科学通报 2019 年 第 64 卷 第 27 期: 2830 ~ 2841
专辑: 第二次青藏高原综合科学考察研究 评 述
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS

青藏高原“亚洲水塔”效应和大气水分循环特征

徐祥德[1*], 董李丽[1,2*], 赵阳[1], 王寅钧[1]

1. 中国气象科学研究院, 灾害天气国家重点实验室, 北京 100081;
2. 国家气候中心, 北京 100081

* 联系人, E-mail: xuxd@cma.gov.cn; dlldsflsm@foxmail.com

2019-06-17 收稿, 2019-08-05 修回, 2019-08-06 接受, 2019-09-20 网络版发表
国家重大科学研究计划(2019QZKK0100)、国家自然科学基金重大计划(91337000)、中国气象科学研究院科技发展基金(2018KJ019)和中国气象科学研究院基本科研业务费专项(2018Y008)资助

摘要 青藏高原是东亚海陆气相互作用最敏感的地区之一. 青藏高原大气水分循环结构特征不仅反映了西风气流与“大三角扇形”影响域季风水汽流的相互作用特征, 而且凸现出该区域为全球能量、水汽的交换关键区, 构成“亚洲水塔”形成的重要背景; 隆升的高原地形和强大的表面辐射加热形成了局地上升对流和高耸入对流层中部中空“热源柱”. 研究揭示出此“热力驱动”下青藏高原高、低层互为反环流类似台风的自激反馈机制, 其提供了“亚洲水塔”水汽“汇流”与抽吸动力效应. “亚洲水塔”热源驱动机制有助于“世界屋脊”大气“热岛”、“湿岛”的形成和维持, 使暖湿气流从低纬海洋向高原输送、汇聚. 针对“世界屋脊”高原对流频繁、云降水异常特征, 揭示出“世界屋脊”空气低密度条件对高原对流云的触发效应. 分析表明, 低纬热带海洋成为“亚洲水塔”大气水分循环的重要水汽源区, 水汽源区可跨越赤道追踪到南半球. 提出了青藏高原“热力驱动”下大气水分循环结构类似全球性大气“水塔”的观点, 青藏高原特殊的跨半球大气水分循环构建出“亚洲水塔”和其周边地区独特的大气-水文功能体系. 给出了西风与季风协同作用背景下青藏高原为核心区的陆地-海洋-大气相互作用的“亚洲水塔”大气水分循环物理图像.

关键词 青藏高原, 亚洲水塔, 大气水分循环, 热力驱动机制, 空气密度, 物理图像

青藏高原被称为“世界屋脊”, 世界上96座超过7000 m的高山, 有94座围绕青藏高原分布[1]. 青藏高原夏半年降水占全年总降水量的60%左右, 而冬半年降水则以积雪形式存储, 提供夏季河流径流的潜在水源; 在东亚和印度季风驱动下暖湿气流是高原主要水汽来源. 青藏高原不仅是亚洲与世界著名大江大河的源头, 而且是中国与亚洲湖泊、湿地聚集地[2~4](图1). 青藏高原现有湖泊占全国湖泊总面积的52%, 是地球上海拔最高的湖泊群[5,6]. 青藏高原现代冰川条数占我国现代冰川总条数的80%, 冰川面积占我国冰川总面积的84%, 冰川冰储量占我国冰川总储量的80%[1]. Lu等人[7]的研究表明, 冰川融水构成中国青藏高原总径流量的7.2%.

青藏高原拥有冰川、积雪、冻土, 被誉为地球中低纬度高海拔永久“冻土和山地冰川王国”, 构成了可以与南、北极相提并论的地球“第三级”[8]. 数以千计的冰川遍布在这一高原“台地”上, 伴随着高原隆起演化形成的大量冰川和积雪, 融化的冰川和大气降水源源不断地形成径流持续供应给湖泊与河流[9,10]. 青藏高原是中国及周边地区许多大江大河的发源地, 如长江、黄河、印度河、湄公河和恒河, 这类似维持一个庞大的中空“蓄水池”, 其河流水资源为近40%的世界人口供给生活、农业和工业用水.

有关研究指出, 青藏高原是“亚洲水塔”, 是我国重要的生态安全屏障、战略资源储备基地[11]. 在我国气

引用格式: 徐祥德, 董李丽, 赵阳, 等. 青藏高原“亚洲水塔”效应和大气水分循环特征. 科学通报, 2019, 64: 2830–2841
Xu X D, Dong L L, Zhao Y, et al. Effect of the Asian Water Tower over the Qinghai-Tibet Plateau and the characteristics of atmospheric water circulation (in Chinese). Chin Sci Bull, 2019, 64: 2830–2841, doi: 10.1360/TB-2019-0203

© 2019《中国科学》杂志社

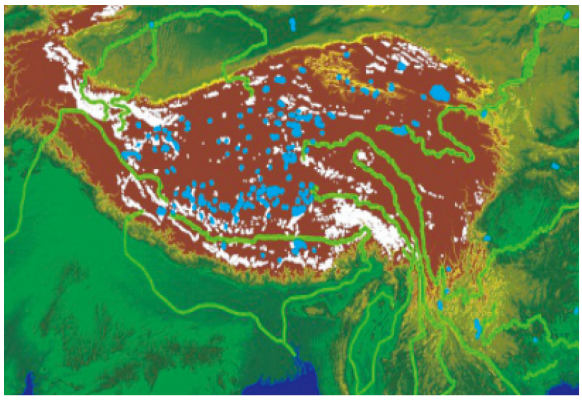


图 1 高原及周边水源资源地理分布. 冰川积雪(白色)、河流(黄色)和湖泊(浅蓝)

Figure 1 Geographical distribution of water resources in plateau and its surrounding areas. Glacier snow (white), rivers (yellow) and lakes (light blue)

候系统稳定、水资源供应、生物多样性保护等多方面具有重要的生态安全屏障作用[12]. 由此, 我们需思考青藏高原“亚洲水塔”水分循环过程如何驱动低纬海洋远距离水汽输送, 它是如何将低纬海洋丰富的水汽“抽吸”汇聚到位于对流层中部的“世界屋脊”? 使青藏高原这“亚洲水塔”蕴藏着如此丰富的水资源储量. 高原异常活跃对流活动与降水频发区中的关键“机制”是什么? 青藏高原“亚洲水塔”水资源的大气与海洋“供水系统”如何构造? 高原大地形及其热力强迫在跨南北半球的能量、水循环的交换、输送过程扮演着何类角色? 如何深化认知青藏高原“亚洲水塔”水分循环过程及其驱动机制仍是当前大气、水文及地球科学界具有挑战性的问题.

1 高原-海洋季风活跃区“大三角扇形”水汽输送影响域

青藏高原“亚洲水塔”的水汽“供应区”: 水汽源区, 亦是水分循环过程关键因素. 徐祥德等人[13]提出了青藏高原与低纬海洋季风活跃区水汽输送“大三角扇形”关键影响域的概念模型, 如图2(a)所示. 亚洲季风爆发相关的水汽通道, 例如高原东南周边水汽流“大拐弯”水汽输送、东亚季风水汽流与中、低纬海洋潜热源水汽流的相互作用, 尤其活跃的中低纬能量、水分交换都突出表现在这一“大三角扇形”区域.

图2(b)给出的是1979~2018年的多年平均夏季整层水汽通量矢量场. 由图可见, 东起菲律宾以东洋面, 经过南中国海, 西至东非索马里、阿拉伯海、印度洋, 并从孟加拉湾经青藏高原东部转向中国长江流域和日本列岛“大三角扇形”水汽输送影响域, 是影响中国区域及其下游东亚区域降水异常水汽输送关键区. 亦是亚洲季风过程高原-海洋水分循环相互作用的主体敏感区. 上述高原南侧“大三角扇形”水汽输送影响域构成了“亚洲水塔”的关键“水汽供应区”.

