

青藏高原及其周边地区降水的水汽来源变化研究进展

汤秋鸿^{①②*}, 刘宇博^{①②}, 张弛^③, 苏凤阁^{④⑤}, 李颖^⑥, 高艳红^⑦, 李文弘^⑧, 陈德亮^⑨

① 中国科学院 地理科学与资源研究所 陆地水循环及地表过程重点实验室 北京 100101;

② 中国科学院大学 北京 100049;

③ 中国科学院 地理科学与资源研究所 陆地表层格局与模拟重点实验室 北京 100101;

④ 中国科学院 青藏高原环境变化与地表过程重点实验室 北京 100101;

⑤ 中国科学院 青藏高原地球科学卓越创新中心 北京 100101;

⑥ 三峡大学 水利与环境学院 湖北 宜昌 443002;

⑦ 复旦大学 大气与海洋科学系/大气科学研究院 上海 200438;

⑧ 杜克大学 尼古拉斯海洋环境学院 地球海洋科学系 美国 北卡罗来纳州 达勒姆 27708;

⑨ 瑞典哥德堡大学 地球科学系 瑞典 哥德堡 40530

* 联系人, E-mail: tangqh@igsrr.ac.cn

2020-10-03 收稿, 2020-10-27 接受

中国科学院战略性先导科技专项(XDA20060402); 第二次青藏高原综合科学考察研究(2019QZKK0208); 国家自然科学基金资助项目(41730645)

摘要 近几十年来,随着全球气候变暖,青藏高原降水整体呈现增加趋势,气候暖湿化趋势明显;与此同时,位于青藏高原东南缘的中国西南地区整体上呈现暖干化趋势,干旱事件频发。探讨青藏高原及其周边地区降水的水汽来源变化、揭示降水趋势性变化的原因已经成为当前研究热点。本文评述了近年来青藏高原降水的水汽来源研究,重点关注青藏高原变湿、西南地区变干的水汽来源变化原因以及青藏高原南北水汽来源差异,讨论了尚未解决的科学问题,展望了未来研究方向。现有研究表明,青藏高原以西的西风带控制区蒸散发贡献的水汽整体呈现减少趋势,青藏高原以南和以东的季风控制区蒸散发贡献的水汽整体呈现增加趋势,上述水汽源区贡献变化导致了青藏高原及其周边不同区域降水趋势性变化的差异。展望未来,水汽来源分析的模型和数据需要进一步验证及减少不确定性,青藏高原下垫面和蒸散发变化对周边地区降水的影响机制研究有待加强,全球变化与青藏高原降水水汽来源变化的关系尚需深入分析。

关键词
青藏高原;
降水;
水汽来源;
西风;
季风

青藏高原作为地球的“第三极”,对大气层的动力和热力作用深刻地影响着东亚气候格局及北半球环流,同时也是亚洲大河文明的重要水源地,被称为“亚洲水塔”(Immerzeel et al., 2010; 汤秋鸿等, 2019a)。20世纪80年代初以来,青藏高原随全球气候变化经历了变暖和增湿过程(Gao et al., 2014)。由于青藏高原及其周边降水变化直接影响到河川径流和“亚洲水塔”的水源涵养功能,将对下游地区水资源和生态产生重大影响,因此受到了广泛的关注(Kang et al., 2010; 汤秋鸿等, 2019b)。已

有研究表明,近年来青藏高原降水整体上呈现上升趋势,年降水增加速率约为每十年2.2%(陈德亮等, 2015)。但是,高原特殊复杂的地形地势使得降水变化的空间差异较大,青藏高原中部年降水呈增加趋势,而高原外围部分区域呈现减少趋势(Yang et al., 2011);夏季降水在高原西北和南侧呈微弱下降趋势,其余地区则呈显著上升趋势(Li et al., 2017)。基于多模式的集合预估结果表明,未来全球升温情景下青藏高原呈变湿趋势,而青藏高原东南缘的中国西南地区则呈变干趋势,将对青藏高原

引用格式: 汤秋鸿, 刘宇博, 张弛, 等. 2020. 青藏高原及其周边地区降水的水汽来源变化研究进展[J]. 大气科学学报, 43(6): 1002-1009.

Tang Q H, Liu Y B, Zhang C, et al. 2020. Research progress on moisture source change of precipitation over the Tibetan Plateau and its surrounding areas[J]. Trans Atmos Sci, 43(6): 1002-1009. doi: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20201003001. (in Chinese).

