科学通报 2023 年 第 68 卷 第 20 期: 2678 ~ 2689
论 文
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

全球空中水资源管理潜力的关键区识别与源汇分析

张博美[1], 高红凯[1,2*], 魏江峰[3,4]

1. 华东师范大学地理科学学院, 上海 200241;
2. 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;
3. 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心/气象灾害教育部重点实验室/气候与环境变化国际合作联合实验室, 南京 210044;
4. 南京信息工程大学大气科学学院, 南京 210044

* 联系人, E-mail: hkgao@geo.ecnu.edu.cn

2022-12-15 收稿, 2023-02-14 修回, 2023-02-15 接受, 2023-03-22 网络版发表
国家自然科学基金(42122002, 42071081)资助

摘要 传统水资源管理以流域为边界, 降水是输入水量, 径流是水资源量, 蒸发被认为是水量损失. 然而, 陆地蒸发与降水之间存在复杂循环和互馈关系, 流域蒸发的水汽并未消失, 往往在其他区域产生降水. 人为驱动下的土地覆被变化可直接影响蒸发, 进而通过大气水循环过程影响下风区域的降水, 理论上存在对空中水资源进行管理的可能性. 但大气水循环过程具有复杂性, 甚至随机性, 多数区域的水汽源汇关系复杂, 空中水资源管理的可行性长期存疑. 本文基于降水域(precipitationshed)的框架, 根据水汽源贡献水量的相对大小, 确定对目标区域降水贡献最大的核心水汽源区, 即核心降水域. 使用空间分辨率为1°×1°的Utrack水汽循环数据集, 在全球尺度下, 计算分析了各格网的核心降水域, 进一步与国家边界叠加分析, 识别了全球空中水资源管理潜力的关键区. 结果显示, 中国中部、俄罗斯西伯利亚、刚果(金)中部、巴西南部、秘鲁西部、美国西北部以及加拿大西部具有较高的空中水资源管理潜力; 与国界、土地利用覆盖、人口等综合分析发现, 中国是全球最具空中水资源管理潜力的国家. 本研究为从全球水循环的全局角度科学认识我国水资源, 并从更大尺度保护、优化我国水资源格局提供了新的宏观视角.

关键词 核心降水域, 空中水资源, 水汽循环, 管理潜力, 土地政策

传统水资源管理往往以地形划分的流域作为基本边界, 流域蒸发进入大气的水汽被视为水资源的损失量[1]. 但随着人们对水循环认识的不断深入[2], 越来越多的证据表明, 陆地蒸发的部分水汽最终又以降水的形式回到陆地[3], 全球陆地降水中约40%来自陆地蒸发再循环的水汽[4]. 同时, 从蒸发到降水的过程中, 水汽的移动距离约为500~7000 km, 也往往超过大多数河流流域的范围[5]. 通过蒸发进入大气, 并最终形成降水的水汽可被视为空中水资源. 但在传统水资源管理中, 空中水资源的来源和去向几乎不被考虑[6], 空中水资源的规划和管理也难以直接套用传统水资源管理框架[7]. 因此, 识别具有空中水资源管理潜力的关键区, 并解析空中水资源的源汇关系, 有望为潜在的空中水资源管理提供科学依据[8].

从学科角度, 水汽循环研究是水文学和大气科学之间的交叉学科, 但两个学科在该领域均存在一定视角上的局限性. 水文学往往关注降水之后在地表和地下的再分配过程[9~11], 包括入渗、产流、蒸散发等, 很少关注降水之前的水汽来源以及蒸发之后的水汽去向. 大气科学更多地关注天气过程的准确预报, 大气模式对降水和蒸发过程都有详细刻画, 对陆面过程的考虑也极大提高了天气预报的精度[12~14]. 但大气科学更多

引用格式: 张博美, 高红凯, 魏江峰. 全球空中水资源管理潜力的关键区识别与源汇分析. 科学通报, 2023, 68: 2678–2689
Zhang B M, Gao H K, Wei J F. Identifying potential hotspots for atmospheric water resource management and source-sink analysis (in Chinese). Chin Sci Bull, 2023, 68: 2678–2689, doi: 10.1360/TB-2022-1275

© 2023《中国科学》杂志社

关注日、小时等时间尺度准确的降水预报，较少关注水汽的复杂源汇关系，而对水资源管理更为重要的年、季尺度水汽源汇关系的规律研究相对更少. 值得注意的是，越来越多的水文学家和大气学家已认识到水汽源汇关系的重要意义，在该领域已取得了一系列重要进展，但多集中在科学认识其在区域尺度的自然过程及其变化规律[15~17]. 从科学认识到管理之间仍然存在巨大的鸿沟，亟需进一步从全球视角深入研究其管理的可能性及潜在热点区域.

水汽循环过程是空中水资源分配的关键[18~20]，水汽循环中的陆地水汽再循环过程，连接了陆地的蒸发和降水，使陆地大部分区域的降水与其上风向的地表蒸发息息相关[21,22]. 受地形、大气环流等因素的影响，不同区域的陆地水汽再循环过程存在差异，区域降水的源汇关系存在区别，不同地区的降水受陆地蒸发的影响差别大[23,24]. 同时由于地表植被的影响，不同的土地覆被和土地利用方式对区域降水的影响也有所差异[25,26]. 例如，相比其他土地覆被类型，森林提供的蒸发较多，并且其供应的蒸发更为稳定，使其下风向地区降水的变异性相对更小[27]. 经过陆地水汽再循环过程，气候变化以及土地政策驱动下的土地覆被变化，可以通过改变陆地蒸发[28,29]、大气环流[30]等方式，对区域降水造成影响[31,32].

明确空中水资源的源汇关系是空中水资源管理的重要前提[33]. Keys等人[34]提出的降水域(precipitationshed)概念，定义了影响目标区域降水的蒸发水汽源范围，有助于明确水汽源中土地覆被对目标区域降水的影响，进而开展面向可管理的空中水资源研究. 基于降水域的概念，在土地覆被变化对空中水资源供给的影响方面，已从城市、雨养农业、生态系统服务等多视角和多尺度，研究了土地覆被变化对空中水资源供给所产生的脆弱性和可持续性的影响[34~36]. 在降水域的基础上，Weng等人[37]定义了对区域降水影响最大的陆地水汽源范围(the most influential precipitationsheds, MIPs)，量化了南美大陆亚马孙地区土地利用变化对降水和径流的影响；同时他们还利用MIPs评估了潜在土地政策驱动下的再造林，增加其下风向圣克鲁斯·德拉塞降水的可能性[38].

综上所述，土地政策驱动下的土地利用变化可通过水汽循环过程影响区域降水，因此从空中水资源管理的角度讲，对土地利用和覆被进行管理有可能影响空中水资源的时空分配过程[39]. 同时，以往对空中水资源管理的研究，往往依靠自然和政治边界，在区域尺度构建空中水资源的源汇关系[40,41]. 但其构建的空中水资源的源汇关系，实际是在格网形式再分析数据的基础上确定的. 在格网尺度研究空中水资源的源汇关系，可以更全面细致地反映空中水资源的分配过程，为后续的空中水资源管理奠定更为坚实的基础. 本文基于降水域的概念，计算了全球陆地范围内各格网的核心降水域，并在格网尺度构建空中水资源的源汇关系. 分析核心降水域的特征，识别全球空中水资源管理潜力的关键区. 并对空中水资源关键区及其水汽源的分布进行分析，为未来空中水资源的管理提供决策参考. 本研究为从水循环的全局角度科学认识水资源，并从更大尺度保护、优化、调控水资源时空格局提供了新的宏观视角.

