

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2023.05.015

# 青藏高原水资源现状与问题

王欣<sup>1,2</sup>, 连文皓<sup>1</sup>, 魏俊锋<sup>1</sup>, 张勇<sup>1</sup>, 殷永胜<sup>1</sup>, 王琼<sup>1</sup>, 张法刚<sup>1</sup>

(1. 湖南科技大学地球科学与空间信息工程学院, 湖南湘潭 411201;  
2. 中国科学院西北生态环境资源研究院冰冻圈科学国家重点实验室, 甘肃兰州 730000)

**摘要:** 青藏高原拥有全球海拔最高、数量最多的高原湖泊群, 是地球上除南北极之外冰川面积最大的区域, 也是全球中纬度面积最大的多年冻土分布区。掌握青藏高原水资源的变化特征及趋势, 对青藏高原生态安全屏障建设至关重要。本文基于文献资料, 系统梳理总结青藏高原水资源结构特征、变化及问题。自20世纪80年代以来, 青藏高原水资源表现出冰川退缩、积雪减少、湖泊扩张、径流变化加大、湿地退化、冻土退化等特征, 总体呈现出地表固态水资源向液态水资源加快转换的趋势; 这种转换趋势导致水资源不平衡性的加剧, 并增大了水灾害发生的风险, 给水资源安全带来了新的挑战。当前需要加强对青藏高原水资源变化监测, 开展青藏高原地区水资源现状与演变的系统调查研究, 提高不同情景下青藏高原水资源可利用性的综合模拟能力, 系统评估青藏高原水资源的不平衡性和安全性。

**关键词:** 水资源; 地表水; 地下水; 青藏高原

**中图分类号:** TV213.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2023)05-0812-15

青藏高原是全球除两极外冰川最为发育的地区, 也是全球气候变暖最为剧烈的地区之一<sup>[1]</sup>。青藏高原地区的流域水文水循环物理条件和机制正在发生变化, 增加了水资源系统的复杂性和不确定性<sup>[2]</sup>。青藏高原对气候变化敏感, 1970—2018年, 青藏高原平均变暖速度(0.36 °C/(10 a))快于全球平均变暖速度(0.19 °C/(10 a))<sup>[3]</sup>。自20世纪50年代起, 青藏高原经历了气温升高, 冰川退缩和减薄<sup>[4]</sup>, 积雪减少和融雪径流增加<sup>[5]</sup>, 冻土活动层的水热状况发生变化<sup>[6]</sup>, 这些现象对青藏高原地区的水文过程和水资源产生了显著的影响。青藏高原年平均降水量存在年代际波动, 降水主要集中在高原东南部雅鲁藏布江下游和四川西部地区, 这些区域年平均降水量多在1000 mm以上, 而青藏高原西北地区年平均降水量在50 mm以下<sup>[7]</sup>, 多年平均降水量的空间分布呈现由东南向西北逐渐减少的趋势<sup>[8]</sup>。随着青藏高原气候变化的加剧, 降水分布和季节性变化发生了重大改变, 引起了区域水资源的新变化。

对于青藏高原水资源的研究主要包括不同类型水资源量的变化及其脆弱性和短缺性分析<sup>[9]</sup>, 如积雪变化对水资源的影响<sup>[10]</sup>、冻土退化对地下水的影响<sup>[11]</sup>、冰川径流变化趋势及影响<sup>[12-15]</sup>。但对青藏高原水资源的系统总结和分析相对较少, 当前缺乏对水资源现状与变化的全面评估。本文旨在分析青藏高原水资源结构与变化特征, 探讨未来可能面临的问题与挑战, 为青藏高原地区水资源变化及水资源利用与水安全研究提供参考。

## 1 青藏高原水资源变化

陆地储水量是指陆地表面和地下所有水的总和, 其组成成分较为复杂(图1), 难以直接测量。在过去十

收稿日期: 2023-05-31; 网络出版日期: 2023-10-13

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/32.1309.P.20231011.1140.002>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42171137; 42171134)