有关研究表明: 大地形热力驱动与动力强迫导致高原周边水汽输送在高原南侧与东侧存在经向或纬向不同分量的水汽流型, 是影响长江流域梅雨期水汽收支的一个关键因子, 构成亚洲季风活动及其中国区域旱涝的强信号区[13~16]. 高原动力、热力强迫是“大三角扇形”水汽输送影响域形成的重要原因之一. 高登义等人[17,18]指出, 从印度沿雅鲁藏布河谷存在深入高原主体的水汽通道, 1979年青藏高原科学试验研究进一步证实此认知. 分析卫星遥感GMSTBB云结构演变特征, 采用细网格地形尺度效应模拟试验, 研究结果可描述出高原复杂山谷群小尺度地形(30 km)对水汽输送结构影响显著. 数值试验亦揭示出从雅鲁藏布江河谷进入高原东南部的水汽通道[19], 如图2(b)所示, 计算分析的整层水汽输送“大三角扇形”影响域可描述出高原雅鲁藏布江河谷区亦为源自低纬海洋偏南暖湿水汽流进入高原的主要通道(图中箭头所示).

2 青藏高原“亚洲水塔”跨半球尺度大气能量、水汽交换

通过青藏高原热力驱动下源自低纬海洋水汽汇合机制问题的研究, 学者们对夏季青藏高原大地形机械屏障和抬升热源的作用有了更深刻的认识. 如青藏高原的“感热气泵”(sensible heat driven air pump, SHAP)效应, 不仅对ASM(Asian summer monsoon)的维持有重要作用, 也通过激发Rossby波列对全球气候产生影响[20~23]. 计算纬向平均比湿垂直剖面图特征, 分析研究表明, 北半球东-西垂直剖面上两大地形青藏高原与落基山均表现出与地形坡面高度相关“东湿西干”的“水塔抬升”非对称“湿岛”结构现象. 计算分析[24]亦表明青藏高原表现出随地形坡面高度相关“南湿北干”、“水塔抬升”现象(图S1(a), (b)).

Xu等人[25]从跨半球尺度大气能量、水汽交换的视角研究了高原区域相关联的纬向、经向垂直环流结构. 研究发现, 夏季南北半球跨赤道气流低层(850 hPa)强偏南气流出现在东亚地区及北美区域, 高层(200 hPa)强偏北气流亦出现在东亚与北美洲地区, 且此两个跨

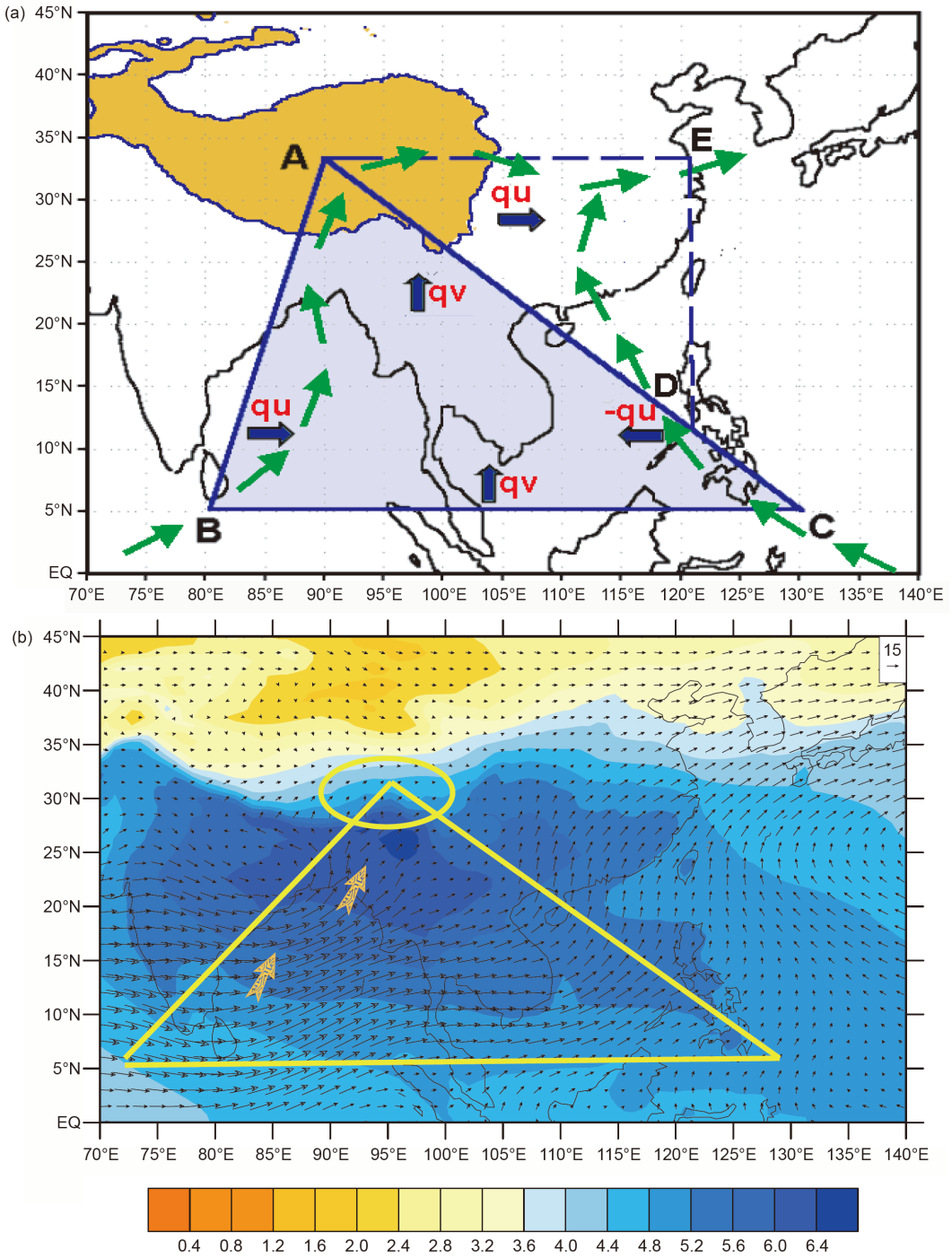


图 2 高原-季风水汽输送“大三角扇形”影响关键区. (a) 高原“大三角扇形”水汽输送概念模型示意图; (b) 1979~2018年高原-季风水汽输送“大三角扇形”整层水汽输送关键区与影响域, 填色为夏季整层水汽含量, 矢量为整层水汽输送通量

Figure 2 Key regions influenced of the plateau-monsoon water vapor transportation “large triangular sector”. (a) Schematic diagram of the conceptual model for water vapor transport in the “large triangular sector” of the plateau; (b) key regions and areas influenced of the plateau-monsoon water vapor transportation “large triangular sector” full-layer water vapor transport in the summers of years 1979–2018. The contours are summer full-layer water vapor while the vectors are integrated water vapor transport flux

赤道极值区, 均与青藏-伊朗高原、落基山分别处于亚洲与北美高原位置相关. 从行星尺度垂直环流特征的视角分析表明, 青藏高原大地形构造了跨半球尺度的平均垂直经圈和纬圈环流, 如图3(a)所示. 沿80°~110°E