1 研究区域和数据

1.1 研究区域

空中水资源的最终转换形式为降水，降水落区可视为空中水资源的汇区. 由于本文主要从管理的层面，根据空中水资源的源汇关系，识别全球空中水资源管理潜力的关键区. 从管理的必要性出发，本文研究的降水落区需考虑人类对区域降水的实际需求. 因此，本研究的空中水资源的汇区，仅为79.5°N~59.5°S范围内除格陵兰岛外的陆地所在区域.

1.2 研究数据

本文所使用的研究数据包括确定核心降水域分布范围的水汽源汇数据、表达核心降水域特征的海陆掩膜数据和国界数据，以及分析具空中水资源管理潜力的关键区及其水汽源分布的社会生态数据. 水汽源汇数据为Tuinenburg等人[42]计算的空间分辨率为1°×1°的Utrack水汽循环数据集，通过ERA5(ECMWF Reanalysis v5)的蒸散发数据还原该数据集，可获取全球范围内所有格网蒸发对目标格网降水的贡献量，以确定研究范围内各格网的核心水汽源区. 海陆掩膜数据为ERA5的land-sea-mask数据，该数据可以明确全球陆地和水体的分布情况. 国界数据为中国科学院资源环境科学与数据中心提供的全球国家行政边界数据. 社会生态数据包括Ellis和Ramankutty[43]计算的人为生物群区(anthropogenic biome)数据和LandScan(https://landscan.ornl.gov)人口数据. 本文参考Keys等人[34]研究雨养农业的

空中水资源管理时, 对人为生物群区数据的分类, 获取人类活动影响下的土地覆被信息. 同时考虑到Utrack水汽循环数据集的时间范围, 本文使用2017年的LandScan人口数据进行后续分析.

2 研究方法

本文主要基于降水域的理论框架, 构建空中水资源的源汇关系, 确定空中水资源的核心降水域. 并与国界和海陆掩膜数据叠置分析, 划定全球空中水资源管理潜力的关键区. 具体的研究方法及过程如图1所示.

2.1 核心降水域

本文定义的核心降水域, 指为目标区域贡献40%降水的最重要、最核心的水汽源区. 核心降水域依据水汽源对目标区域降水贡献蒸发量的大小, 判定各水汽源对目标区域降水影响的重要程度, 并利用水汽源区的累计贡献比例确定核心水汽源区的具体范围. 图2以成都所在格网为例, 展示了水汽源区的贡献量和不同累计贡献比例的水汽源区范围. 由图2可看出, 通过水汽循环过程, 全球的蒸发都对目标区域降水有所贡献, 但从水汽源贡献水量多少的角度讲, 对区域降水影响最大、最重要的核心水汽源只占很小的一部分. 如从不同累计贡献比例下水汽源区的面积来看, 为成都所在格网贡献95%降水的水汽源区面积为1.82×10^7 km^2, 贡献80%降水的水汽源区面积为4.07×10^6 km^2, 而贡献40%降水的水汽源区面积仅为4.78×10^5 km^2, 累计贡献比例为40%的水汽源区比累计贡献比例为80%的水汽源区面积小一个数量级.

明确水汽源区的累计贡献比例是确定核心降水域的关键. 本文将40%作为划定核心降水域的累计贡献比例, 该值的选择考虑到核心降水域须对目标区域降水具有较大且持续性影响. 在降水供给的持续性方面, Keys等人[44]对全球部分雨养农业水汽来源的研究表明, 这些区域降水中至少有40%由固定的水汽源持续供给. 在对目标区域降水的影响方面, Miralles等人[45]在对水资源有限的生态区域自身蒸发对降水供应的研究中提到, 当自身蒸发对降水的贡献比例达到40%时, 可认为其在降水供应中发挥了关键作用; Weng等人[37,38]在土地利用变化对区域降水影响的研究中, 仅将陆源供水前40%所在区域作为研究对象. 因此, 核心降水域的划定具体分为以下几步: 首先, 根据水汽源汇数据, 将各水汽源对目标区域降水贡献的蒸发量从大到小排序; 然后, 在此排序基础上计算源区对汇区降水的累计贡献量; 将累计贡献比例达40%的区域划定为核心降水域.

2.2 空中水资源管理潜力的关键区

本文定义的空中水资源管理潜力的关键区(简称空中水资源关键区), 主要指更可能通过国家层面的政策制定对其核心降水域进行土地管理的区域. 这些区域

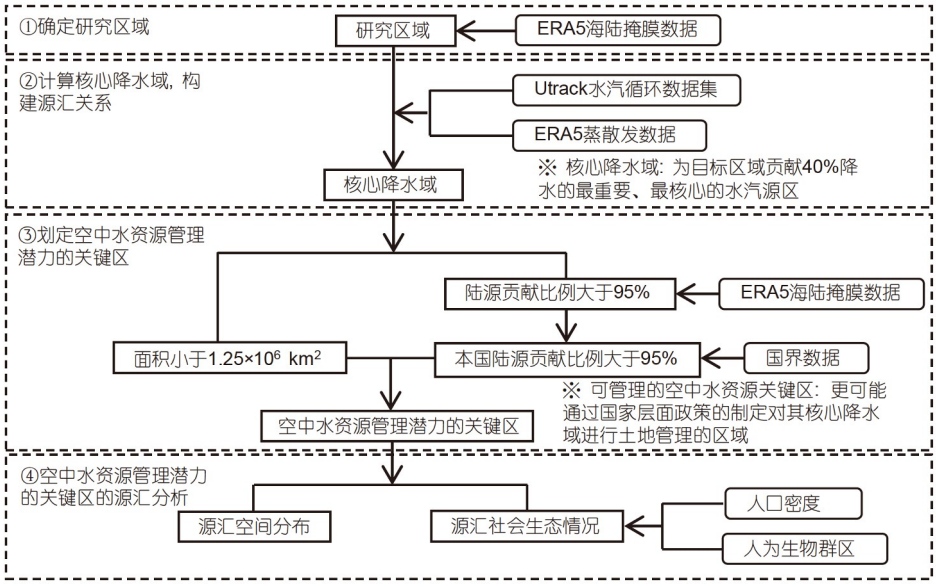
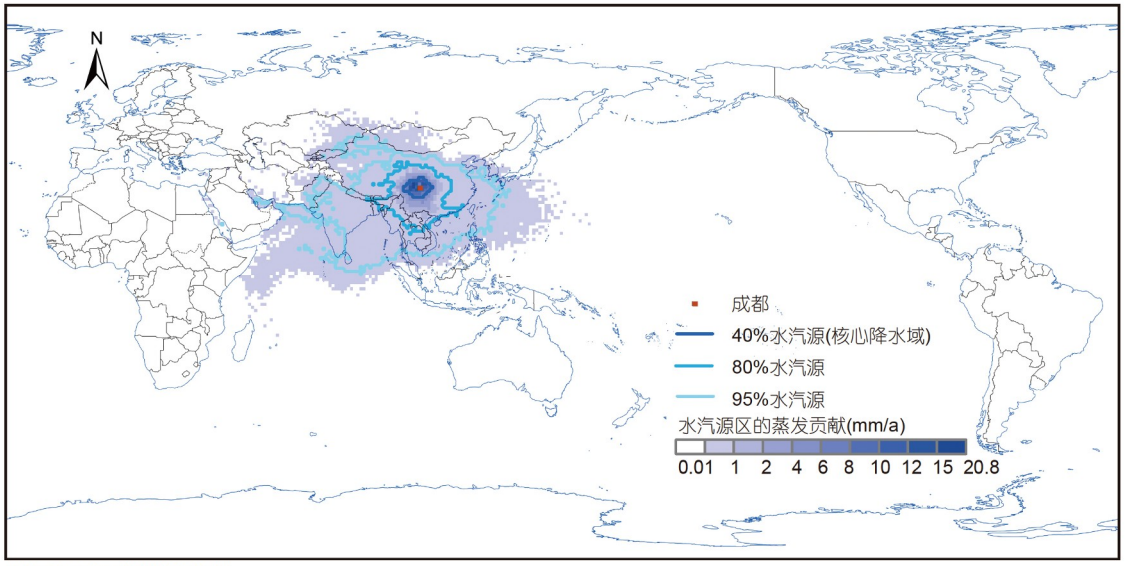