作者简介: 王欣(1973—), 男, 湖南耒阳人, 教授, 博士, 主要从事地理环境遥感、冰冻圈水文与灾害等方面研究。

E-mail: wangx@hnust.edu.cn

通信作者: 连文皓, E-mail: 13782661229@163.com

几年,不同类型的水资源储水量变化中,冰川变化最为显著,其次是湖泊、地下水、冻土冰、土壤湿度和积雪<sup>[11]</sup>。青藏高原气候变化时空差异显著<sup>[16]</sup>,2000—2020年青藏高原气温平均以 $0.038\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{a}$ 升高(图2(a),图2数据来自ERA5),降水平均增率为 $1.22\text{ mm}/\text{a}$ (图2(b))。在气候总体暖湿化的背景下,青藏高原地区固态水资源不断融化转化为液态水资源,主要涉及地表水(包括冰川、积雪、湖泊和径流)以及地下水(包括冻土冰和湿地水)的变化。基于WaterGAP v2.2d模型数据,计算青藏高原地区各流域储水量年变化率显示,2002—2017年青藏高原陆地储水量整体以 $10.2\text{ Gt}/\text{a}$ 的速率减少<sup>[17]</sup>,尽管陆地储水量变化表现出明显的空间差异<sup>[18]</sup>(图3,数据来自文献[19])。空间上,青藏高原大部分地区储水量变化幅度较小,其中,北部陆地储水量增大、中南部储水量减少<sup>[19]</sup>。