生态系统迁移风险和水资源利用带来影响 (Schewe et al. 2014; Liu et al. 2016; Yin et al. 2016)。

在全球变化背景下, 青藏高原水循环正在发生快速变化, 研究气候变化背景下青藏高原及其周边地区降水变化, 从水汽来源角度探讨降水变化的原因及其与全球变化的关系逐步成为当前研究热点 (汤秋鸿, 2020)。水汽是形成降水的必要条件, 现有研究利用不同方法对青藏高原降水的水汽来源和水汽传输过程进行了探索。例如, 谢欣汝等 (2018) 采用箱型模型分析了水汽收支特征, 指出青藏高原水汽主要由高原南侧输入。Zhang et al. (2017a) 利用 Water Accounting Model (WAM) 模型对形成高原降水的水汽来源进行追踪和定量估算, 发现形成青藏高原降水的 90% 水汽中约 69% 源自陆地蒸散发, 约 21% 水汽源自海洋蒸散发, 大部分水汽源于高原以西的西风带控制区和高原以南、以东的季风控制区。基于欧拉方法, WAM 模型从水汽平衡基本方程出发, 直接计算水汽源对降水的贡献, 能定量分析全球地表蒸散发对目标区域降水的水汽贡献。Chen et al. (2012) 利用 FLEXPART 拉格朗日模型模拟气团的运动轨迹, 诊断途中由降水和蒸发导致的水汽变化, 发现印度次大陆跨越阿拉伯海至南印度洋的狭窄传输带是青藏高原重要的水汽输送通道。Dong et al. (2016) 利用 WRF 模拟高原西南部降水, 强调源自印度中东部的水汽通过“抬升-翻越”机制进入青藏高原西南部, 阐明了印度平原深对流系统影响青藏高原西南部夏季降水的水汽输送机制。

近年来青藏高原及其周边地区降水呈现明显趋势性变化, 许多研究试图从水汽变化的角度解释降水变化的原因。Guo and Wang (2014) 尝试阐释水汽再循环与青藏高原降水变化的联系, 指出青藏高原内部的蒸散发水汽增多、水汽再循环率增大、区域水循环加速是降水增加的原因之一。也有研究指出季风区水汽输送强弱与高原夏季降水直接相关, 发现季风加强有利于高原以南的水汽进入高原内部, 认为大尺度环流变化是造成水汽输送和降水变化的主要原因 (Gao et al. 2014)。Zhang et al. (2017a) 则同时强调了西风带控制区和季风控制区的水汽变化对青藏高原降水的贡献。本文重点评述近年来青藏高原降水的水汽来源研究进展, 重点关注青藏高原变湿、西南地区变干的水汽来源变化原因以及青藏高原南北水汽来源差异, 讨论尚未解决的科学问题及展望未来研究方向。

1 青藏高原变湿的水汽来源变化原因

青藏高原中西部是高原降水增加速率最快的地

区之一, 该区域降水量的快速增加主导了青藏高原整体变湿的趋势 (Zhang et al. 2017a; Li et al. 2019; Sun et al. 2020)。首先, 已有研究发现区域水循环加速是青藏高原降水增加的原因之一, 认为青藏高原地区温度对本地蒸散发变化起着关键作用, 高原气候变暖导致蒸散发和大气储水量增加, 降水再循环率随温度升高而增大, 高原内部的蒸散发对降水的贡献增大, 为高原变湿提供了更多的水汽 (Guo and Wang 2014)。

由于印度夏季风变化对青藏高原降水有着显著影响, 也有研究认为季风环流变化是青藏高原降水增加的原因。Gao et al. (2014) 就风速分量的差异讨论了季风影响水汽输送变化的可能机制, 发现随季风环流增强, 青藏高原附近的低空南风和高空北风增强, 在加强偏南气流向高原内部运输水汽的同时, 还能促进空气在高原上空的上升运动。研究还指出东亚西风急流整体呈现北移迹象, 水汽输送的整体极向移动加大了季风降水控制范围, 从而增加青藏高原降水。

Zhang et al. (2017a) 利用校正的 ERA-I 数据和 NCEP-2 数据对青藏高原降水的水汽来源进行了比较系统的分析, 综合考虑了西风控制区、季风控制区和本地蒸散发对高原降水水汽贡献的变化。该研究发现本地蒸散发贡献了青藏高原中西部降水的约 18%; 除本地蒸散发的贡献之外, 高原降水的蒸散发水汽源区主要位于青藏高原以西和以南的区域, 分别是受中纬度西风系统控制的西部源区和受印度季风控制的西南源区, 此外还有少量水汽来自受东亚夏季风影响的东南源区, 四个源区对高原降水的蒸散发水汽贡献占比可见表 1, 源区位置可参考图 1。

表 1 基于 ERA-I 和 NCEP-2 数据的 1979—2013 年蒸散发水汽源区对青藏高原中西部降水气候态及增量的贡献

Table 1 Contributions of moisture to the climatology and the increment in precipitation over the west-central Tibetan Plateau from 1979 to 2013 based on ERA-I and NCEP-2 data %