图 1 空中水资源管理潜力的关键区识别与源汇分析技术流程图

Figure 1 The technical route of identifying potential hotspots for atmospheric water resource management and source-sink analysis



审图号: GS京(2023)0631号

图 2 水汽源区的贡献量和不同累计贡献比例下的水汽源区范围示意图(成都所在格网)
Figure 2 Moisture contributions for precipitation in Chengdu and moisture source extents under different cumulative ratios

更可能通过核心降水域中土地政策驱动下的土地覆被变化, 经水汽循环过程对区域降水进行一定程度的调控. 空中水资源关键区的识别主要依赖核心降水域的特征. 图3以成都和上海所在格网为例, 展示了用于识别空中水资源关键区的核心降水域特征及其分布情况. 从核心降水域的面积来看, 成都所在格网的核心降水域面积远小于上海所在格网, 说明若对成都所在格网进行空中水资源管理, 需要进行土地管理的区域更小, 管理难度更低. 从核心降水域的陆源贡献比例来看, 成都所在格网对应核心降水域中的陆源贡献比例达100%, 而上海所在格网为64.45%, 说明成都所在格网更可能通过其核心降水域的土地管理, 对空中水资源的供给和分配造成影响. 从核心降水域的本国贡献比例来看, 对于成都所在格网对应的核心降水域, 来自中国陆地水汽源的贡献比例达100%, 而上海所在格网为62.39%, 说明成都所在格网更可能通过国家层面的政策制定, 对其核心降水域进行土地管理, 进而影响其空中水资源的供给和分配.

本文定义空中水资源关键区主要依赖两个核心指标: 一为核心降水域面积小于1.25×10^6 km^2(约为研究范围内所有格网核心降水域中面积最小的20%对应的范围), 二为核心降水域中本国陆源贡献比例大于95%. 只有同时满足这两个条件, 才被识别为空中水资源关键区. 结合空中水资源关键区的划定标准来看, 图3中成都所在格网对应的核心降水域面积小于本研究范围内的大多数格网, 且核心降水域中本国陆源贡献比例占绝对主导, 故为空中水资源关键区. 而上海所在格网核心降水域面积较大, 核心降水域中陆源及本国贡献比例不占主导, 海洋蒸发对区域降水有较大的贡献. 因此, 对于上海所在格网, 对其核心降水域进行土地管理, 影响其空中水资源的难度较大, 故不被识别为空中水资源关键区.

3 研究结果

3.1 核心降水域

3.1.1 核心降水域面积

研究区域内各格网核心降水域的面积如图4所示. 核心降水域的面积越小, 需要进行土地管理的区域越小, 空中水资源的管理难度越低. 如美国北部的部分区域核心降水域中陆源贡献比例都较高(图5), 但偏西部地区的核心降水域的面积小于偏东部地区. 因此, 当试图通过土地覆被的改变影响下风地区的降水时, 偏东部地区需改变的地表面积很可能高于偏西部地区, 相比之下, 更难对降水进行管理. 由图4可以看出, 核心降水域范围较小的区域主要分布在以我国大部和蒙古国大部为主的东亚、北美洲西北部、南美洲西海岸、非洲中西部、中亚以及阿拉伯半岛部分地区.

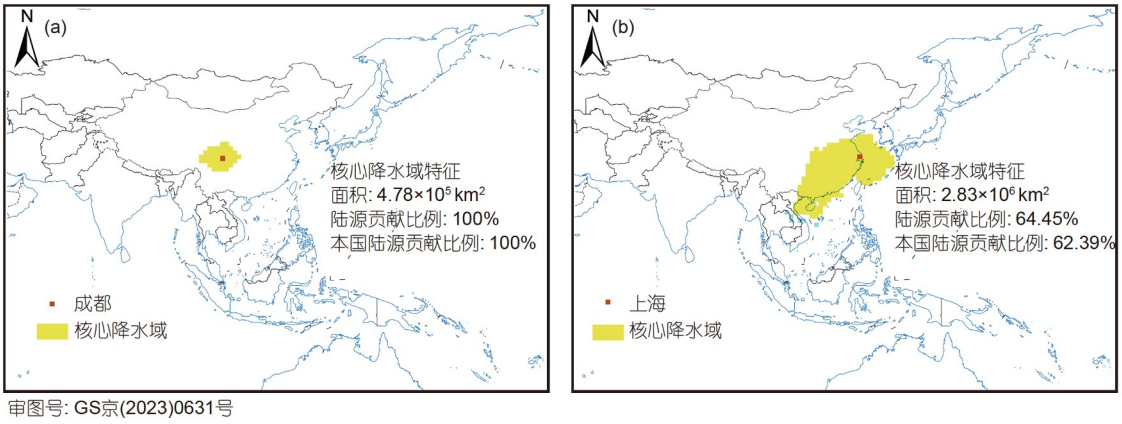


图 3 核心降水域分布特征示意图. (a) 成都所在格网; (b) 上海所在格网
Figure 3 Distribution characteristics of the core precipitationshed. (a) The grid of Chengdu; (b) the grid of Shanghai