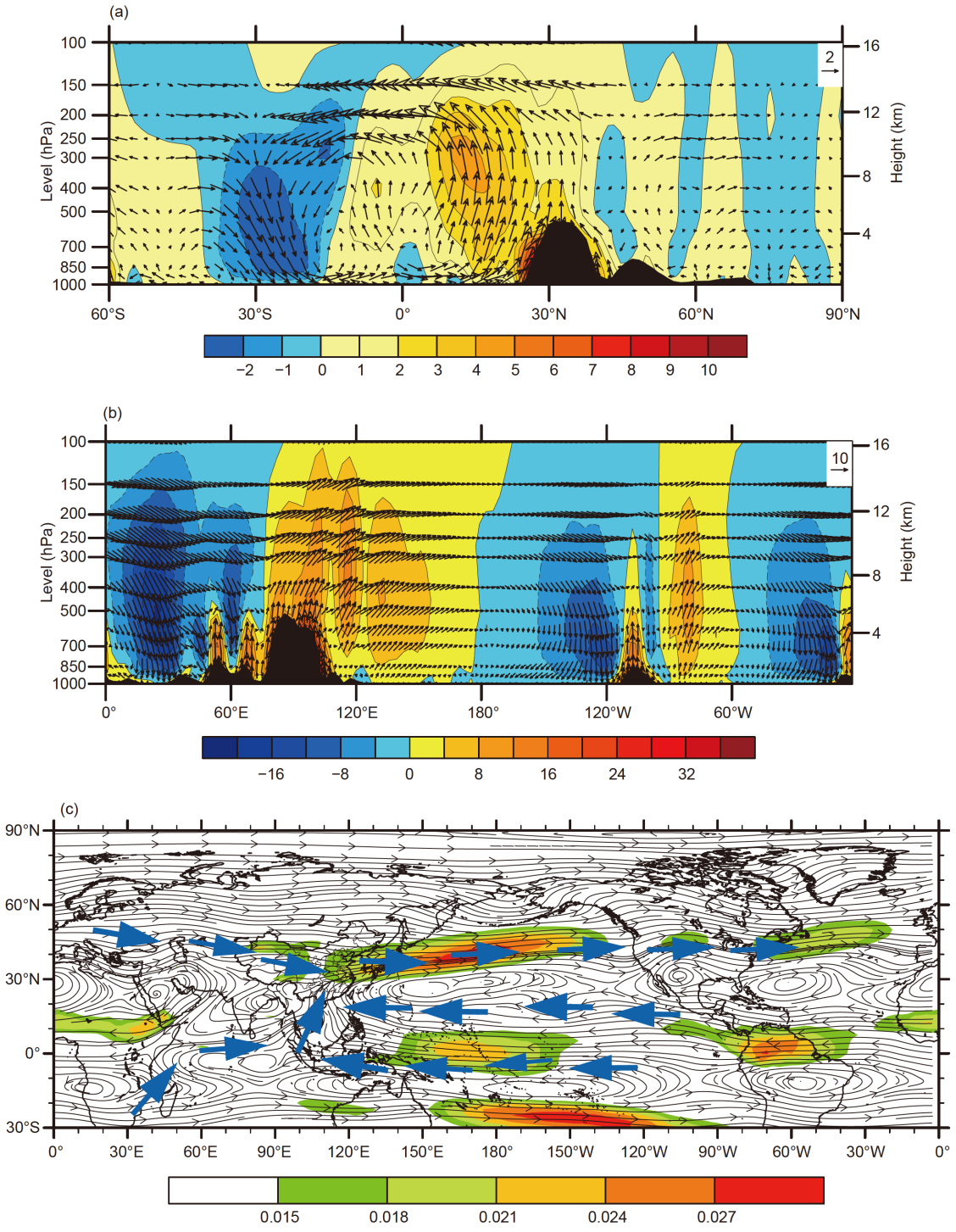


图 3 青藏高原大气水分循环三维结构. (a) 1948~2018年夏季80°~110°E经度带平均经向风速和垂直速度的高度-纬度剖面图(单位: m s^{-1}, 彩色阴影为垂直速度); (b) 夏季27.5°~35°N纬度带平均纬向风速和垂直速度的高度-经度剖面图(单位: m s^{-1}, 彩色阴影为垂直速度); (c) 北半球500 hPa水汽传输方向及大小(彩色阴影, 单位: m s^{-1} kg kg^{-1}), 采用ERA-interim逐月资料计算

Figure 3 Three-dimensional structure of atmospheric water circulation on the Qinghai-Tibet Plateau; mean values in the Qinghai-Tibet Plateau from June to August in years 1948−2018. (a) Height-latitude profile of mean values of meridional wind speed and vertical speed in the longitude range of 80°−110°E (unit: m s^{-1}, the colored shadows are vertical speeds); (b) height-longitude profile of mean values of zonal wind speed and vertical speed in the latitude range of 27.5°−35°N (unit: m s^{-1}, the colored shadows are vertical speeds); (c) 500 hPa water vapor transport directions and magnitudes in the northern hemisphere (the colored shadows, unit: m s^{-1} kg kg^{-1}), Era-interim monthly data were used for calculation

南-北向风场垂直剖面, 高原南侧低层(850 hPa)呈跨赤道强偏南气流, 高原区域为强上升支, 高层(300~100 hPa)则呈显著的偏北气流, 且该支气流下沉区位于沿20°S南印度洋. 高原及南侧形成了显著的南-北向跨半球尺度经圈环流, 在跨半球尺度能量、水分循环的交换、输送过程中起着关键的作用. 如图3(b)所示, 沿27.5°~35°N的东-西向风场垂直剖面图上高原与落基山东侧均有一显著的纬圈环流, 青藏高原大地形东侧环流圈中高原为上升支, 高原300~100 hPa偏西气流显著, 且下沉区位于落基山西侧. 落基山东侧环流结构亦类似青藏高原特征, 但上述两纬圈环流尺度大不相同, 其中青藏高原东侧环流圈呈显著的跨半球尺度特征, 落基山东侧环流尺度相对小得多[26].

青藏高原及周边地区夏季受到热带季风、副热带季风以及高原季风的共同影响, 其水汽既有来自南侧孟加拉湾、西南侧阿拉伯海、东南侧南海和西太平洋地区的, 还有来自中纬度的偏西风水汽输送, 是一个水汽输送的复杂区、敏感区[27~31]. 图3(c)为1948~2018年6~8月青藏高原500 hPa水汽通量矢量分布, 青藏高原中部亦呈显著地偏西水汽流. 图3(c)可描述出西风与偏南季风向高原汇合的水汽流显著特征, 西风与季风(西南与东南水汽流)在高原汇合后主体输出方向转向东, 且与东亚夏季风西南向协同影响下游区域水汽流, 即青藏高原与东亚中纬区域指向北美洲显著的东-西向水汽输送通量带状高值区. 从这个分布可以清楚地看到, 青藏高原大气水分循环过程亦不仅反映了西风与“大三角扇形”影响域[13]季风水汽输送的相互作用特征, 而且描述了南北半球能量、水汽的交换效应. 由夏季地球向外长波辐射(outgoing longwave radiation, OLR)分布表现出自低纬海洋向青藏高原延伸的高原-海洋“连体”大范围季风“三角区”对流云区域特征, 构成来自低纬海洋水汽输送背景下青藏高原降水对流云团高频区, 青藏高原水汽输送通道及其对流云团亦是影响中国区域旱涝形成的重要因子[25,31]. Chen等人[32]研究指出, 青藏高原的水汽源区在短时间内(1 d)分别来自高原西北侧和孟加拉湾、印度次大陆. 这与徐祥德等人[13]提出的季风水汽输送“大三角扇形”影响域源来自孟加拉湾、阿拉伯海及其南海的三支主体水汽流分布特征相似. 而较长时间(10 d)的水汽源区从阿拉伯海地区向低纬度海洋区域扩展, 可以跨越赤道追踪到南半球, 说明阿拉伯海及其向南区域是青藏高原地区的持续水汽输送的源区. 这证实了Xu等人[24,25]提出的青藏高原跨半球大气水分循环结构. 因此, 青藏高原作为“亚洲水塔”在区域乃至全球大气水分循环中扮演重要角色.

3 “亚洲水塔”水分循环“热驱动”效应

由于亚洲夏季风是世界上最大和最显著的季风, 其强度变化可能对全球气候和气候系统产生深远的影响[33~35]. 作为一个巨大的占中国国土面积约1/4的“高架陆地”、“平台”, 青藏高原形成了一个“嵌入”对流层中部大气的巨大的柱状热源, 可以伸展到自由大气. 文献[20]曾提出青藏高原作为“热岛”, 其热力强迫影响大气环流结构的观点. 1992年夏季在珠穆朗玛峰地区记录到的瞬时总辐射量达到1688 W/m^2, 超过了太阳常数的23%[36,37].