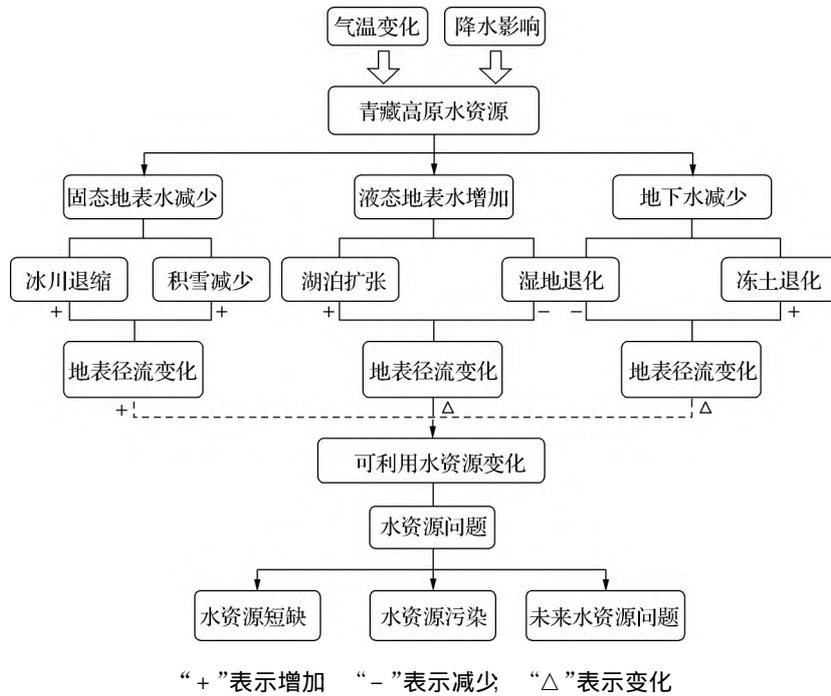


图 1 青藏高原水资源结构与变化

Fig. 1 Structure and changes of water resources in the Qinghai-Tibet Plateau

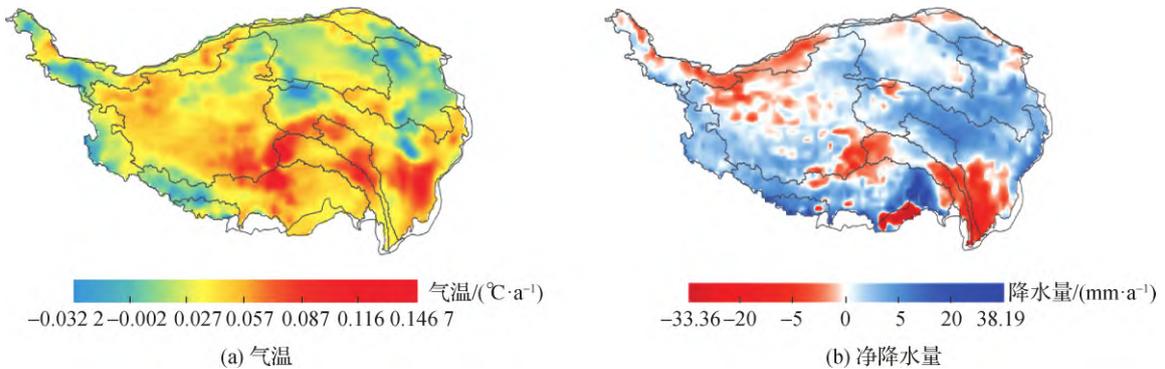


图 2 2000—2020年青藏高原地区气温和净降水量变化的空间分布特征

Fig. 2 Characteristics of spatial distribution of temperature and net precipitation changes in the Qinghai-Tibet Plateau region, 2000—2020