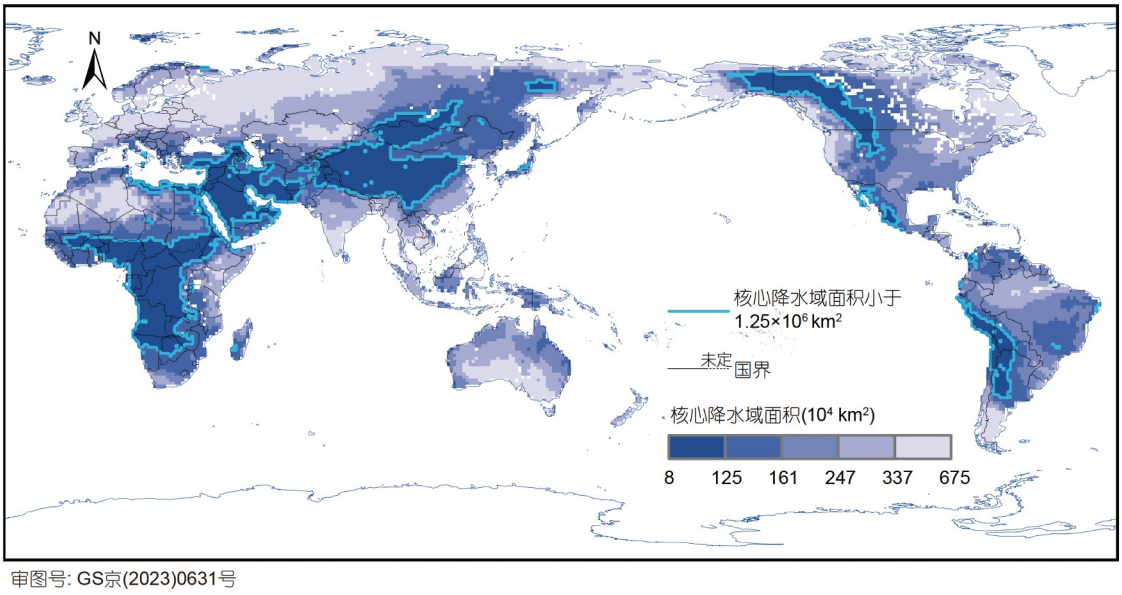


图 4 核心降水域面积
Figure 4 The area of the core precipitationshed

3.1.2 核心降水域中本国陆源贡献比例

从空中水资源管理的角度讲, 核心降水域中本国陆源贡献比例反映了两方面信息. 一为核心降水域中陆源贡献, 它反映通过核心降水域的土地管理影响其空中水资源供给和分配的可能; 二为本国领土贡献, 它反映了能否通过国家层面土地政策的制定进行核心降水域的土地管理, 进而对空中水资源进行管理. 图5(a)展示了研究区域内各格网核心降水域中的陆源贡献比例. 核心降水域中陆源贡献比例越高, 核心降水域中陆地蒸发对目标格网的影响越大, 则改变核心降水域中的土地覆被, 进而通过改变陆源蒸发等, 影响下风方向目标区域降水的可能性越大. 如阿拉伯半岛虽然核心降水域面积小, 但核心降水域中海源贡献占主导作用, 通过土地管理影响空中水资源和该地区降水的可能性低. 核心降水域中陆源贡献比例较大的区域主要分布在亚洲北部、我国大部、非洲中西部、南美洲中西部、北美洲西部. 研究区域内各格网核心降水域中的本国陆源贡献比例如图5(b)所示. 核心降水域中本国贡献比例越高, 则目标区域及其对应的核心降水域更可能位于同一国家, 制定并实施土地政策改变核心降水域土地覆被的可操作性越强[46]. 图5(b)中核心降水域中本国贡献比例大的区域, 实际为图5(a)陆源贡献比例

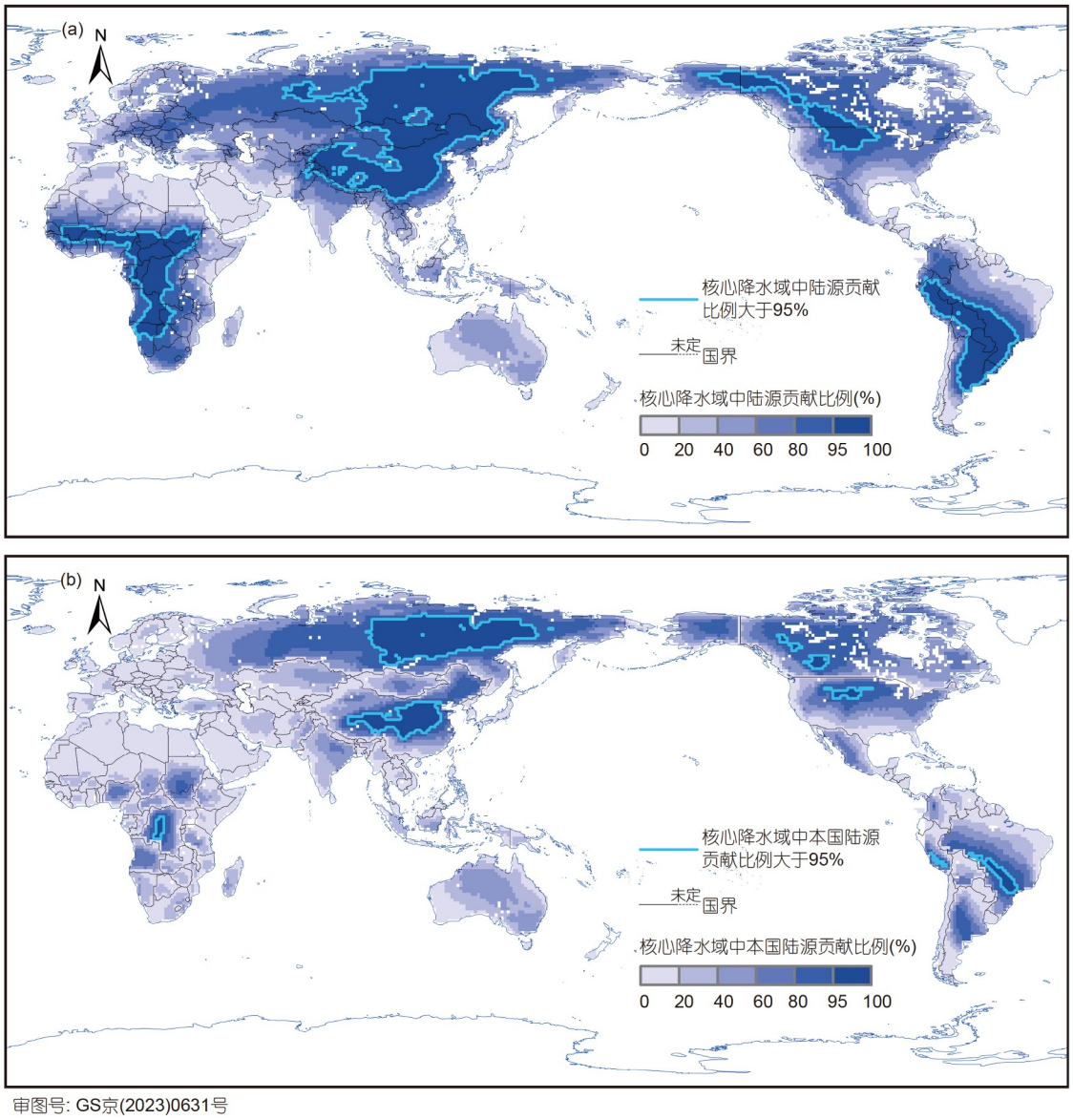


图 5 核心降水域中陆源贡献比例(a)和本国陆源贡献比例(b)
Figure 5 The moisture contribution ratio from land (a) and the land in the same nation (b) in the core precipitationshed

较大的区域中，政策的制定和实施更为独立、可执行性更强的地区. 核心降水域中本国陆源贡献比例较大的区域分布在中国、俄罗斯、刚果(金)、加拿大、美国、秘鲁和巴西这7个国家.

3.2 空中水资源关键区的水汽源及其社会生态分析

在本文讨论的空中水资源管理中，空中水资源关键区被视为政策受益区，其对应的核心降水域被视为政策施行区. 研究空中水资源关键区及其核心降水域的空间分布及社会生态情况，可为潜在的空中水资源管理提供重要参考.

