaumer J, Wong T E, Bardeen C, Noone D. 2017. Region-specific performances of isotope enabled general circulation models for Indian summer monsoon and the factors controlling isotope biases. J Adv Model Earth Syst, 9: 949–977
Okazaki A, Satoh Y, Tremoy G, Vimeux F, Scheepmaker R, Yoshimura K. 2015. Interannual variability of isotopic composition in water vapor over western Africa and its relationship to ENSO. Atmos Chem Phys, 15: 3193–3204
Pan Y, Zhang Y, Wang X, Zhao Y, Zhang Z, Wu X, Wang D. 2023. Isotope variations and interrelationship characteristics of different water reservoirs during non-rainfall events in revegetation desert area, northwest China. J Hydrol, 619: 129349
Payne V H, Noone D, Dudhia A, Piccolo C, Grainger R G. 2007. Global satellite measurements of HDO and implications for understanding the transport of water vapour into the stratosphere. Quart J R

Meteoro Soc, 133: 1459–1471

Pierchala A, Rozanski K, Dulinski M, Gorczyca Z. 2022. Triple-isotope mass balance of mid-latitude, groundwater controlled lake. Sci Total Environ, 814: 151935

Pfahl S, Sodemann H. 2014. What controls deuterium excess in global precipitation? Clim Past, 10: 771–781

Risi C, Noone D, Frankenberg C, Worden J. 2013. Role of continental recycling in intraseasonal variations of continental moisture as deduced from model simulations and water vapor isotopic measurements. Water Resources Res, 49: 4136–4156

Risi C, Noone D, Worden J, Frankenberg C, Stiller G, Kiefer M, Funke B, Walker K, Bernath P, Schneider M, Bony S, Lee J, Brown D, Sturm C. 2012. Process-evaluation of tropospheric humidity simulated by general circulation models using water vapor isotopic observations: 2. Using isotopic diagnostics to understand the mid and upper tropospheric moist bias in the tropics and subtropics. J Geophys Res, 117: 2011JD016623

Richards K. 2005. Urban and rural dewfall, surface moisture, and associated canopy-level air temperature and humidity measurements for vancouver, canada. Bound-Layer Meteor, 114: 143–163

Rozanski K, Araguás-Araguás L, Gonfiantini R. 1992. Relation between long-term trends of Oxygen-18 isotope composition of precipitation and climate. Science, 258: 981–985

Salamalikis V, Argiriou A A, Dotsika E. 2015. Stable isotopic composition of atmospheric water vapor in Patras, Greece: A concentration weighted trajectory approach. Atmos Res, 152: 93–104

Samuels-Crow K E, Galewsky J, Sharp Z D, Dennis K J. 2014. Deuterium excess in subtropical free troposphere water vapor: Continuous measurements from the Chajnantor Plateau, northern Chile. Geophys Res Lett, 41: 8652–8659

Sánchez-Murillo R, Durán-Quesada A M, Esquivel-Hernández G, Rojas-Cantillano D, Birkel C, Welsh K, Sánchez-Llull M, Alonso-Hernández C M, Tetzlaff D, Soulsby C, Boll J, Kurita N, Cobb K M. 2019. Deciphering key processes controlling rainfall isotopic variability during extreme tropical cyclones. Nat Commun, 10: 4321

Sansjofre P, Ader M, Trindade R I F, Elie M, Lyons J, Cartigny P, Nogueira A C R. 2011. A carbon isotope challenge to the snowball Earth. Nature, 478: 93–96

Srivastava R, Ramesh R, Gandhi N, Jani R A, Singh A K. 2015. Monsoon onset signal in the stable oxygen and hydrogen isotope ratios of monsoon vapor. Atmos Environ, 108: 117–124

Scaife A A, Butchart N, Jackson D R, Swinbank R. 2003. Can changes in ENSO activity help to explain increasing stratospheric water vapor? Geophys Res Lett, 30: 2003GL017591

Schmidt G A, Hoffmann G, Shindell D T, Hu Y. 2005. Modeling atmospheric stable water isotopes and the potential for constraining cloud processes and stratosphere-troposphere water exchange. J Geophys Res, 110: 2005JD005790

Schmidt G A, Ruedy R, Hansen J E, Aleinov I, Bell N, Bauer M, Bauer S, Cairns B, Canuto V, Cheng Y, Del Genio A, Faluvegi G, Friend A D, Hall T M, Hu Y, Kelley M, Kiang N Y, Koch D, Lacis A A, Lerner J, Lo K K, Miller R L, Nazarenko L, Oinas V, Perlwitz J, Perlwitz J, Rind D, Romanou A, Russell G L, Sato M, Shindell D T, Stone P H, Sun S, Tausnev N, Thresher D, Yao M S. 2006. Present-day atmospheric simulations using GISS ModelE: Comparison to *in situ*, satellite, and reanalysis data. J Clim, 19: 153–192