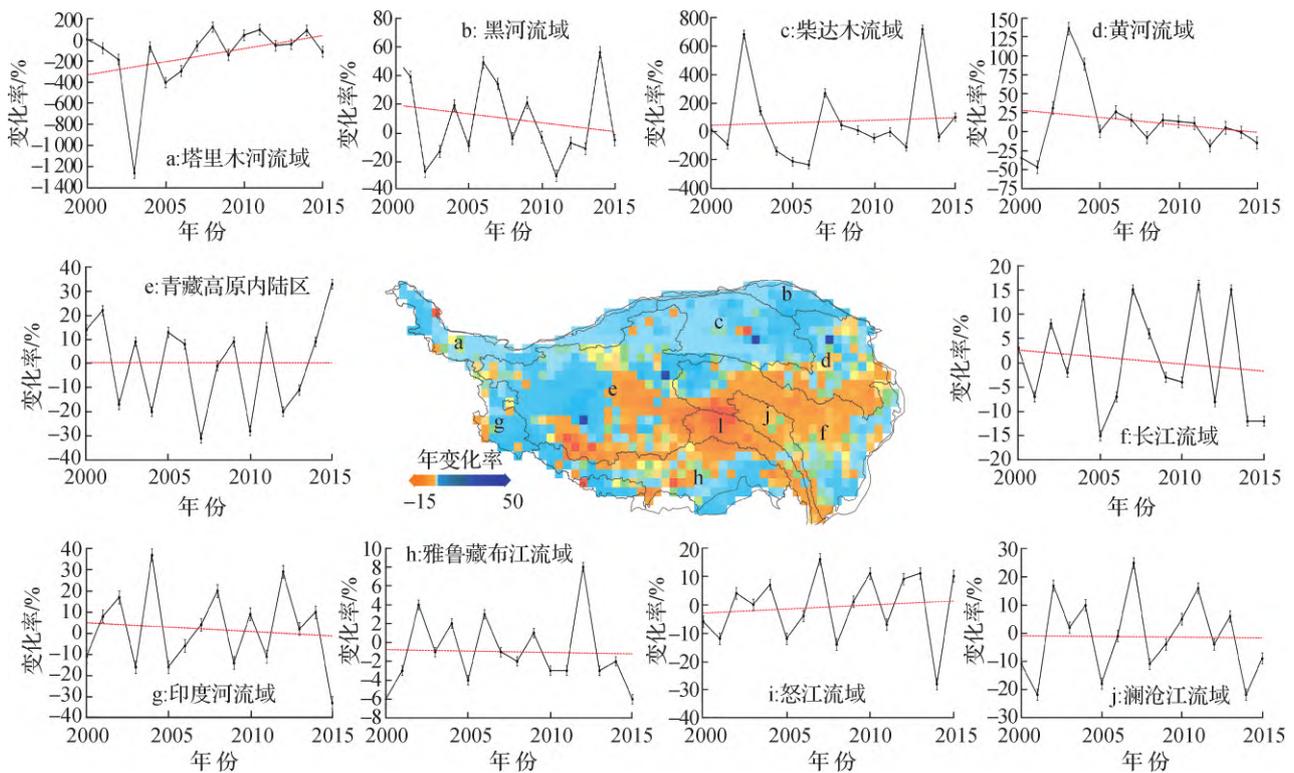


图3 青藏高原不同流域陆地储水量年变化率

Fig. 3 Annual change rate of land water storage in different watersheds of the Qinghai-Tibet Plateau

### 1.1 地表水变化

随着气候变暖,2003—2016年青藏高原区冰川和积雪等固态水资源整体呈现下降趋势,每年减少约 $(17.72 \pm 1.53) \text{ Gt}^{[11]}$ ,融水通过径流补给到地表水中,引起地表水资源增加。自20世纪80年代以来,青藏高原地表水面积总体呈上升趋势。20世纪80年代至1995年,青藏高原地表水面积略有减少;2015年可能受厄尔尼诺现象影响略有减少,之后地表水面积呈稳步增长<sup>[20]</sup>。1997—2018年,青藏高原多年平均地表水资源量为 $(511.27 \pm 30.07) \text{ Gt}^{[21]}$ ,青藏高原地表水资源量总体呈增加趋势,增速约为 $7.32 \text{ Gt}/(10 \text{ a})$ ,年变化量占多年平均地表水资源量的1.43%<sup>[21]</sup>。由于所使用的数据源不同,不同文献估算的地表水储量及变化结果有差异,但大部分研究结果表示地表水资源呈增加趋势。青藏高原地表水变化的区域差异显著且具有异质性<sup>[20]</sup>,基于WaterGAPv2.2d模型模拟显示<sup>[19]</sup>,大部分地区地表水变化相对稳定,仅青藏高原西北部地表水增加明显。可能受到极端气候变化、湖泊的退缩与扩张、径流的减少与增长等影响,导致部分区域地表水出现极端情形(图4,数据来自文献[19])。

青藏高原地区拥有着地球上第三大冰川群,高原上有36800个冰川,覆盖面积达 $49873 \text{ km}^2^{[22]}$ ,冰川覆盖率较高的流域主要有恒河、阿姆河和印度河等(表1)。随着全球变暖,1970—2018年青藏高原冰川面积平均每年减少约 $147 \text{ km}^2$ ,冰川变化量为 $(-16.61 \pm 0.92) \text{ Gt/a}$ ,总面积减少率达9.05%<sup>[23]</sup>,对整个青藏高原的陆地储水量变化贡献最大,变化率为 $(28.70 \pm 0.84) \%^{[11]}$ 。由于降水和气温的变化,2000—2020年大部分冰川区域都经历着不同程度的退缩<sup>[24]</sup>,冰川径流贡献也主要来自冰川质量不平衡的消融<sup>[25]</sup>。冰川消融加速将会引起短期水资源时空分布变化和灾害风险上升。冰川面积退缩率存在显著的空间差异,青藏高原东南部和祁连山区的冰川退缩较为明显,退缩率超过 $4\%/\text{a}^{[26]}$ ,帕米尔-喀喇昆仑山-西昆仑地区冰川退缩程度最小,平均退缩率为 $1\%/\text{a}^{[26]}$ ,甚至有部分冰川处于前进的状态,显示出弱物