区域	气候态贡献		增量贡献	
	ERA-I	NCEP-2	ERA-I	NCEP-2
高原中西部	18	18	35	32
西部源区	40	40	5	5
西南源区	23	21	33	37
东南源区	8	7	16	16

注: 数据来自 Zhang et al. (2017a)。

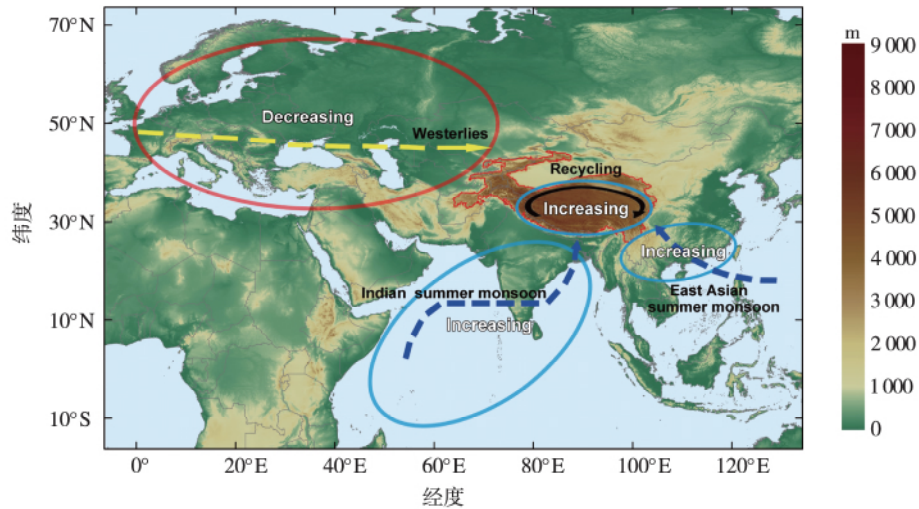


图1 青藏高原及其周边地区高程图(单位: m; 箭头表示不同的水汽传输路径; 椭圆形区域为通过地表蒸散发给高原降水贡献水汽的主要范围, 红色表示1979年以来水汽源区对青藏高原降水贡献呈微弱下降趋势, 蓝色表示水汽源区对青藏高原降水贡献呈增加趋势)

Fig.1 Terrain of the Tibetan Plateau and its surrounding areas(units: m; Arrows indicate the different paths of water vapor transport. Regions within elliptical outline are the main moisture sources for precipitation over the Tibetan Plateau. Red color indicates a decreasing trend of moisture contribution since 1979, while blue color indicates an increasing trend)

与青藏高原整体变湿的趋势相符, 蒸散发水汽源区对高原降水的水汽贡献量也呈上升趋势, 但是各水汽源区的贡献变化存在明显区域差异。青藏高原中西部的本地贡献增长速率最快, 降水再循环率以每十年1.4%(ERA-1)或1.1%(NCEP-2)的速率增长, 高原以南季风控制的水汽源区也呈现出较快的增长速率, 而受西风控制的西部源区则不同, 其范围内的中亚地区蒸散发对青藏高原降水的水汽贡献甚至呈减少趋势。支撑青藏高原降水增加的蒸散发水汽增量主要来源于高原中西部(本地)和西南源区, 分别占总水汽增量的1/3以上(表1)。由此可见, 印度季风控制区和青藏高原本地的水汽贡献增加是导致高原降水增加的主要原因。

2 青藏高原南北部水汽来源差异

尽管全球变暖背景下青藏高原整体变湿已得到广泛认可, 但高原内部降水变化并不一致(陈德亮等, 2015)。近30a来降水观测数据表明青藏高原南北部变化降水存在显著差异, 青藏高原北部降水明显增加呈变湿趋势, 而青藏南部降水增加趋势并不明显(Feng and Zhou, 2012; Cuo et al., 2013; Gao et al., 2015)。为了揭示青藏高原南北部干湿差异的原因, 已有研究详细分析了青藏高原南北部水汽来源及其变化的差异。研究发现, 在青藏高原的西北方向, 西风水汽输送减弱使得青藏高原以西的水汽

源区对青藏高原降水的贡献量减少, 而西风急流系统整体北移, 使得西风环流对高原南部降水的控制减弱(Gao et al., 2014)。在青藏高原的东南方向, 强烈的东风和南风促进了印度夏季风控制区的水汽输送, 近年来北印度洋和孟加拉湾附近增强的南风有利于把印度洋蒸散发水汽更多地传输到青藏高原。此外, 西风急流增强可能使青藏高原上升气流增强, 引起高原北部水汽再循环率增大, 从而有利于高原北部的增湿趋势(Wang et al., 2018)。