Schneider M, Barthlott S, Hase F, González Y, Yoshimura K, García O E, Sepúlveda E, Gomez-Pelaez A, Gisi M, Kohlhepp R, Dohe S, Blumenstock T, Wiegele A, Christner E, Strong K, Weaver D, Palm M, Deutscher N M, Warneke T, Notholt J, Lejeune B, Demoulin P, Jones N, Griffith D W T, Smale D, Robinson J. 2012. Ground-based remote sensing of tropospheric water vapour isotopologues within the project MUSICA. Atmos Meas Tech, 5: 3007–3027

Sigmund A, Chaar R, Ebner P P, Lehning M. 2023. A case study on drivers of the isotopic composition of water vapor at the coast of East Antarctica. J Geophys Res-Earth Surf, 128: e2023JF007062

Shi M, Worden J R, Bailey A, Noone D, Risi C, Fu R, Worden S, Herman R, Payne V, Pagano T, Bowman K, Bloom A A, Saatchi S, Liu J, Fisher J B. 2022. Amazonian terrestrial water balance inferred from satellite-observed water vapor isotopes. Nat Commun, 13: 2686

Sime L C, Wolff E W, Oliver K I C, Tindall J C. 2009. Evidence for warmer interglacials in East Antarctic ice cores. Nature, 462: 342–345

Sjolte J, Hoffmann G, Johnsen S J, Vinther B M, Masson-Delmotte V, Sturm C. 2011. Modeling the water isotopes in Greenland precipitation 1959–2001 with the meso-scale model REMO-iso. J Geophys Res, 116: D18105

Sodemann H, Aemisegger F, Pfahl S, Bitter M, Corsmeier U, Feuerle T, Graf P, Hankers R, Hsiao G, Schulz H, Wieser A, Wernli H. 2017. The stable isotopic composition of water vapour above Corsica during the HyMeX SOP1 campaign: Insight into vertical mixing processes from lower-tropospheric survey flights. Atmos Chem Phys, 17: 6125–6151

Steen-Larsen H C, Masson-Delmotte V, Sjolte J, Johnsen S J, Vinther B M, Bréon F M, Clausen H B, Dahl-Jensen D, Falourd S, Fettweis X, Gallée H, Jouzel J, Kageyama M, Lerche H, Minster B, Picard G, Punge H J, Risi C, Salas D, Schwander J, Steffen K, Sveinbjörnsdóttir A E, Svensson A, White J. 2011. Understanding the climatic signal in the water stable isotope records from the

NEEM shallow firn/ice cores in northwest Greenland. J Geophys Res, 116: D06108

Steen-Larsen H C, Sveinbjörnsdottir A E, Peters A J, Masson-Delmotte V, Guishard M P, Hsiao G, Jouzel J, Noone D, Warren J K, White J W C. 2014. Climatic controls on water vapor deuterium excess in the marine boundary layer of the North Atlantic based on 500 days of *in situ*, continuous measurements. Atmos Chem Phys, 14: 7741–7756

Steen-Larsen H C, Johnsen S J, Masson-Delmotte V, Stenni B, Risi C, Sodemann H, Balslev-Clausen D, Blunier T, Dahl-Jensen D, Ellehøj M D, Falourd S, Grindsted A, Gkinis V, Jouzel J, Popp T, Sheldon S, Simonsen S B, Sjolte J, Steffensen J P, Sperlich P, Sveinbjörnsdóttir A E, Vinther B M, White J W C. 2013. Continuous monitoring of summer surface water vapor isotopic composition above the Greenland Ice Sheet. Atmos Chem Phys, 13: 4815–4828

Steen-Larsen H C, Risi C, Werner M, Yoshimura K, Masson-Delmotte V. 2017. Evaluating the skills of isotope-enabled general circulation models against in situ atmospheric water vapor isotope observations. J Geophys Res-Atmos, 122: 246–263

Steen-Larsen H C, Sveinbjörnsdottir A E, Jonsson T, Ritter F, Bonne J, Masson-Delmotte V, Sodemann H, Blunier T, Dahl-Jensen D, Vinther B M. 2015. Moisture sources and synoptic to seasonal variability of North Atlantic water vapor isotopic composition. J Geophys Res-Atmos, 120: 5757–5774