青藏高原是全球超太阳常数的极值区域之一, 亦是太阳总辐射值最大的区域之一, 高原气温较周边同高度自由大气高出4~6°C, 甚至10°C[38]. 占亚洲六分之一面积的青藏高原, 高原总辐射量为世界上最大的地区, 高原为异常太阳常数高频区, 远大于北半球热带和副热带沙漠地区太阳总辐射量极值[1,39,40]. 由于其强太阳辐射异常区, 巨大太阳辐射热量储存的高原, 对全球与区域大气环流系统变化的动力“驱动”效应可以说难以估计. 值得探讨的是, 青藏高原异常感热及其特殊的大气热源结构与亚洲水塔水分循环特征是否存在显著的关联性?

图4(a)为500 hPa纬向偏差温度场, 与同纬度相比, 青藏高原低层呈显著的全球唯一的“热岛”特征, 1948~2018年青藏高原“热岛”(高温中心区域)气温多年平均纬向偏差值可达4.5°C以上. 无疑, 占中国约1/4面积持续存在如此强度的热岛已超越了世界上任何超级城市群落所产生的热力效应. 从1979~2018年气温纬向偏差27.5°~35°N东-西向垂直剖面图(图5(a))可发现, 夏季高原随着高度抬升大地形热岛特征不仅未削弱, 在某些高度却趋于显著. 尤其令人惊奇的是, 青藏高原“中空热岛”300~100 hPa呈类似台风第二类条件不稳定(conditional instability of second kind, CISK)机制中的高层“蘑菇云”、“暖心”结构(气温纬向偏差高值区). 亚洲青藏高原为北半球的中空热岛显著区, 这一结构对低层水汽汇合辐合机制维持具有关键作用[25]. 另外, 全球500 hPa以上整层水汽含量场(图4(b))亦可描述出青藏高原为全球唯一的“湿岛”特征, 这反映青藏高原亦是全球对流层云降水核心区.

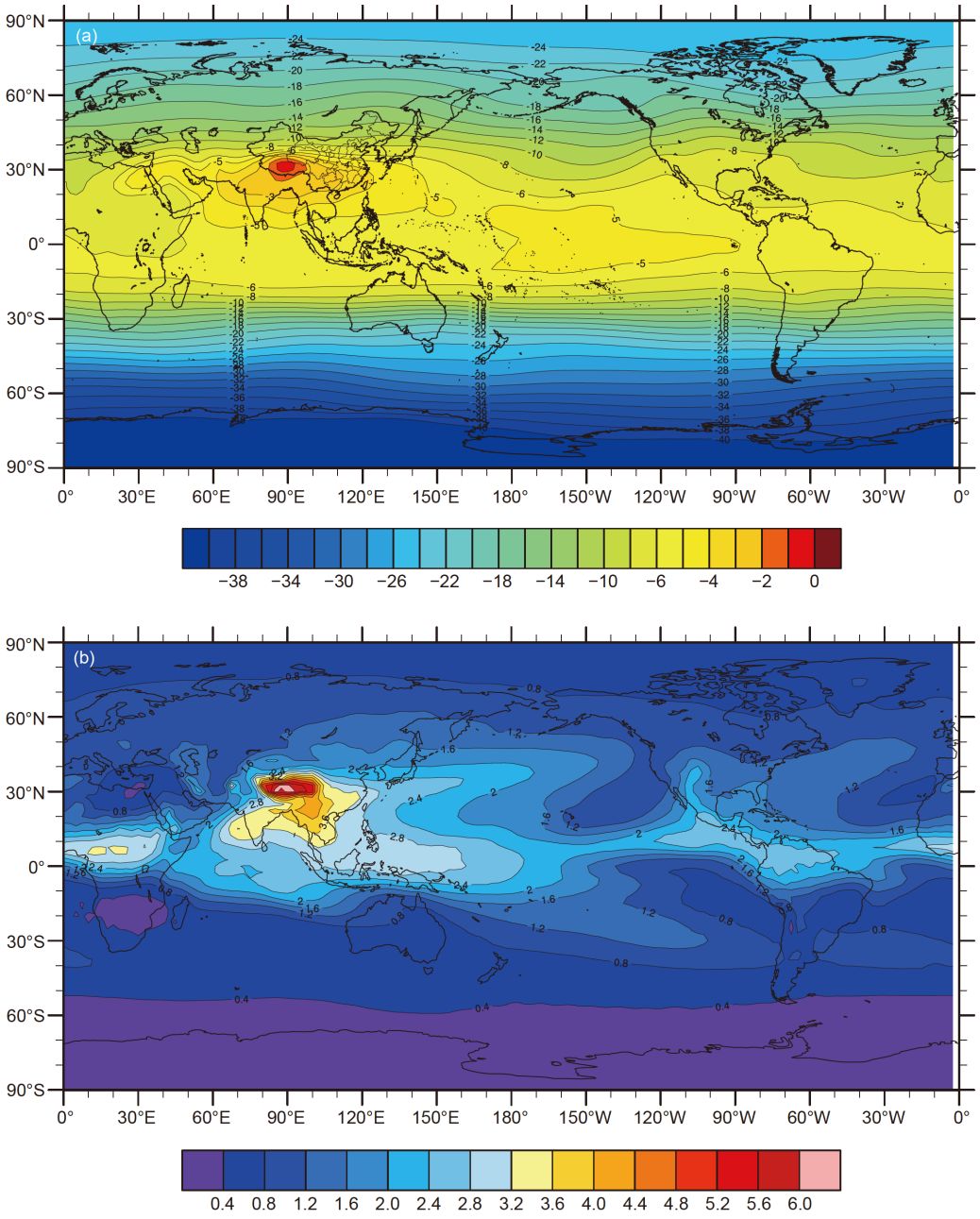


图 4 青藏高原温湿结构特征. (a) 1948~2018年夏季500 hPa气温场(单位: °C); (b) 500 hPa比湿场(单位: g/kg)
Figure 4 Temperature humidity structure of Qinghai-Tibet Plateau. (a) 500 hPa temperature field for the summers of years 1948−2018 (unit: °C); (b) 500 hPa specific humidity field (unit: g/kg)

卫星遥感动态图像发现上层对流云团往往围绕高原中心做顺时针旋转, 显然其与高原区域高层反气旋环流系统相关联. 通过欧洲中期天气预报中心细网格资料获取200, 500 hPa流函数解析风场, 分析发现, 与视热源相关的低层500 hPa涡度场高原区域, 呈逆时针旋转气旋环流, 高层200 hPa则明显为顺时针旋转反气旋环流(图5(b)). 上述分析结果揭示出高、低层互为反向环流结构, 其类似台风“CISK”、“热泵”效应, 显然此类似台风结构三维立体的环流系统与夏季高原特殊“空中热岛”的驱动效应密切相关. 青藏高原热力驱动产生的经圈环流不仅破坏了该地区的Hadley环流, 造成青藏高原“亚洲水塔”不断从赤道和热带捕获水汽, 使得热带海洋成为“亚洲水塔”大气水分循环的重要水汽源区.