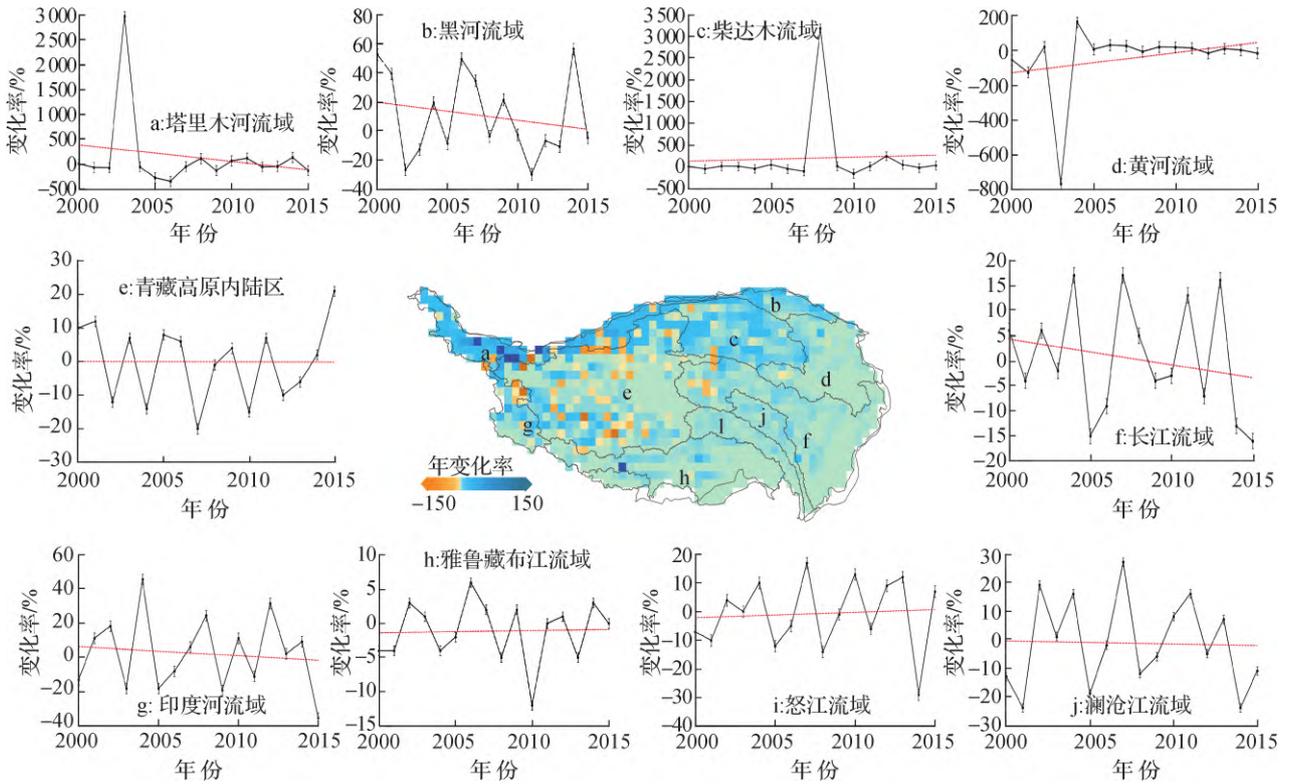


图 4 青藏高原不同流域地表水年变化率

Fig. 4 Annual rates of surface water change in different watersheds on the Qinghai-Tibet Plateau

质正平衡<sup>[27]</sup>。在冰川退缩严重的藏东南、喜马拉雅山地区,虽然在气候变暖下冰川融水量仍正在增加<sup>[28]</sup>,整体的冰川补给径流处于上升趋势(表 1),但由于冰川面积减少,在雅鲁藏布江、澜沧江和塔里木河流域的冰川融水量已经减少<sup>[29]</sup>。