Steffensen J P, Andersen K K, Bigler M, Clausen H B, Dahl-Jensen D, Fischer H, Goto-Azuma K, Hansson M, Johnsen S J, Jouzel J, Masson-Delmotte V, Popp T, Rasmussen S O, Rothlisberger R, Ruth U, Stauffer B, Siggaard-Andersen M L, Sveinbjornsdottir A E, Svensson A, White J W C. 2008. High-resolution greenland ice core data show abrupt climate change happens in few years. Science, 321: 680–684

Steinwagner J, Milz M, von Clarmann T, Glatthor N, Grabowski U, Höpfner M, Stiller G P, Röckmann T. 2007. HDO measurements with MIPAS. Atmos Chem Phys, 7: 2601–2615

Strong M, Sharp Z D, Gutzler D S. 2007. Diagnosing moisture transport using D/H ratios of water vapor. Geophys Res Lett, 34: L03404

Singh N, Pradhan R, Singh R P, Gupta P K. 2023. The role of continental evapotranspiration on water vapour isotopic variability in the troposphere. Isotopes Environ Health Stud, 59: 248–268

Sun C J, Zhou S J, Jing Z W. 2023. Variability of precipitation-stable isotopes and moisture sources of two typical landforms in the eastern Loess Plateau, China. J Hydrol-Reg Stud, 46: 101349

Studer M S, Siegwolf R T W, Leuenberger M, Abiven S. 2015. Multi-isotope labelling of organic matter by diffusion of $^{2}H/^{18}O$-H_2O vapour and ^{13}C-CO_2 into the leaves and its distribution within the plant. Biogeosciences, 12: 1865–1879

Tada M, Yoshimura K, Toride K. 2021. Improving weather forecasting by assimilation of water vapor isotopes. Sci Rep, 11: 18067

Taylor S R. 1964. Abundance of chemical elements in the continental crust: A new table. Geochim Cosmochim Acta, 28: 1273–1285

Tharammal T, Bala G, Noone D. 2017. Impact of deep convection on the isotopic amount effect in tropical precipitation. J Geophys Res-Atmos, 122: 1505–1523

Tharammal T, Bala G, Nusbaumer J M. 2023. Sources of water vapor and their effects on water isotopes in precipitation in the Indian monsoon region: A model-based assessment. Sci Rep, 13: 708

Tian B, Waliser D E, Fetzer E J, Lambrigtsen B H, Yung Y L, Wang B. 2006. Vertical moist thermodynamic structure and spatial-temporal evolution of the MJO in AIRS observations. J Atmos Sci, 63: 2462–2485

Tian L, Yu W, Schuster P F, Wen R, Cai Z, Wang D, Shao L, Cui J, Guo X. 2020. Control of seasonal water vapor isotope variations at Lhasa, southern Tibetan Plateau. J Hydrol, 580: 124237

Tindall J C, Valdes P J, Sime L C. 2009. Stable water isotopes in HadCM3: Isotopic signature of El Niño-Southern Oscillation and the tropical amount effect. J Geophys Res, 114: D04111

Tsai I C, Chen W Y, Chen J P, Liang M C. 2019. Kinetic mass-transfer calculation of water isotope fractionation due to cloud microphysics in a regional meteorological model. Atmos Chem Phys, 19: 1753–1766

Torri G. 2022. Isotopic Equilibration in convective downdrafts. Geophys Res Lett, 49: e2022GL098743

Thurnherr I, Aemisegger F. 2022. Disentangling the impact of air-sea interaction and boundary layer cloud formation on stable water isotope signals in the warm sector of a Southern Ocean cyclone. Atmos Chem Phys, 22: 10353–10373

Thiemens M H, Heidenreich Iii J E. 1983. The mass-independent fractionation of Oxygen: A novel isotope effect and its possible cosmochemical implications. Science, 219: 1073–1075

Thiemens M H. 2006. History and applications of mass-independent isotope effects. Annu Rev Earth Planet Sci, 34: 217–262

Uemura R, Barkan E, Abe O, Luz B. 2010. Triple isotope composition of oxygen in atmospheric water vapor. Geophys Res Lett, 37: L04402

Villiger L, Dütsch M, Bony S, Lothon M, Pfahl S, Wernli H, Brilouet P E, Chazette P, Coutris P, Delanoë J, Flamant C, Schwarzenboeck A, Werner M, Aemisegger F. 2023. Water isotopic characterisation of the cloud–circulation coupling in the North Atlantic trades – Part 1: A process-oriented evaluation of COSMOiso simulations with EUREC4A observations. Atmos Chem Phys, 23: 14643–14672