Zhang et al.(2019)将降水的水汽源区分为青藏高原、受西风系统控制的西北源区以及受季风系统控制的东南源区, 定量对比分析了高原南、北部降水的水汽来源及其变化。结果表明, 青藏高原南、北部降水的水汽来源贡献区域存在明显差异。青藏高原北部降水的水汽贡献主要源自受西风系统控制的西北源区和青藏高原, 其中源自西北源区贡献占比为39%~43%, 源自青藏高原的水汽贡献为26%~30%。青藏高原南部降水的水汽贡献主要来自东南源区, 其贡献比占51%~54%, 而源自青藏高原的水汽贡献为14%~16%。在1979—2016年间, 青藏高原北部降水增加主要是因为青藏高原和受季风系统控制的东南源区的水汽贡献增加, 青藏高原和东南源区分别给青藏高原北部降水增量贡献了52%和36%的水汽。同时, 青藏高原北部本地水汽再循环率呈现增大趋势, 为本地降水增量贡献了28%的水

汽,但是西北源区,特别是中亚地区范围对青藏高原北部降水的水汽贡献减少。青藏高原南部降水没有明显增加趋势,东南源区和青藏高原自身对高原南部降水水汽贡献没有显著趋势性变化,同时西北源区贡献给高原南部的降水水汽显著下降,是青藏高原南部变湿不明显的主要原因。

3 青藏高原内流区水汽来源变化及其水文效应

青藏高原内流区由高原中部一系列内河流域构成,总面积约占整个高原面积的1/3。青藏高原内流区气候干冷,年均降水在400 mm以下,主要受中纬度西风带和印度夏季风交替影响(Joswiak et al., 2013; Yao et al., 2013; Li et al., 2019)。独特的地理环境使得内流区内发育了众多的高山湖泊和冰川(Wei et al., 2014; Zhang et al., 2017c; Yao et al., 2018)。遥感资料显示,自20世纪70年代以来青藏高原内流区的湖泊急剧扩张(Lei et al., 2014; Zhang et al., 2014; Yang et al., 2017; Zhang et al., 2020),2002年以来内流区的陆地水储量快速增加(Zhang et al., 2013; Song et al., 2014; Meng et al., 2019)。研究发现,降水变化,尤其是夏季降水增加,是青藏高原内流区湖泊扩张和陆地水储量增加的重要原因(Lei et al., 2014; Yang et al., 2017; Zhang et al., 2017c)。在此背景下,青藏高原内流区水汽来源特征及其变化受到特别的关注(Sun et al., 2020)。

Li et al. (2019) 基于3套大气再分析资料(ERA-1、MERRA-2和JRA-55)分析发现,青藏高原内流区降水的水汽源区主要随着中纬度西风带向西和随着印度季风方向向南扩张。多年平均状态下,内流区降水水汽的52%~54%来源于陆地区域(不包括内流区本地水汽再循环),24%~30%来源于海洋,以及17%~22%来源于内流区本地水汽再循环。尽管海洋蒸发速率显著高于陆地,但是由于内流区深居内陆,海洋水汽难以直接到达,因此陆源水汽的贡献占据主导地位。只有在冬季(12月—次年2月),因为陆地源区相对干冷,而青藏高原西边的地中海、红海和波斯湾大量海洋蒸发水汽顺着西风输送进入青藏高原,此时内流区降水由海洋水汽的贡献占主导。在其他季节(3—11月),青藏高原内流区降水水汽由陆源水汽主导,且主要水汽源区分布在内流区周边,尤其是内流区内部、高原西南周边、以及印度次大陆北部区域。在夏季(7—9月),内流区本地水汽再循环率达到全年最高,峰值月份出现

在8月,同时本地水汽再循环对降水的贡献达到25%~30%。事实上,青藏高原内流区的蒸散发同样在8月达到年内峰值(Li et al., 2014),而且局地对流降水被认为是内流区夏季降水的主要形式(Fu et al., 2006; Maussion et al., 2014; Curio and Scherer, 2016)。

研究进一步定量解析水汽源区对青藏高原内流区降水变化的贡献,发现1979年以来内流区降水增加主要源于印度季风带来的水汽增加,该部分水汽主要通过内流区西边界和南边界输入(Li et al., 2019)。自20世纪90年代中期以来,北大西洋年代际振荡(the Atlantic Multidecadal Oscillation, AMO)一直处于暖位相(即北大西洋表面异常增暖),诱发了一系列沿欧亚大陆高空副热带西风急流传输的气旋和反气旋异常(Hong et al., 2017),使得西风急流减弱并且异常北移。与此同时,青藏高原内流区东部西风急流减弱的幅度要明显强于西部,使得内流区更容易产生水汽的辐合;而在该时段青藏高原内流区南侧的西南风增强,有利于来自海洋的水汽输送进入高原内流区,从而导致了内流区夏季降水的增加(Sun et al., 2020)。