1980 年以来,高原冬季积雪明显减少,高海拔地区积雪减少速率更快,尤其是高频积雪区,如高原内陆中东部和喜马拉雅山脉南麓<sup>[30]</sup>。模拟显示,青藏高原平均年融雪量为  $0.27 \pm 0.86 \text{ Gt/a}^{[11]}$ 。青藏高原地区的融雪对水资源产生重大影响,山区冬季积累雪水,春季和夏季融化,在主要的下游地区,数以百万计的人口依赖于积雪中的储水<sup>[31]</sup>。积雪对气温变暖极为敏感,随着地表温度升高,积雪覆盖的范围和持续时间显著减少,导致许多地区淡水资源补给量减少,径流量减少<sup>[28]</sup>,甚至对旅游业和水电生产造成一定影响<sup>[32]</sup>。降水增加和升温导致的融雪增多是径流量增加的主要原因,融雪越早,春季径流高峰越高,融雪径流平均占高原主要河流流域总径流的 20%~30%<sup>[33]</sup>(表 1)。

青藏高原湖泊是地表液态水的主体。湖泊总面积约为  $42\,521 \text{ km}^2^{[22]}$ ,分别占全球与中国湖泊面积的 1.9%<sup>[34]</sup>和 57.2%<sup>[35]</sup>。1976—2019 年,湖泊水量增加了  $169.7 \pm 15.1 \text{ Gt}$  ( $3.9 \pm 0.4 \text{ Gt/a}^{[11]}$ )。湖泊演化过程显示出 4 个阶段的明显转变:1920—1995 年湖泊明显收缩,小于  $10 \text{ km}^2$  的湖泊面积微弱扩张,大于  $10 \text{ km}^2$  的湖泊普遍退缩<sup>[36]</sup>;1995—2010 年线性快速增长,大多数湖泊均呈扩张趋势<sup>[36]</sup>;2000 年后扩张趋势较为显著,青藏高原湖泊水量增加  $109.8 \text{ km}^3$ ,新出现 99 个面积大于  $1 \text{ km}^2$  的湖泊,总扩张面积为  $7\,240 \text{ km}^2$ ,占湖泊总面积的 18.4%<sup>[36]</sup>;2010—2015 年相对稳定,2015—2020 年进一步增长<sup>[37]</sup>。高原北部湖泊面积和东部内流区大多数湖泊水量总体上呈增加趋势,而青藏高原南部湖泊面积和水量则呈减少趋势<sup>[38-39]</sup>,可能与降水量减少、蒸发量增加以及水利工程的运行有关<sup>[38]</sup>。湖泊面积的增加主要源于 2 个方面:一方面是降水增加或冰川积雪融化加剧导致湖泊流入量的增加,另一方面是蒸发减少导致水分流失减少<sup>[40]</sup>。自 20 世纪 90

年代中期以来,湖泊扩张也可能是受到大西洋年代涛动的正相驱动影响,1997/1998年和2015/2016年湖泊面积明显变化的拐点则归因于强厄尔尼诺事件<sup>[39]</sup>。在青藏高原北部、西部和西北部地区,冰川融水对湖泊水量的贡献较大<sup>[41]</sup>,在气候变暖与其他非气候驱动因素的共同作用下,冰川湖泊的面积和数量迅速增加<sup>[42]</sup>,冰川补给湖泊比非冰川补给湖泊扩张更快,冰川补给湖泊水位平均上升速率(0.24 m/a)略高于非冰川补给湖泊的速率(0.20 m/a)<sup>[35]</sup>。降水可能是整个青藏高原地区湖泊变化的主要原因<sup>[43]</sup>,而冰川融水随温度升高而增加可能是青藏高原地区湖泊扩张的重要原因<sup>[44]</sup>。除气候变化的影响以外,人为的灌溉和采矿也对高原上许多湖泊减少有着一定影响。如博斯腾湖、艾比湖等的面积减少<sup>[44]</sup>,可能与高原耕地需要灌溉、高原降水量有限、河流被拦截或改道导致河流下游的湖泊急剧萎缩有关<sup>[35]</sup>;而采矿会破坏地下含水层、拦截河流,从而可能导致矿区周围的湖泊迅速干涸<sup>[44]</sup>。

表1 青藏高原地区不同流域冰川积雪径流

Table 1 Glacier and snow runoff from different watersheds in the Qinghai-Tibet Plateau region