Vimeux F, Risi C. 2021. Isotopic equilibrium between raindrops and

water vapor during the onset and the termination of the 2005–2006 wet season in the Bolivian Andes. J Hydrol, 598: 126472

Voigt C, Vallet-Coulomb C, Piel C, Alexandre A. 2022. ^{17}O-excess and d-excess of atmospheric water vapor measured by cavity ring-down spectrometry: Evidence of a matrix effect and implication for the calibration procedure. Rapid Comm Mass Spectr, 36: e9227

Vries A J, Aemisegger F, Pfahl S, Wernli H. 2022. Stable water isotope signals in tropical ice clouds in the West African monsoon simulated with a regional convection-permitting model. Atmos Chem Phys, 22: 8863–8895

Wang D, Tian L, Risi C, Wang X, Cui J, Bowen G J, Yoshimura K, Wei Z, Li L Z X. 2023a. Vehicle-based *in situ* observations of the water vapor isotopic composition across China: Spatial and seasonal distributions and controls. Atmos Chem Phys, 23: 3409–3433

Wang Z, Li X, Deng Y, Liu X, Zhang Y. 2023b. Stable isotope tracing internal recycling and evaporation losses in saline lakes on the Qinghai-Tibet Plateau. Sci Total Environ, 903: 166614

Wen X, Zhang S, Sun X, Yu G, Lee X. 2010. Water vapor and precipitation isotope ratios in Beijing, China. J Geophys Res, 115: 2009JD012408

Winkler R, Landais A, Sodemann H, Dümbgen L, Prié F, Masson-Delmotte V, Stenni B, Jouzel J. 2012. Deglaciation records of ^{17}O-excess in East Antarctica: Reliable reconstruction of oceanic normalized relative humidity from coastal sites. Clim Past, 8: 1–16

Worden J, Bowman K, Noone D, Beer R, Clough S, Eldering A, Fisher B, Goldman A, Gunson M, Herman R, Kulawik S S, Lampel M, Luo M, Osterman G, Rinsland C, Rodgers C, Sander S, Shephard M, Worden H. 2006. Tropospheric Emission Spectrometer observations of the tropospheric HDO/H_2O ratio: Estimation approach and characterization. J Geophys Res, 111: D16309

Wolf A, Roberts W H G, Ersek V, Johnson K R, Griffiths M L. 2020. Rainwater isotopes in central Vietnam controlled by two oceanic moisture sources and rainout effects. Sci Rep, 10: 16482

Wu H, Zhang C, Li X Y, Fu C, Wu H, Wang P, Liu J. 2022. Hydrometeorological processes and moisture sources in the Northeastern Tibetan Plateau: Insights from a 7-yr study on precipitation isotopes. J Clim, 35: 2919–2931

Wahl S, Steen-Larsen H C, Hughes A G, Dietrich L J, Zuhr A, Behrens M, Faber A, Hörhold M. 2022. Atmosphere-snow exchange explains surface snow isotope variability. Geophys Res Lett, 49: e2022GL099529

Xia Z, Surma J, Winnick M J. 2023. The response and sensitivity of deuterium and ^{17}O excess parameters in precipitation to hydroclimate processes. Earth-Sci Rev, 242: 104432

Xie F, Tian W, Zhou X, Zhang J, Xia Y, Lu J. 2020. Increase in lower stratospheric water vapor in the past 100 years related to tropical atlantic warming. Geophys Res Lett, 47: e2020GL090539

Xie F, Zhou X, Li J, Chen Q, Zhang J, Li Y, Ding R, Xue J, Ma X. 2018. Effect of the Indo-Pacific warm pool on lower-stratospheric water vapor and comparison with the effect of ENSO. J Clim, 31: 929–943

Xing M, Liu W, Hu J, Wang Z. 2023a. A set of methods to evaluate the below-cloud evaporation effect on local precipitation isotopic composition: A case study for Xi'an, China. Atmos Chem Phys, 23: 9123–9136

Xing M, Wang Z, Dong J. 2023b. The premise of temperature effect playing in regions with complex moisture sources—Evidence from high-resolution water vapor isotopes. J Hydrol, 623: 129827

Xu T, Pang H, Zhan Z, Zhang W, Guo H, Wu S, Hou S. 2022. Water vapor isotopes indicating rapid shift among multiple moisture sources for the 2018–2019 winter extreme precipitation events in southeastern China. Hydrol Earth Syst Sci, 26: 117–127