4 西南地区干旱的水汽来源变化原因

与青藏高原整体变湿不同,位于青藏高原东南缘的中国西南地区(四川、重庆、云南、贵州等)在近几年来降水减少,干旱频发,对当地的生态环境和社会经济都造成了巨大的压力(Wang et al., 2015; Tan et al., 2017; Zhang et al., 2017d; Deng et al., 2020),其中2006与2011年的夏季干旱严重程度更是创下历史纪录(李永华等, 2009; 李泽明等, 2014; Zhang, 2020)。根据中国气象局降水数据,西南地区1979—2013年均降水 $971 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$,呈显著下降趋势($-2.7 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$),降水下降主要集中在夏季(7—9月)。

通过分析西南地区夏季降水的水汽来源,研究发现降水的主要水汽源区在西南方向,受印度季风的影响明显,水汽从南印度洋越过赤道,通过索马里急流经阿拉伯海、印度半岛、孟加拉湾,最终抵达西南地区(Zhang et al., 2017b)。青藏高原以西的西风带控制区是西南地区降水的第二大水汽源区,其气候平均水汽贡献要比东亚季风源区高(Zhang, 2020)。对西南地区降水水汽贡献的变化则展现出“西减东增”的格局,即来自西风带控制区的水汽贡献在减少,而来自东印度洋和西太平洋等季风控制

区的水汽贡献在增加。平均而言西部源区贡献了西南地区夏季 48% 的降水水汽,但其水汽贡献在 1979—2013 年间呈递减趋势;东部源区贡献了西南地区夏季约 25% 的降水水汽,但其水汽贡献呈增加趋势。西南地区本地水汽再循环贡献了约 16% 的水汽,而其变化趋势不明显。整体来看,西部源区水汽贡献减少的速度远大于东部源区水汽贡献增加的速度,从而使得西南地区降水减少。西南地区水汽输送变化的主要驱动因素是动力因子(风场)变化,即大气环流的变化造成水汽辐散增强,加重了干旱;热力因子(大气水汽含量变化)引起水汽辐散呈下降趋势,起到缓和干旱的作用,但其作用相对较弱(Li et al. 2014; Zhang et al. 2017b)。

5 结论与展望

本文回顾了近年来青藏高原及其周边地区降水的水汽来源研究,重点评述了蒸散发水汽源区对青藏高原及其周边降水的水汽贡献量变化规律。现有研究表明,青藏高原以西的西风带控制区蒸散发对

青藏高原降水贡献的水汽整体呈现减少趋势,青藏高原以南和以东的季风控制区蒸散发贡献的水汽整体呈现增加趋势,上述水汽源区贡献变化导致青藏高原及其周边不同区域降水趋势性变化的差异。尽管已有研究在认识水汽源区对青藏高原及周边地区降水贡献的变化规律方面取得了巨大进展,但是大多数分析存在观测证据支撑不足和不确定性较大的问题;气候变暖背景下青藏高原冰川、湖泊、植被等下垫面变化及与之紧密相关的蒸散发变化将影响水汽输送和再循环,亟待从水汽来源的角度阐明青藏高原地表环境变化对青藏高原和周边地区降水的影响机制;青藏高原及其周边地区降水的水汽来源贡献都存在“西减东增”格局,可能与全球变化紧密相关,但是相关认识还不清楚。展望未来,水汽来源分析的模型和数据需要进一步验证及减少不确定性,青藏高原下垫面和蒸散发变化对周边地区降水的影响机制研究有待加强,全球变化与青藏高原降水水汽来源变化的关系尚需深入分析。

参考文献(References)