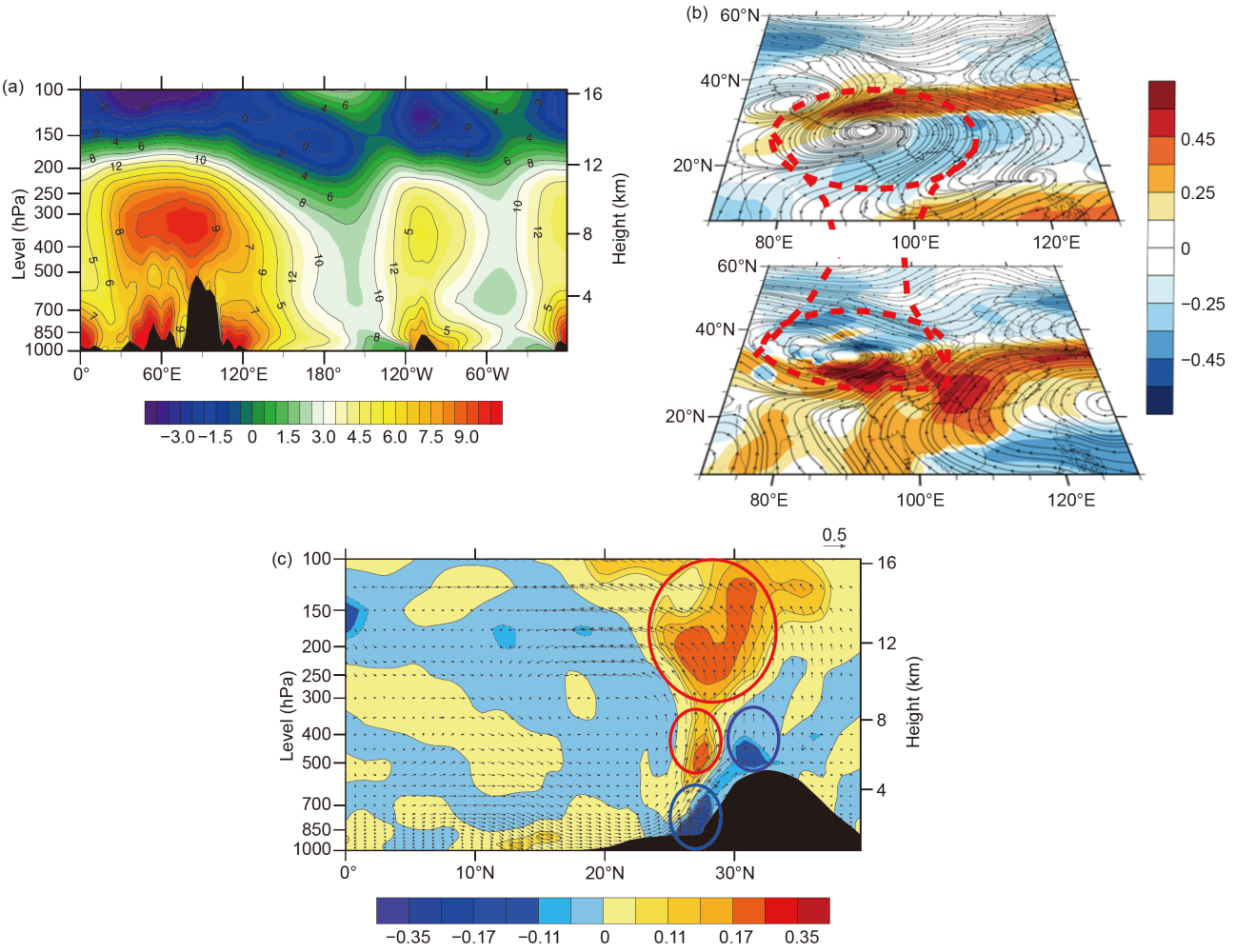


图 5 青藏高原热源结构影响及其动力效应. (a) 1979~2018年夏季27.5°~35°N东-西向气温纬向偏差垂直剖面图; (b) 1979~2018年夏季青藏高原视热源与东亚地区水汽输送通量高(200 hPa)、低层(500 hPa)相关矢场; (c) 2009~2018年7月逐日样本沿80°~100°E平均夏季青藏高原整层视热源(Q1)与散度相关及经圈环流相关的垂直剖面分布

Figure 5 Heat sources in the Qinghai-Tibet Plateau and its dynamic effect. (a) Vertical profile of zonal temperature anomalies in the east-west direction in the latitude range of 27.5°−35°N in the summers of years 1979−2018; (b) correlated vector fields of high (200 hPa) and low (500 hPa) layers of apparent heat sources in the Qinghai-Tibet Plateau and water vapor transport flux in the East Asia region during the summers of years 1979−2018; (c) vertical profile distribution of daily samples along the longitude range of 80°−100°E in July of years 2009−2018 with summer full-layer heat sources in the Qinghai-Tibet Plateau (Q1) related to divergence and meridional circulation

Xu等人[25]基于高原观测和NCEP资料的分析，将驱动海洋上空水汽的青藏高原热源结构影响作为切入点，探讨形成青藏高原这一“世界水塔”的动力与热力三维结构，揭示出青藏高原水汽爬升“热驱动力”，以及高层潜力释放的类似台风“CISK”的自激反馈机制. Xu等人[41]提出夏季青藏高原整层视热源(热源柱)导致高层辐散驱动低层水汽流辐合，形成高、低层互为反向环流结构自激反馈的“两阶梯爬升模型”. 高原南坡顶的辐散中心和高原平台上的低空辐合中心之间的水平位置相邻且动力相互支持，将这两阶梯的“耦合”连成一个体系. 研究发现，在青藏高原南坡与主体平台存在低层辐合-高层辐散两对阶梯式“耦合”结构，可构成两者协同驱动暖湿气流在南坡爬升，及其高原主体水汽“抽吸”的综合物理特征(图5(c)). 在亚洲水分循环过程中，从热带海洋水汽源区到“世界屋脊”大气之间的水汽传输主要由南亚和东亚夏季风对流层环流引导，共同驱动水汽的高原爬升，供给“世界水塔”[25].

4 青藏高原“世界屋脊”对流触发重要机制

长江洪涝过程中青藏高原地区中部和东部出现

“爆米花”状对流云高频突发现象(图S2(a), (c)). 夏半年高原上空大气的物理属性与赤道低纬地区有许多相似之处. 青藏高原东部夏季旺盛的中尺度对流活动和巨大的积雨云的“烟囱效应”向上层大气持续地输送着热量和水汽[42]. 从动力学角度讲, 在对流边界层中浮力是驱动湍流的主要机制, 这种湍流不是完全无规则的, 而往往是有组织形成热泡和卷流之类可识别的结构[43,44]. 分析TIPEX试验中当雄边界层加强观测期声雷达资料, 亦发现窄长的对流热泡特征(图S2(b)). 高原地区作为中国区域积云高频发生地(极值区)之一, 其地区高频对流云的形成与发展是否与空气密度小及其湍流驱动机制存在某种联系? 更多的低云出现在青藏高原高海拔地区低空气密度条件下, 可以发现低云覆盖度超过50%的地区主要出现在青藏高原中东部地区, 以及中国西南和华南局部地区. 且水汽相对比较充足的广大中国东部季风区低云覆盖度显著低于青藏高原中东部地区. 青藏高原在30°N以北相对湿度低于70%的条件下仍然出现大片低云覆盖度大于35%的区域, 然而低海拔地区却不存在上述现象. 通过分析1961~2015年夏季中国区域地面观测站低云量资料可发现, 雅鲁藏布江、三江源与高原东南缘区域是中国区域低云量的极值区, 这表明雅鲁藏布江河谷区是高原对流云最为活跃的区域(图S2(d)).

本文使用Heus等人[45]给出的荷兰大气大涡模拟模式(Dutch atmospheric large-eddy simulation, DALES). 使用6.4 km×6.4 km×6.0 km共128×128×150个网格点, 总模拟时间为50400 s. 控制试验100%ρ中空气密度ρ大体对应青藏高原那曲地区的情况, 地面海拔4.5 km, 地面气压为580 hPa. 3个在不同空气密度条件下的敏感性试验(120%ρ, 140%ρ, 170%ρ)为空气密度增加到控制试验120%, 140%, 170%倍的情况. 所有数值试验的温度和相对湿度的垂直廓线相同.