Xu T, Sun X, Hong H, Wang X, Cui M, Lei G, Gao L, Liu J, Lone M A, Jiang X. 2019. Stable isotope ratios of typhoon rains in Fuzhou, Southeast China, during 2013–2017. J Hydrol, 570: 445–453

Xu T, Pang H, Zhan Z, Guo H, Wu S, Zhang W, Hou S. 2023. Characteristics of water vapor isotopes and moisture sources for short-duration heavy rainfall events in Nanjing, eastern China. J Hydrol, 622: 129731

Yamanaka T, Shimizu R. 2007. Spatial distribution of deuterium in atmospheric water vapor: Diagnosing sources and the mixing of atmospheric moisture. Geochim Cosmochim Acta, 71: 3162–3169

Yang N, Wang G. 2020. Moisture sources and climate evolution during the last 30 kyr in northeastern Tibetan Plateau: Insights from groundwater isotopes (^{2}H, ^{18}O, ^{3}H and ^{14}C) and water vapour trajectories modeling. Quat Sci Rev, 242: 106426

Yang N, Wang G, Liao F, Dang X, Gu X. 2023. Insights into moisture sources and evolution from groundwater isotopes (^{2}H, ^{18}O, and ^{14}C) in Northeastern Qaidam Basin, Northeast Tibetan Plateau, China. Sci Total Environ, 864: 160981

Yapp C J. 1982. A model for the relationships between precipitation D/H ratios and precipitation intensity. J Geophys Res, 87: 9614–9620

Yao T, Zhang X, Guan H, Zhou H, Hua M, Wang X. 2018. Climatic and environmental controls on stable isotopes in atmospheric water vapor near the surface observed in Changsha, China. Atmos Environ, 189: 252–263

Yoshimura K, Frankenberg C, Lee J, Kanamitsu M, Worden J, Röckmann T. 2011. Comparison of an isotopic atmospheric general circulation model with new quasi-global satellite measurements of water vapor isotopologues. J Geophys Res, 116: D19118

Yu W, Dessler A E, Park M, Jensen E J. 2020. Influence of convection

on stratospheric water vapor in the North American monsoon region. Atmos Chem Phys, 20: 12153–12161

Yu W, Tian L, Ma Y, Xu B, Qu D. 2015. Simultaneous monitoring of stable oxygen isotope composition in water vapour and precipitation over the central Tibetan Plateau. Atmos Chem Phys, 15: 10251–10262

Yu W, Tian L, Risi C, Yao T, Ma Y, Zhao H, Zhu H, He Y, Xu B, Zhang H, Qu D. 2016. δ^{18}O records in water vapor and an ice core from the eastern Pamir Plateau: Implications for paleoclimate reconstructions. Earth Planet Sci Lett, 456: 146–156

Yu W, Yao T, Tian L, Ma Y, Kurita N, Ichiyanagi K, Wang Y, Sun W. 2007. Stable isotope variations in precipitation and moisture trajectories on the western Tibetan Plateau, China. Arctic Antarc Alpine Res, 39: 688–693

Zakharov V I, Imasu R, Gribanov K G, Hoffmann G, Jouzel J. 2004. Latitudinal distribution of the deuterium to hydrogen ratio in the atmospheric water vapor retrieved from IMG/ADEOS data. Geophys Res Lett, 31: L12104

Zhang X. 2021. Penetration of monsoonal water vapour into arid central Asia during the Holocene: An isotopic perspective. Quat Sci Rev, 251: 106713

Zhang X, Guan H, Zhang X, Wu H, Li G, Huang Y. 2015. Simulation of stable water isotopic composition in the atmosphere using an isotopic Atmospheric Water Balance Model. Intl J Clim, 35: 846–859

Zhang X, Sun Z, Guan H, Zhang X, Wu H, Huang Y. 2012. GCM simulations of stable isotopes in the water cycle in comparison with GNIP observations over East Asia. Acta Meteorol Sin, 26: 420–437

Zhang B J, Li Z X, Feng Q, Zhang B T, Gui J. 2023b. A review of isotope ecohydrology in the cold regions of Western China. Sci Total Environ, 857: 159438

Zhang J, Yu W, Lewis S, Thompson L G, Bowen G J, Yoshimura K, Cauquoin A, Werner M, Chakraborty S, Jing Z, Ma Y, Guo X, Xu B, Wu G, Guo R, Qu D. 2023a. Controls on stable water isotopes in monsoonal precipitation across the Bay of Bengal: Atmosphere and surface analysis. Geophys Res Lett, 50: e2022GL102229

(责任编委: 许晨曦)