- Chen B, Xu X D, Yang S, et al. 2012. On the origin and destination of atmospheric moisture and air mass over the Tibetan Plateau [J]. *Theor Appl Climatol*, 110(3): 423-435.
- 陈德亮, 徐柏青, 姚檀栋, 等. 2015. 青藏高原环境变化科学评估: 过去、现在与未来 [J]. *科学通报*, 60(32): 3023-3035. Chen D, Xu B Q, Yao T D, et al. 2015. Assessment of past, present and future environmental changes on the Tibetan Plateau [J]. *Chin Sci Bull*, 60(32): 3023-3035. (in Chinese).
- Cuo L, Zhang Y X, Wang Q C, et al. 2013. Climate change on the northern Tibetan Plateau during 1957—2009: spatial patterns and possible mechanisms [J]. *J Climate*, 26(1): 85-109.
- Curio J, Scherer D. 2016. Seasonality and spatial variability of dynamic precipitation controls on the Tibetan Plateau [J]. *Earth Syst Dynam*, 7(3): 767-782.
- Deng K Q, Jiang X W, Hu C D, et al. 2020. More frequent summer heat waves in southwestern China linked to the recent declining of Arctic sea ice [J]. *Environ Res Lett*, 15(7): 074011.
- Dong W H, Lin Y L, Wright J S, et al. 2016. Summer rainfall over the southwestern Tibetan Plateau controlled by deep convection over the Indian subcontinent [J]. *Nat Commun*, 7: 10925.
- Feng L, Zhou T J. 2012. Water vapor transport for summer precipitation over the Tibetan Plateau: multidata set analysis [J]. *J Geophys Res*, 117: D20114. doi: 10.1029/2011jd017012.
- Fu Y F, Liu G S, Wu G X, et al. 2006. Tower mast of precipitation over the central Tibetan Plateau summer [J]. *Geophys Res Lett*, 33(5): 157-158.
- Gao Y H, Cuo L, Zhang Y X. 2014. Changes in moisture flux over the Tibetan Plateau during 1979—2011 and possible mechanisms [J]. *J Climate*, 27(5): 1876-1893.
- Gao Y H, Li X, Ruby L L, et al. 2015. Aridity changes in the Tibetan Plateau in a warming climate [J]. *Environ Res Lett*, 10(3): 34013-34024.
- Guo Y P, Wang C H. 2014. Trends in precipitation recycling over the Qinghai-Xizang Plateau in last decades [J]. *J Hydrol*, 517: 826-835.
- Hong X W, Lu R Y, Li S L. 2017. Amplified summer warming in Europe-West Asia and Northeast Asia after the mid-1990s [J]. *Environ Res Lett*, 12(9): 094007.
- Immerzeel W W, van Beek L P H, Bierkens M F P. 2010. Climate change will affect the Asian water towers [J]. *Science*, 328(5984): 1382-1385.
- Joswiak D R, Yao T D, Wu G J, et al. 2013. Ice-core evidence of westerly and monsoon moisture contributions in the central Tibetan Plateau [J]. *J Glaciol*, 59(213): 56-66.
- Kang S C, Xu Y W, You Q L, et al. 2010. Review of climate and cryospheric change in the Tibetan Plateau [J]. *Environ Res Lett*, 5(1): 015101.
- Lei Y B, Yang K, Wang B, et al. 2014. Response of inland lake dynamics over the Tibetan Plateau to climate change [J]. *Clim Chang*, 125(2):

281-290.