3.2.1 空中水资源关键区及其水汽源的空间分布

本文定义的空中水资源关键区及其水汽源的空间分布情况如图6所示，由图6可看出，空中水资源关键区主要分布在中国的中部、俄罗斯西伯利亚、刚果(金)中部、巴西南部、秘鲁西部、美国西北部以及加拿大西部的部分地区. 在本文划定的空中水资源关键区中，中国的青藏高原、刚果(金)的刚果河流域、秘鲁的亚马孙河流域等区域正是传统认为区域水汽再循环过程较强的区域[47,48]，同时位于秘鲁和巴西的空中水资源

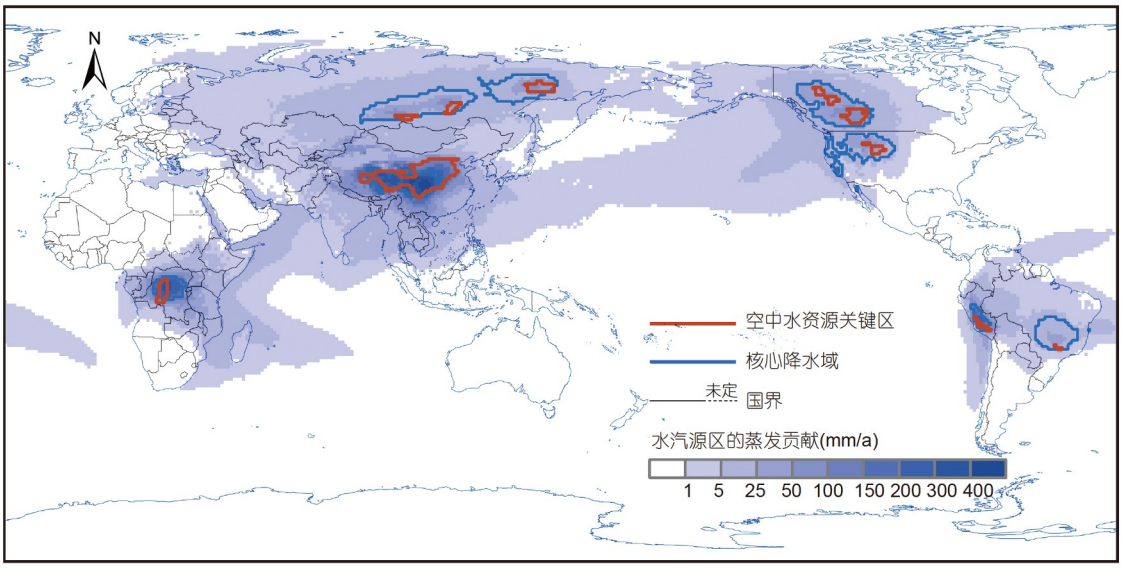


图 6 空中水资源关键区及其水汽源的分布
Figure 6 Spatial distribution of potential hotspots and their moisture sources

关键区也正是以往空中水资源研究的热点区域[49,50], 这也印证了本文划定的空中水资源关键区的可靠性. 中国空中水资源关键区的核心降水域几乎完全在关键区内, 关键区与核心降水域重合度极高. 因而中国空中水资源管理的实施区和受益区高度一致, 极大地减少了由于实施区和受益区空间不匹配带来的政策阻力, 为相关政策的制定带来了极大的便利. 而其他国家的空中水资源关键区与其水汽源区重合度低, 空中水资源关键区仅占其对应的核心降水域的部分区域, 可能导致相关政策制定和实施的驱动力不足.

3.2.2 空中水资源关键区及其核心降水域的社会生态情况

空中水资源关键区及其核心降水域的面积、土地覆被和人口密度信息, 可以反映这些区域的社会生态情况, 判断对这些地区进行空中水资源管理的价值, 确定更具空中水资源管理潜力的区域. 空中水资源关键区的土地覆被情况, 能体现该地区对空中水资源管理的需求, 如雨养农业对降水的需求大, 当空中水资源关键区为雨养农田时, 更需进行空中水资源管理. 而后续空中水资源管理具体政策的制定和施行, 也会考虑其核心降水域的土地覆被情况. 同时空中水资源关键区及其核心降水域的人口, 间接反映了政策受益区对水资源的需求及受政策影响的人口情况. 当空中水资源关键区人口大于其核心降水域, 即受益的人口多于被政策影响的人口时, 进行空中水资源管理可能更有价值. 各国空中水资源关键区及其核心降水域的面积、土地覆被和人口密度信息的示意图如图7所示, 具体信息如表1和2所示.

由图7、表1和2可见, 存在空中水资源关键区的所有国家中, 位于中国的空中水资源关键区的面积和人口密度最高, 也是唯一一个核心降水域人口密度和面积均小于空中水资源关键区的国家. 并且空中水资源关键区的主要土地覆被为农田和牧地, 对水资源的需求较大, 而其核心降水域主要土地覆被类型为牧地, 也有部分区域为农田和林地, 可见中国的空中水资源关键区及其核心降水域的土地覆被及人类活动复杂多样. 从实际管理看, 中国的空中水资源管理最值得重点关注和深入研究. 秘鲁空中水资源关键区面积超国土面积的十分之一, 人口密度中等, 主要土地覆盖为牧地. 对应核心降水域的主要土地覆被为牧地和林地, 该国土地政策倾向于砍伐森林发展农牧业, 以创造更多的经济价值[51], 因此水汽源的土地利用变化对该国关键区降水的影响值得关注. 位于巴西的关键区人口密度较高, 主要土地覆盖为雨养农田, 因此该地区对降水的需求大. 同时该国土地政策也倾向于砍伐森林发展农牧业, 以创造更多的经济价值[52], 其核心降水域的土地利用变化对关键区降水的影响同样值得关注. 但其关键区面积远小于核心降水域, 政策的制定和施行可能