模拟中午14:00~14:30积云三维空间分布, 图S3(a, b)为控制试验空气密度100%, 图S3(c, d)为空气密度增加到140%敏感试验. 对比图S3(a, b)与图S3(c, d)可见, 对应空气密度不同的大涡模拟试验的积云三维空间结构呈显著差异. 大涡模拟发现积云在低空气密度条件下发展更快. 云底高度h_{base}和云顶高度h_{top}均呈升高特征, 且云层地面覆盖度a^p也相应增大, 如图S3(a, b)与图S3(c, d)蓝色投影面积所示.

图S4(a)为北京时间14:00~15:00时段在不同空气密度ρ(100%, 120%, 140%, 170%)条件下的大涡模拟试验中上升气流与下沉气流的统计结果. 红色是密度最小(对应高原密度), 粉色是密度最大(对应平原密度). 地面气压从600 hPa变成1000 hPa后(即空气密度约是原来的1.7倍), 在初始廓线相对湿度和位温廓线相同, 且地面感热和潜热通量相同的条件下, 密度增大, 云中上升和下沉气流都有减弱的趋势, 云中垂直速度约是原来的75%, 并且云层有降低变薄的趋势. 由图S4(a)可见, 低空气密度试验中积云层中上升气流更强, 且上升气流最强的高度处于云层的中部, 随着空气密度减小有逐渐升高的趋势. 图S4(b)可描述出低空气密度使得云下层和云层中湍流动能都有明显增大的趋势. 大涡模拟揭示出低ρ条件对应着更强的热力湍流, 其强上升气流使得贯穿对流厚度增大, 积云更易发展. 低ρ条件和地表强热力湍流环境使得同等水汽条件下积云更易生成与发展, 水汽更易从云下混合层向上输送进入云层, 这部分解释了高原“亚洲水塔”云降水过程中对流云异常活跃特征的气候统计结果.

5 结论

青藏高原占中国四分之一面积, 并作为全球最高的大地形, 其南侧有来自印度洋、中国南海等“大三角扇形区”异常显著的暖湿气流, 中东部强对流区亦构成了东亚季风活跃期内青藏高原及周边地区的特殊水循环过程. 高原是东亚海陆气相互作用的最敏感地区之一. 青藏高原可描述出西风与季风在高原水汽流汇合显著特征. Xu等人[25,31]从青藏高原对全球海洋-大气-陆地-水文过程特殊的相互作用视角, 提出了青藏高原大气水分循环结构类似全球性大气“水塔”的观点, 认为高原大气通过全球尺度水分循环可维持一个持续“供水源”与“存储水”的水循环系统. “世界屋脊”上星罗棋布的冰川、积雪和湖泊储存着大量“水资源”, 某种程度可起到“水塔存储池”效应; 高原上河流水网亦可作为连接高原水塔功能“输水管道”. 通过高原上层大气中水分输送的渠道等, 影响整个世界的水环境.

研究表明, 通过西风与季风协同作用, 中低纬海洋水汽源与青藏高原冰川、湖泊、河流系统构成相互影响机制, 实现了青藏高原特殊的跨半球、全球性“亚洲水塔”大气水分循环过程. 隆升的“世界屋脊”的地表面强大辐射加热及其大气热源“热力驱动”是形成的高原对中低纬海洋水汽汇聚关键机制之一. 青藏高原地区中部和东部“爆米花”状云系揭示出高原地形效应形成

的特殊湍流-对流运动物理机制，其可描述出青藏高原异常对流特征亦与空气密度小、湍流异常有关. 青藏高原上对流活动频繁，强对流云出现比例可达平原区的数倍. “世界屋脊”低空气密度效应亦对强对流云产生效率贡献异常，大涡模拟揭示出低密度ρ条件对应着更强的热力湍流，且热泡中热上升气流使得贯穿对流厚度增大, 积云更易发展. 对流云和降水的频繁发生表明，青藏高原水汽含量是一个持续性变化的气候强信号，亦与高原水分循环过程“供水”机制相一致. 夏季，青藏高原不断吸引着来自中低纬度的海洋暖湿气流，并作为一个强大的“动力泵”构建了跨半球的大气水分循环结构[16,36]. 计算分析表明高原水汽源区从亚热带的印度次大陆向南伸展到热带地区的孟加拉湾，甚至可以跨越赤道追踪到南半球.

青藏高原热力驱动在高原与“亚洲水塔”能量、水分循环过程中扮演着重要的角色. 通过高原上空的热源驱动高层辐散、低层辐合的“耦合”机制，实现了高原水汽爬升以及远距离的多尺度水汽输送强“汇合”效应，并形成了青藏高原热力驱动以及其自激反馈的动力系统. 全球尺度的大气水分循环构成一个持续的青藏高原“亚洲水塔”、“供水源”与“存储池”. 此外，青藏高原本身存在着大量冰川、积雪与湖泊，起到了“存储池”的效应，高原上的河流可作为高原水循环的“输水管”，通过高原上空大气水汽输送通道，进而影响到全球的水环境[46]. 其构成了西风与季风背景下青藏高原为核心区的陆地-海洋-大气相互作用的“亚洲水塔”大气水分循环物理图像(图6).

高原与全球大气水分循环过程具有重要的互反馈作用. 这一陆地-海洋-大气能量与水分交换机制可描绘出一个完整的地球大气水分循环图像. 青藏高原作为“世界水塔”，其陆地-海洋-大气水分循环过程对全球自然和气候环境会产生深远的影响.

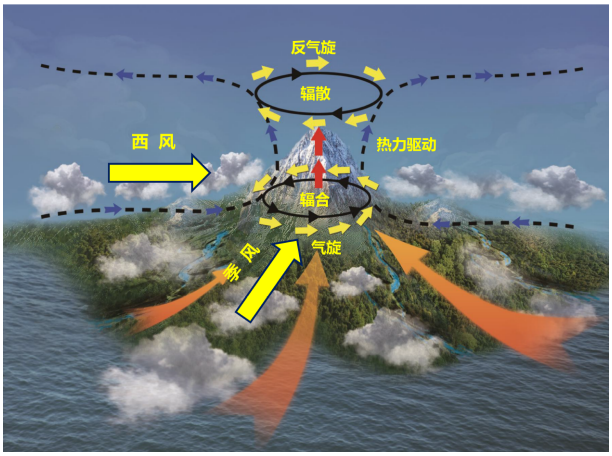


图 6 青藏高原“亚洲水塔”陆地-海洋-大气过程水分循环图像
Figure 6 Water circulation of the land-air-sea interactions in the Qinghai-Tibet Plateau as the Asian Water Tower

有学者指出，西风和印度季风是驱动这些现代气候环境变化的主控因素. 西风和印度季风两大环流的变化影响青藏高原的热力和动力条件[47]. 认识西风和印度季风两大环流对青藏高原水汽传输过程的影响，可以揭示这一地区冰川、湖泊、河流、生态系统等空间变化差异性的驱动机制[48]. 在全球变暖背景下, 西风与季风协同作用高原“亚洲水塔”热力驱动机制发生变化，进而改变高原大气水汽输送结构及其区域水汽供应状况. 青藏高原“亚洲水塔”的水汽含量和降水变化趋势的空间非均性可能缓解或加剧高原不同区域水资源失衡. 全球变暖背景下西风与季风协同作用变化亦可导致高原不同区域冰川和积雪变化趋势的差异. 另一方面，它可能会改变青藏高原地区的生态系统空间格局，也可能会引发下游地区极端天气灾害事件和相关气候环境的变异.