流域	出水口测量点(海拔)	冰川覆盖 比/%	冰川积雪径流贡献变化	研究时段	径流组成/%		文献
					积雪	冰川	
印度河	Tarbela	4.9	呈现上升趋势	1998—2007年	21.8	40.6	[45-46]
	>2 000 m	6.3		1985—2014年	39.7	5.1	
塔里木河	东部流域(>2 000 m)	0.9	呈现一致的上升趋势	1985—2014年	20.2	1.1	[46, 20]
	西部流域(>2 000 m)	5.8		1985—2014年	28.4	5.8	
阿姆河	Chatly	6.9	—	2001—2014年	69.0	8.0	[12-13, 46]
	>2 000 m	4.4		1985—2014年	74.4	4.4	
锡尔河	Tyumen-Aryk	2.9	—	2001—2014年	74.0	2.0	[12-13, 46]
	>2 000 m	1.7		1985—2014年	72.9	1.3	
恒河	Paksey	9.3	呈现上升趋势	2001—2014年	47.0	<1	[45-47]
	>2 000 m	4.4		1985—2014年	10.3	3.1	
	Trishuli	14.0		2007—2013年	13.9	10.7	
雅鲁藏布江	>2 000 m	2.7	呈现上升趋势	1985—2014年	13.2	1.8	[45-46, 48]
	拉萨	1.4		1963—2012年	12.2	5.9	
	工布江达	3.6		1963—2012年	11.9	17.6	
萨尔温江	嘉玉桥	1.7	呈现上升趋势	1964—2013年	6.9	7.3	[45-46, 49]
	>2 000 m	1.5		1985—2014年	14.7	1.4	
湄公河	昌都	0.4	呈现上升趋势	1964—2013年	12.4	2.0	[45-46, 49]
	>2 000 m	0.3		1985—2014年	7.4	0.3	
长江	直门达	1.0	冰川径流贡献占比在增大	—	22.2	6.5	[13, 46]
	>2 000 m	0.4		1985—2014年	5.5	0.2	
黄河	唐乃亥	0.1	—	—	22.4	0.8	[33, 46]
	>2 000 m	0.1		1985—2014年	9.6	0.1	

自20世纪90年代以来,青藏高原总径流量保持稳定或适度增加2.7%~22.4%<sup>[50]</sup>,但是青藏高原地区冰川普遍退缩、冰川融水释放导致下游地区的河川径流组分发生显著变化。在空间上,除黄河源区、雅鲁藏布江流域(除尼洋河外)年径流量整体呈不显著下降趋势<sup>[51]</sup>以外,青藏高原大部分河流源区径流量都呈现不同程度的上升趋势(表2)。青藏高原河川径流增加主要受降水和冰雪融水影响<sup>[52]</sup>,河流年径流下降与降水减少和蒸散增加等有关<sup>[53]</sup>。

表 2 青藏高原地区不同流域径流变化

Table 2 Changes in runoff from different watersheds in the Qinghai-Tibet Plateau region

所在流域	站名	集水面积/km <sup>2</sup>	研究时段	平均年径流/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	变化速率/(m <sup>3</sup> ·(10 a) <sup>-1</sup> )	变化率%	文献
长江	直门达	138 799	1957—2018 年	49.4	约 6.5 × 10 <sup>8</sup>	20.7	[9, 23]
	汉口	—	1950—2010 年	21 974.9	—	-4.1	[9, 23]
黄河	唐乃亥	122 277	1956—2018 年	604.7	约 -2.2 × 10 <sup>8</sup>	-7.9	[9, 23, 54]
	头道拐	—	1950—2010 年	588.5	—	-22.4	[9, 23, 54]
澜沧江	昌都	53 512	1960—2018 年	—	约 1.4 × 10 <sup>8</sup>	—	[9, 23]
怒江	嘉玉桥	73 632	1981—2018 年	—	约 5.4 × 10 <sup>8</sup>	—	[9, 23]
雅鲁藏布江	奴下	201 809	1956—2018 年	—	约 5.4 × 10 <sup>8</sup>	—	[9, 23]