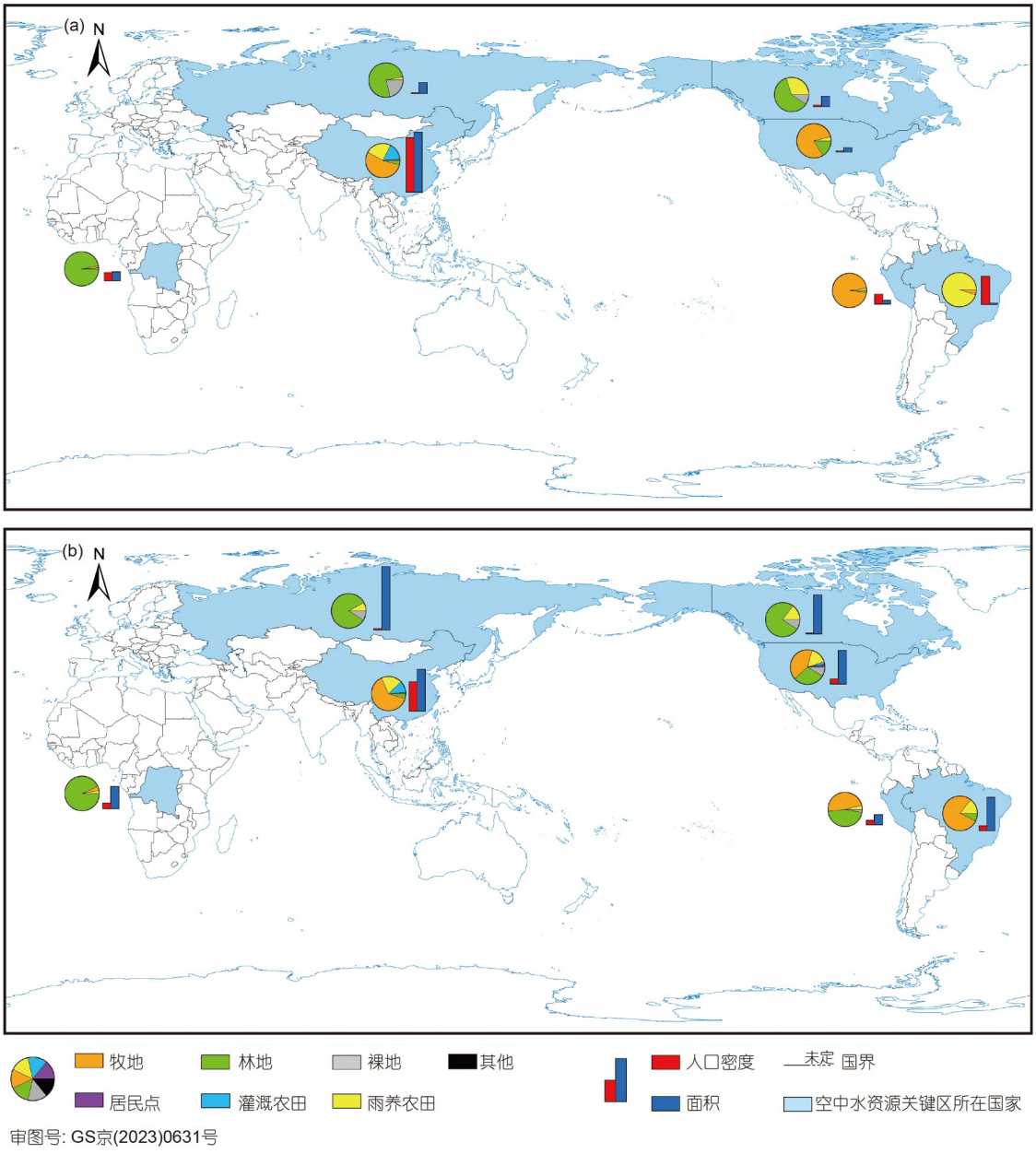


图 7 空中水资源关键区的社会生态情况(a)和核心降水域的社会生态情况(b)
Figure 7 Social-ecological conditions in potential hotspots (a) and social-ecological conditions in the core precipitationsheds (b)

存在较大阻力. 刚果(金)的空中水资源关键区范围超其国土总面积的十分之一，关键区及其核心降水域上的主要地表覆被都为森林, 人口密度中等, 关键区的人类活动略强于其对应的核心降水域. 森林砍伐可以创造经济价值，需在区域生态系统服务和经济价值创造的基础上, 进一步讨论该区域的空中水资源管理. 位于加拿大的空中水资源关键区中的农田对水资源有一定的需求，但空中水资源关键区及其核心降水域的人口密度都较低，对该地区进行空中水资源管理的必要性不高. 美国和俄罗斯的空中水资源关键区人口密度低, 其上的土地覆被对水资源的需求不强烈，对这些区域进行空中水资源管理的必要性较低.

4 讨论

本文定义的空中水资源关键区的“管理潜力”，实际上指的是当空中水资源关键区及其核心降水域基本

表 1 空中水资源关键区的人口密度及各类土地覆被的面积

Table 1 The population density and the area of different land covers in the potential hotspots

国家	人口密度 (人/km^2)	总面积 (10^4 km^2)	居民点面积 (10^4 km^2)	灌溉农田面积(10^4 km^2)	雨养农田面积(10^4 km^2)	牧场面积 (10^4 km^2)	林地面积 (10^4 km^2)	裸地面积 (10^4 km^2)	其他面积 (10^4 km^2)
中国	188.28	206.51	2.83	33.58	49.34	110.19	8.70	1.82	0.05
俄罗斯	0.76	35.05	0.02	0	1.07	0.19	26.34	7.42	0.01
秘鲁	31.52	10.82	0.02	0.02	0.23	10.27	0.22	0.06	0
巴西	90.94	3.47	0.03	0.01	3.26	0.17	0	0	0
刚果(金)	25.77	28.39	0.20	0	0.30	0.52	27.35	0.02	0
美国	1.83	13.46	0.06	0.07	0.50	10.71	2.11	0.01	0
加拿大	5.21	33.99	0.14	0	10.09	0.04	20.56	3.12	0.04

表 2 核心降水域的人口密度及各类土地覆被的面积

Table 2 The population density and the area of different land covers in the core precipitationsheds

国家	人口密度 (人/km^2)	总面积 (10^4 km^2)	居民点面积 (10^4 km^2)	灌溉农田面积(10^4 km^2)	雨养农田面积(10^4 km^2)	牧场面积 (10^4 km^2)	林地面积 (10^4 km^2)	裸地面积 (10^4 km^2)	其他面积 (10^4 km^2)
中国	111.23	158.82	1.92	17.30	30.30	100.70	7.07	1.07	0.46
俄罗斯	3.39	240.85	0.52	0	18.41	0.73	198.68	21.91	0.60
秘鲁	16.03	37.55	0.06	0.04	1.62	17.62	17.28	0.93	0
巴西	17.53	126.76	0.30	0.01	18.32	99.08	8.79	0.15	0.11
刚果(金)	22.06	85.23	0.41	0	2.59	3.41	78.49	0.32	0.01
美国	18.49	127.19	3.34	2.63	20.26	51.85	37.32	10.89	0.90
加拿大	2.66	148.25	0.34	0	21.39	0.30	112.61	13.46	0.15

由同一行政区控制时，政策施行的地区与受益的地区利益较为一致，后续制定的政策可执行性最大. 而当政策施行的地区与受益的地区不在同一行政区时，政策的制定和施行难度增加，往往需要国际合作[53]. 结合图4和5可以更清楚地看出，尤其对于非洲的许多国家，核心降水域中目标格网所在国家贡献比例较低，但核心降水域中陆源贡献比例较高且核心降水域的面积小，这意味着其他国家陆地的蒸发对该国降水非常重要. Gebrehiwot等人[54]的研究也表明，西非雨林的砍伐可能会对埃塞俄比亚高地的降水造成影响，进而影响埃及等国家的水资源. 因此，未来在空中水资源管理中，跨界空中水资源管理和国际合作也应纳入考虑. 同时本文划定的空中水资源关键区，主要依赖其核心降水域的特征. 而确定核心降水域的过程，仅考虑了水汽源区贡献水量的多少. 但是从蒸发到降水的水汽循环过程十分复杂[55]，陆源水汽供应的多少并不完全代表源区土地覆被变化对关键区降水会产生直接的影响[56]. 未来还需结合水汽循环的动力过程进行更深入的研究，以更好地构建空中水资源的源汇关系，更精细刻画空中水资源源区的土地覆被变化对空中水资源汇区的可能影响.

5 结论和展望

本文基于降水域的理论框架，定义了核心降水域的概念(为目标区域贡献40%降水的最重要水汽源区)，识别了核心降水域面积集中(<1.25×10^6 km^2)且本国陆源贡献为主(>95%)的区域，最终得到了全球空中水资源管理潜力的关键区. 并进一步分析了空中水资源关键区的水汽源汇关系，从政策制定和实施的角度，讨论了空中水资源关键区及其核心降水域的社会生态等属性. 研究发现，在全球划定的空中水资源关键区中，中国的空中水资源关键区范围最大、人口最多；源汇区域的土地覆被情况最复杂，可能存在的空中水资源管理政策的施行区和受益区最为一致，是所有空中水资源关键区所在国家中最具空中水资源管理研究价值的国家. 通过最新的数据和模型分析方法，本研究将中国识别为最具空中水资源管理潜力的国家，有助于从全球角度科学认识中国的水循环规律，有望为从更大尺度优化调控中国水资源战略布局提供科学支撑.