参考文献

1 Qin D H, Ding Y H, Su J L, et al. Evolution of Climate and Environment in China (Part 1): Evolution and Prediction of Climate and Environment (in Chinese). Beijing: Science Press, 2005 [秦大河, 丁一汇, 苏纪兰, 等. 中国气候与环境演变(上卷): 气候与环境的演变及预测. 北京: 科学出版社, 2005]

2 Feng S, Tang M C, Wang D M. Qinghai-Tibet Plateau is new evidence for climate change initiation in China (in Chinese). Chin Sci Bull, 1998, 43: 633−636 [冯松, 汤懋苍, 王冬梅. 青藏高原是我国气候变化启动区的新证据. 科学通报, 1998, 43: 633−636]

3 Wan W, Xiao P F, Feng X Z, et al. Monitoring lake changes of Qinghai-Tibetan Plateau over the past 30 years using satellite remote sensing data (in Chinese). Chin Sci Bull, 2014, 59: 701−714 [万玮, 肖鹏峰, 冯学智, 等. 卫星遥感监测近30年来青藏高原湖泊变化. 科学通报, 2014, 59: 701−714]

4 Wang M D, Hou J S, Lei Y B. Classification of Tibetan lakes based on variations in seasonal lake water temperature (in Chinese). Chin Sci Bull, 2014, 59: 4847–4855 [王明达, 侯居峙, 类延斌. 青藏高原不同类型湖泊温度季节性变化及其分类. 科学通报, 2014, 59: 4847−4855]

5 Zhao K Y. Marsh Zhi, China (in Chinese). Beijing: Science Press, 1999 [赵魁义. 中国沼泽志. 北京: 科学出版社, 1999]

6 Li B Y. Evolution of Hupo on Qinghai-Tibet Plateau, Late Cenozoic Uplift and Environmental Evolution on Qinghai-Tibet Plateau (in Chinese). Guangzhou: Guangdong Science and Technology Press, 1998 [李炳元. 青藏高原湖泊演化, 青藏高原晚新生代隆升与环境演化. 广州: 广东科技出版社, 1998]
7 Lu C X, Yu G, Xie G D. Tibetan Plateau serves as a water tower. IEEE Int Geosci Remote Sens, 2005, 5: 3120–3123
8 Qiu J. China: The Third Pole. Nature, 2008, 454: 393–396
9 Davis M E, Thompson L G, Yao T, et al. Forcing of the Asian monsoon on the Tibetan Plateau: Evidence from high-resolution ice core and tropical coral records. J Geophys Res, 2005, 110: D0410
10 Berti R, Laurenza M, Moreno G, et al. Correction to "Interplanetary magnetic field polarities derived from measurements of the northern and southern polar geomagnetic field". J Geophys Res, 2006, 111: D10110
11 Zheng D, Yao T D. Research progress on formation and evolution of Qinghai-Tibet Plateau and its environmental and resource effects (in Chinese). Chin Basic Sci, 2004, 6: 15–21 [郑度, 姚檀栋. "青藏高原形成演化及其环境资源效应"研究进展. 中国基础科学, 2004, 6: 15–21]
12 Yao T, Thompson L, Yang W, et al. Different glacier status with atmospheric circulations in Tibetan Plateau and surroundings. Nat Clim Change, 2012, 2: 663–667
13 Xu X D, Tao S Y, Wang J Z, et al. The relationship between water vapor transport features of Tibetan Plateau-monsoon large triangle affecting region and drought flood abnormality of China (in Chinese). Acta Meteorol Sin, 2002, 60: 257–266 [徐祥德, 陶诗言, 王继志, 等. 青藏高原-季风水汽输送"大三角扇型"影响域特征与中国区域旱涝异常的关系. 气象学报, 2002, 60: 257–266]
14 Liu X, Yin Z Y. Spatial and temporal variation of summer precipitation over the eastern Tibetan Plateau and the North Atlantic Oscillation. J Clim, 2001, 14: 2896–2909
15 Wang Y, Zhang B, Chen L, et al. Relationship between the atmospheric heat source over Tibetan Plateau and the heat source and general circulation over East Asia. Chin Sci Bull, 2008, 53: 3387
16 Xu X D, Chen L S, Wang X R, et al. Water vapor transport source-sink structure of Meiyu belt in the Yangtze River Basin (in Chinese). Chin Sci Bull, 2003, 48: 2288–2294 [徐祥德, 陈联寿, 王秀荣, 等. 长江流域梅雨带水汽输送源-汇结构. 科学通报, 2003, 48: 2288–2294]
17 Gao D Y, Zou H, Wang W. Effect of water vapor passage on precipitation in Yarlungzangbo River (in Chinese). Mt Res, 1985, 3: 51–61 [高登义, 邹捍, 王维. 雅鲁藏布江水汽通道对降水的影响. 山地研究, 1985, 3: 51–61]
18 Gao D Y. Investigation and study on water vapor passage in Yarlung Zangbo River (in Chinese). J Nat, 2008, 30: 301–303 [高登义. 雅鲁藏布江水汽通道考察研究. 自然杂志, 2008, 30: 301–303]
19 Shi X Y, Xu X D. Downstream effects of forced water vapor passage on Qinghai-Tibet Plateau and surrounding mesoscale topography in summer (in Chinese). In: Annual Meeting of Chinese Meteorological Society, 2006 [施小英, 徐祥德. 夏季青藏高原及周边中尺度地形强迫相关的水汽通道"下游效应". 见: 中国气象学会2006年年会论文集, 2006]
20 Wu G, Zhang Y. Tibetan Plateau forcing and the timing of the monsoon onset over south Asia and the South China Sea. Mon Weather Rev, 1998, 126: 913–927
21 Duan A M, Wu G X. Change of cloud amount and the climate warming on the Tibetan Plateau. Geophys Res Lett, 2006, 33: 217–234
22 Liu Y, Bao Q, Duan A, et al. Recent progress in the impact of the Tibetan Plateau on climate in China. Adv Atmos Sci, 2007, 24: 1060–1076
23 Yang K, He J, Tang W, et al. On downward shortwave and longwave radiations over high altitude regions: Observation and modeling in the Tibetan Plateau. Agric For Meteorol, 2010, 150: 38–46
24 Xu X D, Shi X Y, Wang Y Q, et al. Data analysis and numerical simulation of moisture source and transport associated with summer precipitation in the Yangtze River Valley over China. Meteorol Atmos Phys, 2008, 100: 217–231
25 Xu X D, Lu C G, Shi X Y, et al. World water tower: An atmospheric perspective. Geophys Res Lett, 2008, 35: 525–530
26 Shi X Y, Shi X H. Climatological characteristics of summertime moisture budget over the southeast part of Tibetan Plateau with their impacts (in Chinese). J Appl Meteorol Sci, 2008, 19: 41–46 [施小英, 施晓晖. 夏季青藏高原东南部水汽收支气候特征及其影响. 应用气象学报, 2008, 19: 41–46]
27 Lu Y B, Xie M E, Fan B, et al. Analyses on climatic features and water vapour transportation of rainy center in southeast corner of Qinghai-Tibetan Plateau in spring (in Chinese). Plateau Meteorol, 2008, 27: 1189–1194 [鲁亚斌, 解明恩, 范菠, 等. 春季高原东南角多雨中心的气候特征及水汽输送分析. 高原气象, 2008, 27: 1189–1194]
28 Zhou C Y, He J H, Li W, et al. Climatological characteristics of water vapor transfer over East Asia in Summer (in Chinese). J Nanjing Ins Meteorol, 2005, 28: 18–27 [周长艳, 何金海, 李薇, 等. 夏季东亚地区水汽输送的气候特征. 南京气象学院学报, 2005, 28: 18–27]
29 Zhou C Y, Zhang H J, Zhao X B, et al. Overview of the observation network of the main Tibetan Plateau experiments of atmospheric sciences in recent decades (in Chinese). Plateau Mountain Meteorol Res, 2012, 1: 81–87 [周长艳, 张虹娇, 赵兴炳, 等. 近三十多年青藏高原大气科学试验观测布局综述. 高原山地气象研究, 2012, 1: 81–87]
30 Peng S Q, Xu X D, Shi X H, et al. "Roof of the world" large terrain slope detection assimilation information on the downstream weather warning effect (in Chinese). Chin Sci Bull, 2008, 53: 3134–3138 [彭世球, 徐祥德, 施晓晖, 等. "世界屋脊"大地形坡面探测同化信息对下游天气的预警