- Li X P ,Wang L ,Chen D et al. 2014.Seasonal evapotranspiration changes (1983—2006) of four large basins on the Tibetan Plateau [J].*J Geophys Res Atmos* ,119(23) : 13079-13095.
- Li X P ,Wang L ,Guo X Y et al. 2017.Does summer precipitation trend over and around the Tibetan Plateau depend on elevation? [J].*Int J Climatol* , 37: 1278-1284.
- Li Y ,Su F G ,Chen D et al. 2019.Atmospheric water transport to the endorheic Tibetan Plateau and its effect on the hydrological status in the region [J].*J Geophys Res Atmos* ,124(23) : 12864-12881.
- 李永华 徐海明 刘德 2009.2006 年夏季西南地区东部特大干旱及其大气环流异常[J].*气象学报* ,67(1) : 122-132. Li Y H ,Xu H M ,Liu D , 2009.Features of the extremely severe drought in the east of Southwest China and anomalies of atmospheric circulation in summer 2006 [J].*Acta Meteorol Sin* ,67(1) : 122-132.(in Chinese) .
- 李泽明 陈皎 董新宁 2014.重庆 2011 年和 2006 年夏季严重干旱及环流特征的对比分析[J].*西南大学学报(自然科学版)* ,36(8) : 113-122. Li Z M ,Chen J ,Dong X N 2014.Comparison analysis for summer heavy drought and its circulation features in 2011/2006 in Chongqing [J].*J Southwest Agric Univ* ,36(8) : 113-122.(in Chinese) .
- Liu X C ,Tang Q H ,Voisin N et al. 2016.Projecting impacts of climate change on hydropower potential in China [J].*Hydrol Earth Syst Sci* ,20(8) : 3343-3359.
- Maussion F ,Scherer D ,Mölg T et al. 2014.Precipitation seasonality and variability over the Tibetan Plateau as resolved by the high Asia reanalysis [J].*J Climate* ,27(5) : 1910-1927.
- Meng F C ,Su F G ,Li Y et al. 2019.Changes in terrestrial water storage during 2003—2014 and possible causes in Tibetan Plateau [J].*J Geophys Res Atmos* ,124(6) : 2909-2931.
- Schewe J ,Heinke J ,Gerten D et al. 2014.Multimodel assessment of water scarcity under climate change [J].*PNAS* ,111(9) : 3245-3250.
- Song C Q ,Huang B ,Ke L H et al. 2014.Seasonal and abrupt changes in the water level of closed lakes on the Tibetan Plateau and implications for climate impacts [J].*J Hydrol* ,514: 131-144.
- Sun J ,Yang K ,Guo W D et al. 2020.Why has the inner Tibetan Plateau become wetter since the mid-1990s? [J].*J Climate* ,33(19) : 8507-8522.
- Tan L C ,Cai Y J ,An Z S et al. 2017.Decreasing monsoon precipitation in Southwest China during the last 240 years associated with the warming of tropical ocean [J].*Clim Dyn* ,48(5/6) : 1769-1778.
- 汤秋鸿 2020.全球变化水文学: 陆地水循环与全球变化[J].*中国科学: 地球科学* ,50(3) : 436-438. Tang Q H 2020.Global change hydrology: terrestrial water cycle and global change [J].*Science China Earth Sciences* ,50(3) : 436-438.(in Chinese) .
- 汤秋鸿 兰措 苏凤阁 等 2019a.青藏高原河川径流变化及其影响研究进展 [J].*科学通报* ,64(27) : 2807-2821. Tang Q H ,Lan C ,Su F G ,et al. 2019.Streamflow change on the Qinghai-Tibet Plateau and its impacts [J].*Chin Sci Bull* ,64(27) : 2807-2821.(in Chinese) .
- 汤秋鸿 刘星才 周园园 等 2019b.“亚洲水塔”变化对下游水资源的连锁效应 [J].*中国科学院院刊* ,34(11) : 1306-1312. Tang Q H ,Liu X C , Zhou Y Y et al. 2019.Cascading impacts of Asian water tower change on downstream water systems [J].*Bull Chin Acad Sci* ,34(11) : 1306-1312.(in Chinese) .
- Wang L ,Chen W ,Zhou W et al. 2015.Drought in Southwest China: a Review [J].*Atmospheric and Oceanic Science Letters* ,8(6) : 339-344.
- Wang T ,Miao J P ,Sun J Q et al. 2018.Intensified East Asian summer monsoon and associated precipitation mode shift under the 1.5 °C global warming target [J].*Adv Clim Chang Res* ,9(2) : 102-111.
- Wei J F ,Liu S Y ,Guo W Q et al. 2014.Surface-area changes of glaciers in the Tibetan Plateau interior area since the 1970s using recent Landsat images and historical maps [J].*Ann Glaciol* ,55(66) : 213-222.
- 谢欣汝 游庆龙 保云涛 等 2018.基于多源数据的青藏高原夏季降水与水汽输送的联系 [J].*高原气象* ,37(1) : 78-92. Xie X R ,You Q L ,Bao Y T et al. 2018.The connection between the precipitation and water vapor transport over Qinghai-Tibetan Plateau in summer based on the multiple datasets [J].*Plateau Meteor* ,37(1) : 78-92.(in Chinese) .
- Yang K ,Ye B S ,Zhou D G et al. 2011.Response of hydrological cycle to recent climate changes in the Tibetan Plateau [J].*Clim Chang* ,109(3/4) : 517-534.
- Yang R M ,Zhu L P ,Wang J B et al. 2017.Spatiotemporal variations in volume of closed lakes on the Tibetan Plateau and their climatic responses from 1976 to 2013 [J].*Clim Chang* ,140(3/4) : 621-633.
- Yao F F ,Wang J D ,Yang K H et al. 2018.Lake storage variation on the endorheic Tibetan Plateau and its attribution to climate change since the new millennium [J].*Environ Res Lett* ,13(6) : 064011.
- Yao T D ,Masson-Delmotte V ,Gao J et al. 2013.A review of climatic controls on $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation over the Tibetan Plateau: observations and simulations [J].*Rev Geophys* ,51(4) : 525-548.
- Yin Y Y ,Tang Q H ,Wang L X et al. 2016.Risk and contributing factors of ecosystem shifts over naturally vegetated land under climate change in China [J].*Sci Rep* ,6(1) : 20905.
- Zhang C 2020.Moisture sources for precipitation in Southwest China in summer and the changes during the extreme droughts of 2006 and 2011 [J].*J Hydrol* ,591: 125333.