参考文献

1 Berger M, van der Ent R, Eisner S, et al. Water accounting and vulnerability evaluation (WAVE): Considering atmospheric evaporation recycling and the risk of freshwater depletion in water footprinting. Environ Sci Technol, 2014, 48: 4521–4528
2 Abbott B W, Bishop K, Zarnetske J P, et al. Human domination of the global water cycle absent from depictions and perceptions. Nat Geosci, 2019, 12: 533–540
3 Wei J, Dirmeyer P A. Sensitivity of land precipitation to surface evapotranspiration: A nonlocal perspective based on water vapor transport. Geophys Res Lett, 2019, 46: 12588–12597
4 van der Ent R J, Savenije H H G, Schaefli B, et al. Origin and fate of atmospheric moisture over continents. Water Resour Res Water, 2010, 46: W09525
5 van der Ent R J, Savenije H H G. Length and time scales of atmospheric moisture recycling. Atmos Chem Phys, 2011, 11: 1853–1863
6 van Noordwijk M, Ellison D. Rainfall recycling needs to be considered in defining limits to the world's green water resources. Proc Natl Acad Sci USA, 2019, 116: 8102–8103
7 Wang-Erlandsson L, Fetzer I, Keys P W, et al. Remote land use impacts on river flows through atmospheric teleconnections. Hydrol Earth Syst Sci, 2018, 22: 4311–4328
8 Wang G Q, Li T J, Li J Y, et al. Analysis of sky water resources in the source region and the upper-middle region of the Yellow River Basin (in Chinese). Yellow River, 2016, 38: 79–82 [王光谦, 李铁键, 李家叶, 等. 黄河流域源区与上中游空中水资源特征分析. 人民黄河, 2016, 38: 79–82]
9 McDonnell J J. Where does water go when it rains? Moving beyond the variable source area concept of rainfall-runoff response. Hydrol Process, 2003, 17: 1869–1875
10 Gao H, Sabo J L, Chen X, et al. Landscape heterogeneity and hydrological processes: A review of landscape-based hydrological models. Landsc Ecol, 2018, 33: 1461–1480
11 Li J Y, Li T J, Wang G Q, et al. Atmospheric water resource and precipitation conversion (in Chinese). Chin Sci Bull, 2018, 63: 2785–2796 [李家叶, 李铁键, 王光谦, 等. 空中水资源及其降水转化分析. 科学通报, 2018, 63: 2785–2796]
12 Dai Y J. Issues in research and development of land surface process model (in Chinese). Trans Atmos Sci, 2020, 43: 33–38 [戴永久. 陆面过程模式研发中的问题. 大气科学学报, 2020, 43: 33–38]
13 Xie Z, Liu S, Zeng Y, et al. A high-resolution land model with groundwater lateral flow, water use, and soil freeze-thaw front dynamics and its applications in an endorheic basin. J Geophys Res Atmos, 2018, 123: 7204–7222
14 Du B, Zuo H C, Yang Y, et al. Test of simulating effects for three land surface models Noah, SHAW and CLM4.0: Before and after a rainstorm (in Chinese). Arid Zone Res, 2016, 33: 38–48 [杜冰, 左洪超, 杨扬, 等. 3个陆面过程模式对一次暴雨前后的模拟性能检验与对比. 干旱区研究, 2016, 33: 38–48]
15 Peng D, Zhou T, Zhang L. Moisture sources associated with precipitation during dry and wet seasons over central Asia. J Clim, 2020, 33: 10755–10771
16 Yang K, Tang Q H, Lu H. Precipitation recycling ratio and water vapor sources on the Tibetan Plateau. Sci China Earth Sci, 2022, 65: 584–588 [阳坤, 汤秋鸿, 卢麾. 青藏高原降水再循环率与水汽来源辨析. 中国科学: 地球科学, 2022, 52: 574–578]
17 Chen F H, Chen J, Huang W. Weakened East Asian summer monsoon triggers increased precipitation in Northwest China. Sci China Earth Sci, 2021, 64: 835–837 [陈发虎, 陈婕, 黄伟. 东亚夏季风减弱诱发我国西北干旱区降水增加. 中国科学: 地球科学, 2021, 51: 824–826]
18 Gimeno L, Stohl A, Trigo R M, et al. Oceanic and terrestrial sources of continental precipitation. Rev Geophys, 2012, 50: RG4003
19 Li Y, Su F, Chen D, et al. Atmospheric water transport to the endorheic Tibetan Plateau and its effect on the hydrological status in the region. J Geophys Res Atmos, 2019, 124: 12864–12881
20 Su B D, Sun H M, Li X C, et al. Impact of climate change on terrestrial water cycle in China (in Chinese). Trans Atmos Sci, 2020, 43: 1096–1105 [苏布达, 孙赫敏, 李修仓, 等. 气候变化背景下中国陆地水循环时空演变. 大气科学学报, 2020, 43: 1096–1105]
21 de Vrese P, Hagemann S, Claussen M. Asian irrigation, African rain: Remote impacts of irrigation. Geophys Res Lett, 2016, 43: 3737–3745
22 Keys P W, Wang-Erlandsson L, Gordon L J. Revealing invisible water: Moisture recycling as an ecosystem service. PLoS One, 2016, 11: e0151993
23 Koster R D, Dirmeyer P A, Guo Z, et al. Regions of strong coupling between soil moisture and precipitation. Science, 2004, 305: 1138–1140
24 van der Ent R J, Wang-Erlandsson L, Keys P W, et al. Contrasting roles of interception and transpiration in the hydrological cycle—Part 2: Moisture recycling. Earth Syst Dynam, 2014, 5: 471–489
25 te Wierik S A, Cammeraat E L H, Gupta J, et al. Reviewing the impact of land use and land-use change on moisture recycling and precipitation patterns. Water Resour Res, 2021, 57: e2020WR029234
26 Ellison D, Morris C E, Locatelli B, et al. Trees, forests and water: Cool insights for a hot world. Glob Environ Change, 2017, 43: 51–61