效应. 科学通报, 2008, 53: 3134–3138]
31 Xu X D, Zhao T L, Lu C G, et al. Characteristics of the water cycle in the atmosphere of the Tibetan Plateau. Acta Meteorol Sin, 2014, 72: 1079–1095
32 Chen B, Xu X D, Shuai Y, et al. On the characteristics of water vapor transport from atmosphere boundary layer to stratosphere over Tibetan Plateau regions in summer. Chin J Geophys, 2012, 55: 406–414
33 Zhang R, Jiang D B, Liu X D, et al. Modeling the climate effects of different subregional uplifts within the Himalaya-Tibetan Plateau on Asian summer monsoon evolution. Chin Sci Bull, 2012, 57: 4617–4626
34 Wang H, Fan K. Southern Hemisphere mean zonal wind in upper troposphere and East Asian summer monsoon circulation. Chin Sci Bull, 2006, 51: 1508–1514
35 Wu B, Huang R. Lag influences of winter circulation conditions in the tropical western Pacific on South Asian summer monsoon. Chin Sci Bull, 2001, 46: 858–861
36 Zhang J, Zhu B Z, Zhu F K, et al. Advances in the Tibetan Plateau Meteorology–Scientific Experiments and Research on Tibetan Plateaumeteorology (in Chinese). Beijing: Science Press, 1988. 268 [章基嘉, 朱抱真, 朱福康, 等. 青藏高原气象学进展——青藏高原气象科学实验和研究. 北京: 科学出版社, 1988. 268]
37 Lu L H, Zhou G X, Zhang Z Q. Direct and global solar radiations in the region of MT. Qomolangma during the summer 1992 (in Chinese). Acta Energ Sol Sin, 1995, 16: 229–233 [陆龙骅, 周国贤, 张正秋. 1992年夏季珠穆朗玛峰地区的太阳直接辐射和总辐射. 太阳能学报, 1995, 16: 229–233]
38 Zhou M Y, Xu X D, Bian L G, et al. Observational Analysis and Dynamics of Atmospheric Boundary Layer on the Tibetan Plateau (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2000. 125 [周明煜, 徐祥德, 卞林根, 等. 青藏高原大气边界层观测分析与动力学研究. 北京: 气象出版社, 2000. 125]
39 Ye D Z, Chen P Q. Global Change and Research in China: Part II (in Chinese). Beijing: Seismological Press, 1992. 9–12, 53 [叶笃正, 陈泮勤. 中国的全球变化预研究(第二部分). 北京: 地震出版社, 1992. 9–12, 53]
40 Zhou M Y, Xu X D, Bian L G, et al. Observational Analysis and Dynamics of Atmospheric Boundary Layer on the Tibetan Plateau (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2000. 125 [周明煜, 徐祥德, 卞林根, 等. 青藏高原大气边界层观测分析与动力学研究. 北京: 气象出版社, 2000. 125]
41 Xu X, Zhao T, Lu C, et al. An important mechanism sustaining the atmospheric “water tower” over the Tibetan Plateau. Atmos Chem Phys Discuss, 2014, 14: 18255–18275
42 Flohn H. Contribution to a meteorology of the Tibetan Plateau on the formation of Asian monsoon circulation. Atoms Sci Paper, Colorado State University, Fort Collins, 1968
43 Young G S. Turbulence structure of the connective boundary layer. Parts Ⅰ & Ⅱ. J Atmos Sci, 1988, 45: 719–735
44 Young G S. Convection in the atmospheric boundary Layer. Earth Sci Rev, 1988, 25: 179–198
45 Heus T, van Heerwaarden C C, Jonker H J J, et al. Formulation of the Dutch Atmospheric Large-eddy Simulation (DALES) and overview of its applications. Geosci Model Dev, 2010, 3: 415–444
46 Zhou C Y, Zhang H J, Zhao X B, et al. Overview of the observation network of the main Tibetan Plateau experiments of atmospheric sciences in recent decades (in Chinese). Plateau Mountain Meteorol Res, 2012, (1): 81–87 [周长艳, 张虹娇, 赵兴炳, 等. 近三十多年青藏高原大气科学试验观测布局综述. 高原山地气象研究, 2012, (1): 81–87]
47 Ye D. Some characteristics of the summer circulation over the Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau and its neighborhood. Bull Amer Meteorol Soc, 1981, 62: 14–19
48 Yao T D, Piao S L, Shen M G, et al. Chained impacts on modern environment of interaction between westerlies and Indian Monsoon on Tibetan Plateau (in Chinese). Bull Chin Acad Sci, 2017, 32: 976–984 [姚檀栋, 朴世龙, 沈妙根, 等. 印度季风与西风相互作用在现代青藏高原产生连锁式环境效应. 中国科学院院刊, 2017, 32: 976–984]

补充材料

图S1 1948~2018年夏季80°~110°E经度带和27.5°~35°N纬度带比湿剖面图
图S2 青藏高原湍流-对流和“爆米花”云系特征
图S3 大涡模拟北京时间14:00, 14:30控制试验和空气密度ρ增加到140%的敏感试验积云三维空间分布
图S4 大涡模拟北京时间14:00~15:00不同空气密度ρ垂直运动结构试验

本文以上补充材料见网络版csb.scichina.com. 补充材料为作者提供的原始数据, 作者对其学术质量和内容负责.

Summary for “青藏高原‘亚洲水塔’效应和大气水分循环特征”

Effect of the Asian Water Tower over the Qinghai-Tibet Plateau and the characteristics of atmospheric water circulation

Xiangde Xu[1*], Lili Dong[1,2*], Yang Zhao[1] & Yinjun Wang[1]

[1] *State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China;*
[2] *National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China*
* Corresponding authors, E-mail: xuxd@cma.gov.cn; dlldsflsm@foxmail.com

From the perspective of regional and global atmospheric moisture circulation, this paper summarizes the unique thermal and dynamic mechanisms present in the Qinghai-Tibet Plateau (QTP) and their effects on the formation of the Asian Water Tower, which provides a theoretical basis for characterizing its atmospheric moisture circulation and global influence. The results show that the mechanisms of atmospheric moisture circulation in the QTP not only reflects the interaction between westerly and monsoon moisture flow but also highlight that the QTP is a key area for global and inter-hemispheric exchanges of energy and moisture. With a comprehensive dynamic analysis of the three-dimensional structure of the wind field based on apparent heat source calculations and the stream function, we revealed that the powerful ground radiation heating and the atmospheric heat source in the QTP lead to a hollow “heat island” and “wet island” in the middle troposphere. Driven by thermal forcing, a typhoon-like self-excited feedback dynamic structure with high and low circulation systems that occur in opposite directions occur over the plateau, which drive the convergence and pumping of atmospheric vapor over the Asian Water Tower.

The vector field analysis of the water vapor flux also showed that the QTP can continuously capture water vapor from tropical areas at low latitudes, and its source area extends from the subtropical Indian subcontinent to the Bay of Bengal in the tropics, and it even crosses the equator into the southern hemisphere. In view of the frequent convection and abnormal cloud precipitation over the roof of the world, the large eddy simulation further revealed the unique trigger effect of the low air density on the convective clouds. We propose that the structure of atmospheric moisture circulation under the thermal drive of the QTP can be regarded as a global atmospheric water tower.

According to a comprehensive analysis of the three-dimensional dynamic and thermodynamic structures, this atmospheric moisture circulation supplies the water storage in the Asian Water Tower over the QTP. This occurs, in particular, over the plateau glaciers, snowpacks, and lakes as a reservoir with a downstream outward pipeline of rivers from the plateau. With the synergy of westerlies and monsoons, the interaction of the low-latitude ocean with plateau glaciers, lakes, rivers, and the atmosphere can construct a special system of a global ocean and air, land, and hydrological processes with the core area in the QTP. A physical picture of the land-sea-air interaction is suggested for the Asian Water Tower over the QTP.

Qinghai-Tibet Plateau, Asian Water Tower, atmospheric moisture circulation, thermal drive mechanism, air density, physical picture

doi: 10.1360/TB-2019-0203