- Zhang C ,Tang Q H ,Chen D .2017a.Recent changes in the moisture source of precipitation over the Tibetan Plateau[J].J Climate ,30(5) : 1807-1819.
- Zhang C ,Tang Q H ,Chen D ,et al. .2017b.Tracing changes in atmospheric moisture supply to the drying Southwest China[J].Atmos Chem Phys ,17(17) : 10383-10393.
- Zhang C ,Tang Q H ,Chen D ,et al. .2019.Moisture source changes contributed to different precipitation changes over the northern and southern Tibetan Plateau[J].J Hydrometeorol ,20(2) : 217-229.
- Zhang G Q ,Yao T D ,Xie H J ,et al. .2013.Increased mass over the Tibetan Plateau: From lakes or glaciers? [J].Geophys Res Lett ,40(10) : 2125-2130.
- Zhang G Q ,Yao T D ,Xie H J ,et al. .2014.Lakes' state and abundance across the Tibetan Plateau[J].Chin Sci Bull ,59(24) : 3010-3021.
- Zhang G Q ,Yao T D ,Shum C K ,et al. .2017c.Lake volume and groundwater storage variations in Tibetan Plateau' s endorheic basin[J].Geophys Res Lett ,44(11) : 5550-5560.
- Zhang G Q ,Yao T D ,Xie H J ,et al. .2020.Response of Tibetan Plateau lakes to climate change: Trends ,patterns ,and mechanisms [J].Eart-Sci Rev ,208: 103269.
- Zhang X J ,Tang Q H ,Liu X C ,et al. .2017d.Soil moisture drought monitoring and forecasting using satellite and climate model data over southwestern China[J].J Hydrometeorol ,18(1) : 5-23.

Research progress on moisture source change of precipitation over the Tibetan Plateau and its surrounding areas

TANG Qihong^{1,2} ,LIU Yubo^{1,2} ,ZHANG Chi³ ,SU Fengge^{4,5} ,LI Ying⁶ ,GAO Yanhong⁷ ,
LI Wenhong⁸ ,CHEN Deliang⁹

¹Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes ,Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research ,Chinese Academy of Sciences ,Beijing 100101 ,China;

²University of Chinese Academy of Sciences ,Beijing 100049 ,China;

³Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation ,Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research ,Chinese Academy of Sciences ,Beijing 100101 ,China;

⁴Key Laboratory of Tibetan Environment Changes and Land Surface Processes ,Chinese Academy of Sciences ,Beijing 100101 ,China;

⁵Center for Excellence in Tibetan Plateau Earth Sciences ,Chinese Academy of Sciences ,Beijing 100101 ,China;

⁶College of Hydraulic and Environmental Engineering ,China Three Gorges University ,Yichang 443002 ,China;

⁷Department of Atmospheric and Oceanic Sciences/Institute of Atmospheric Sciences ,Fudan University ,Shanghai 200438 ,China;

⁸Earth and Ocean Sciences ,Nicholas School of the Environment and Earth Sciences ,Duke University ,Durham 27708 ,USA;

⁹Regional Climate Group ,Department of Earth Sciences ,University of Gothenburg ,Gothenburg 40530 ,Sweden

This paper provides a comprehensive review of recent studies on the moisture sources of precipitation over the Tibetan Plateau and its surrounding areas ,focusing on the characteristics of moisture sources(regions of evaporation) for precipitation ,the spatiotemporal changes in contribution of moisture sources to precipitation ,and the causes of changes in moisture source associated with wetting trend over the Tibetan Plateau and drying trend in Southwest China(located in the southeastern margin of the Tibetan Plateau) .The existing studies show that the moisture transports from the west of the Tibetan Plateau by mid-latitude westerlies in the Northern Hemispheric and from the southwest by the Indian summer monsoon contribute the most to precipitation over the Tibetan Plateau.The moisture transports from the west show an overall decreasing trend while those from the south and the east show an overall increasing trend in the past three decades.The enhanced water vapor transport from the monsoon regions and the intensified local hydrological recycling are the primary reasons behind the recent wetting trend over the Tibetan Plateau ,while the reduced water vapor transport from the regions dominated by the westerlies is the main factor that causes the drying trend in the southeastern margin of the Tibetan Plateau.This paper discusses the challenges and future directions for understanding the variation of moisture source of precipitation over the extended Tibetan Plateau area.Firstly ,the observational evidence of moisture source variation is still lacking.There is a need to reduce uncertainty of the moisture source estimates through integration of model and observations.Secondly ,the changes in glacier ,lake and vegetation over the Tibetan Plateau and the associated chan-

ges in evapotranspiration would affect the water vapor transport and recycling. There is a need to quantify the interactions between land surface change and precipitation over the Tibetan Plateau and its surrounding areas from the perspective of water vapor sources. Thirdly, the enhanced moisture supply from the monsoons and reduced moisture supply from the westerlies could be linked to climate change as the projection of future precipitation changes under a warming world shows the same pattern as the past three decades, i.e. a wetting trend over the Tibetan Plateau and a drying trend in the southeastern margin. However, further researches are needed to understand the linkages between global change and moisture source variation over the Tibetan Plateau and its surrounding areas.

Tibetan Plateau; precipitation; moisture source; westerly; monsoon

doi: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20201003001

(责任编辑: 张福颖)