27 O'connor J C, Dekker S C, Staal A, et al. Forests buffer against variations in precipitation. Glob Chang Biol, 2021, 27: 4686–4696
28 Sterling S M, Ducharne A, Polcher J. The impact of global land-cover change on the terrestrial water cycle. Nat Clim Chang, 2012, 3: 385–390
29 Gordon L J, Steffen W, Jönsson B F, et al. Human modification of global water vapor flows from the land surface. Proc Natl Acad Sci USA, 2005, 102: 7612–7617
30 Tuinenburg O A, Hutjes R W A, Stacke T, et al. Effects of irrigation in India on the atmospheric water budget. J Hydrometeorol, 2014, 15: 1028–1050
31 Dirmeyer P A, Brubaker K L. Evidence for trends in the Northern Hemisphere water cycle. Geophys Res Lett, 2006, 33: L14712
32 van Dijke A J H, Herold M, Mallick K, et al. Shifts in regional water availability due to global tree restoration. Nat Geosci, 2022, 15: 363–368
33 Creed I F, Jones J A, Archer E, et al. Managing forests for both downstream and downwind water. Front For Glob Chang, 2019, 22: 64
34 Keys P W, van der Ent R J, Gordon L J, et al. Analyzing precipitationsheds to understand the vulnerability of rainfall dependent regions. Biogeosciences, 2012, 9: 733–746
35 Keys P W, Wang-Erlandsson L, Gordon L J. Megacity precipitationsheds reveal tele-connected water security challenges. PLoS One, 2018, 13: e0194311
36 Mu Y, Biggs T W, De Sales F. Forests mitigate drought in an agricultural region of the Brazilian Amazon: Atmospheric moisture tracking to identify critical source areas. Geophys Res Lett, 2021, 48: e2020GL091380
37 Weng W, Luedeke M K B, Zemp D C, et al. Aerial and surface rivers: Downwind impacts on water availability from land use changes in Amazonia. Hydrol Earth Syst Sci, 2018, 22: 911–927
38 Weng W, Costa L, Lüdeke M K B, et al. Aerial river management by smart cross-border reforestation. Land Use Policy, 2019, 84: 105–113
39 Alter R E, Im E S, Eltahir E A B. Rainfall consistently enhanced around the Gezira Scheme in East Africa due to irrigation. Nat Geosci, 2015, 8: 763–767
40 Dirmeyer P A, Brubaker K L, DelSole T. Import and export of atmospheric water vapor between nations. J Hydrol, 2009, 365: 11–22
41 Keune J, Miralles D G. A precipitation recycling network to assess freshwater vulnerability: Challenging the watershed convention. Water Resour Res, 2019, 55: 9947–9961
42 Tuinenburg O A, Theeuwen J J E, Staal A. High-resolution global atmospheric moisture connections from evaporation to precipitation. Earth Syst Sci Data, 2020, 12: 3177–3188
43 Ellis E C, Ramankutty N. Putting people in the map: Anthropogenic biomes of the world. Front Ecol Environ, 2008, 6: 439–447
44 Keys P W, Barnes E A, van der Ent R J, et al. Variability of moisture recycling using a precipitationshed framework. Hydrol Earth Syst Sci, 2014, 18: 3937–3950
45 Miralles D G, Nieto R, McDowell N G, et al. Contribution of water-limited ecoregions to their own supply of rainfall. Environ Res Lett, 2016, 11: 124007
46 Hering J G, Sedlak D L, Tortajada C, et al. Local perspectives on water. Science, 2015, 349: 479–480
47 Link A, van der Ent R, Berger M, et al. The fate of land evaporation—A global dataset. Earth Syst Sci Data, 2020, 12: 1897–1912
48 Su T, Lu Z Y, Zhou J, et al. Spatial distribution and seasonal variation characteristics of global atmospheric moisture recycling (in Chinese). Acta Phys Sin, 2014, 63: 457–466 [苏涛, 卢震宇, 周杰, 等. 全球水汽再循环率的空间分布及其季节变化特征. 物理学报, 2014, 63: 457–466]
49 Staal A, Tuinenburg O A, Bosmans J H C, et al. Forest-rainfall cascades buffer against drought across the Amazon. Nat Clim Chang, 2018, 8: 539–543
50 Zemp D C, Schleussner C F, Barbosa H M J, et al. On the importance of cascading moisture recycling in South America. Atmos Chem Phys, 2014, 14: 13337–13359
51 Keys P W, Wang-Erlandsson L. On the social dynamics of moisture recycling. Earth Syst Dynam, 2018, 9: 829–847
52 Souza Jr C M, Z Shimbo J, Rosa M R, et al. Reconstructing three decades of land use and land cover changes in Brazilian biomes with landsat archive and Earth engine. Remote Sens, 2020, 12: 2735
53 Voeroesmarty C J, Hoekstra A Y, Bunn S E, et al. What scale for water governance? Science, 2015, 349: 478–479
54 Gebrehiwot S G, Ellison D, Bewket W, et al. The Nile Basin waters and the West African rainforest: Rethinking the boundaries. Wiley Interdiscip Rev Water, 2018, 6: e1317
55 Zhang Y, Huang W, Zhang M, et al. Atmospheric basins: Identification of quasi-independent spatial patterns in the global atmospheric hydrological cycle via a complex network approach. J Geophys Res Atmos, 2020, 125: e2020JD032796
56 Wei J, Dirmeyer P A, Bosilovich M G, et al. Water vapor sources for Yangtze River Valley rainfall: Climatology, variability, and implications for rainfall forecasting. J Geophys Res Atmos, 2012, 117: D05126

Summary for “全球空中水资源管理潜力的关键区识别与源汇分析”

Identifying potential hotspots for atmospheric water resource management and source-sink analysis

Bomei Zhang[1], Hongkai Gao[1,2*] & Jiangfeng Wei[3,4]

[1] *School of Geographic Sciences, East China Normal University, Shanghai 200241, China;*
[2] *Key Laboratory of Tibetan Plateau Earth System, Environment and Resources, Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;*
[3] *Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters/Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education/International Joint Research Laboratory on Climate and Environment Change, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;*
[4] *School of Atmospheric Sciences, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China*
* Corresponding author, E-mail: hkgao@geo.ecnu.edu.cn

Traditional water resource management is in the boundary of natural catchments. For catchment water balance, the precipitation is the amount of input, the runoff is the available water resource for society, and evaporation is considered a loss item. However, increasing evidence demonstrates that evaporation in the global terrestrial scale dominates the partition of precipitation, accounting for 60% of precipitation, which is much larger than the amount of runoff (40% of precipitation). In addition, the evaporated water vapor does not disappear, but is likely to fall as precipitation in other areas. The complex cycling and feedback between terrestrial evaporation and precipitation is called terrestrial moisture recycling. Atmospheric water resources can be defined as moisture that evaporates into the atmosphere and eventually falls as terrestrial precipitation. Theoretically, land cover change caused by human activities can directly affect land evaporation, which may affect the downwind precipitation through the terrestrial moisture cycle. However, the travel distance of atmospheric water vapor often exceeds the scale of most basins. Owing to the complexity and even the randomness of moisture recycling, the possibility of atmospheric water resource management is debated and largely untouched in traditional water management. Hence, it is important to identify the potential hotspots for atmospheric water resource management and clarify their complex source-sink relationship. Bridging this knowledge gap is beneficial to integrating atmospheric water resources into the traditional water resource management framework. In this study, based on the framework of precipitationshed, we developed the concept of “core precipitationshed”, which is the most central and influential moisture source region, contributing 40% of precipitation to the target area. The process of obtaining the core precipitation area is as follows: First, the moisture source contribution depth (mm/a) is sorted from largest to smallest, then the cumulative contribution based on this ranking is calculated, and finally the area with a cumulative contribution rate of 40% is classified as the core precipitation area. On a global scale, we used the UTrack moisture recycling dataset with a spatial resolution of 1° × 1° to calculate the core precipitationshed for each grid. Furthermore, we identified potential hotspots for atmospheric water resource management with a relatively small core precipitationshed area (less than 1.25 million km^2) and dominant moisture source from the same national territory (more than 95%). The smaller the precipitationshed area, the less area required to manage land use, and the less difficult it is to manage atmospheric water resources. In the core precipitationshed, the higher the moisture contribution ratio from land in the same nation, the larger potential for land cover change, through the development and implementation of land policies. Results show that central China, southeastern Russia, central Democratic Republic of Congo, southern Brazil, western Peru, northwestern USA, and western Canada have larger potential for managing atmospheric water resources. For the potential hotspots, we further analyzed their source and sink characteristics, including national boundaries, land cover, and population. Notably, we identified that China has the largest potential hotspot area for atmospheric water resource management. China not only has the largest and most concentrated core precipitationshed area with the moisture source region from the same national territory but also the most intensive human activities that greatly influence land use and water cycle in both local and downwind regions. This study provides a new perspective to understand China’s water resources in the framework of the global water cycle and has great potential to benefit the conservation and optimization of China’s integrated water resource management.

core precipitationshed, atmospheric water resource, moisture recycling, management potential, land policy

doi: 10.1360/TB-2022-1275