## 1.2 地下水变化

1998—2018 年青藏高原平均地下水资源量为  $139.66 \pm 15.152$  Gt, 地下水资源量呈下降趋势, 下降速率约  $14.27$  Gt/(10 a), 占多年平均地下水资源量的  $10.22\%$  [21]。目前研究对于地下水资源变化有不同的结论。基于 GRACE 降尺度数据模拟发现, 2002—2020 年青藏高原地下水储量以  $-0.45$  mm/a 的平均速率呈下降趋势 [55]; 结合多种数据源分析发现, 2003—2016 年, 青藏高原地下水资源量呈现出明显的增长趋势 ( $5.59 \pm 1.44$  Gt/a,  $P < 0.01$ ) [11]。由于地下水资源观测难度较大, 目前大部分研究数据较依赖于水资源模型模拟研究。水循环过程相对复杂, 全面模拟较为困难, 针对时间段, 采用不同的气候模型数据与参数时, 结果可能存在较大差异, 仍需要进一步加强对地下水资源的观测与模拟。从空间分布上看, 2003—2021 年, 青藏高原东部和北部的地下水储量在减少, 而西部和南部的地下水储量在增加 [56], 青藏高原地下水储量整体以  $-0.89$  mm/a 的平均速率下降 [56], 但在 2016 年以后, 地下水储量以  $1.47$  mm/a 的速率逐渐恢复 [56]。青藏高原地下水流通常受地形坡度的驱动和维持, 在高海拔地区通过降水和冰雪融水渗透作用进行补给 [57]。地下水和地表水也密切相关, 85% 的地下水取水量来自地表水, 其余 15% 来自含水层补给 [51]。根据 Water-GAPv2.2d 模型 [19], 青藏高原地下水储量的变化趋势具有明显的空间异质性 [55], 2000 年来, 各流域地下水年变化相对稳定, 只有在黑河流域和塔里木河流域部分区域有较大的年际变化 (图 5, 数据来自文献 [19])。地下水减少区域多为高山山脉地区, 地下水流入主要与石灰岩基岩中大尺度活动断层和高海拔地区固态水资源融水补给有关。据估计, 地下水流入量约占流入湖泊总水量的  $59\% \sim 66\%$ , 地下水可能深度参与水循环过程 [58]。因此, 地下水资源变化会较为明显, 尤其在极端天气情况的年份, 可能引起很高的年变化率波动。

多年冻土阻碍或显著削弱了地下水与地表水之间的时空水力连接, 在地下水的形成、输运过程及其路径的分布模式中起着决定性的作用 [59]。2003—2016 年, 冻土冰平均减少率为  $-1.10 \pm 0.39$  Gt/a [11], 冻土退化导致地下冰融化释放出大量液态水 [40], 从而影响地下水补给源和补给量、径流路径和排泄过程以及地下水与地表水的交换等 [60]。基于冻土区地下冰分布和目前活动层增厚速率粗略估计, 青藏高原多年冻土区地下冰融化水当量约为  $80$  km<sup>3</sup>/(10 a) [61]。冻土活动层的加深会引起蒸散发增大 [62], 使得地下冰融化量增加, 直接补给地下水储量 [40], 进而影响到区域水循环过程; 冻土融化将导致更多地表水入渗地下, 减少表层土壤含水量 [63], 加大流域地下水储存量; 活动层底部增加的冻结层上水可能形成径流, 补充多年冻土区江河湖泊的径流量和冬季径流量 [63]。青藏高原多年冻土退化和地下冰融化导致湖泊水位上升, 热融湖塘的发育也促进了湖泊面积扩大。尽管现在冰川规模萎缩导致冰雪融水贡献率下降 [64], 但多年冻土区活动层增厚增大, 导致降雨下渗量增加和基流量增大。冻结的地下水被释放并参与到区域水循环之中, 河流水量受到额外补给, 改变了区域水文状况 [64]。

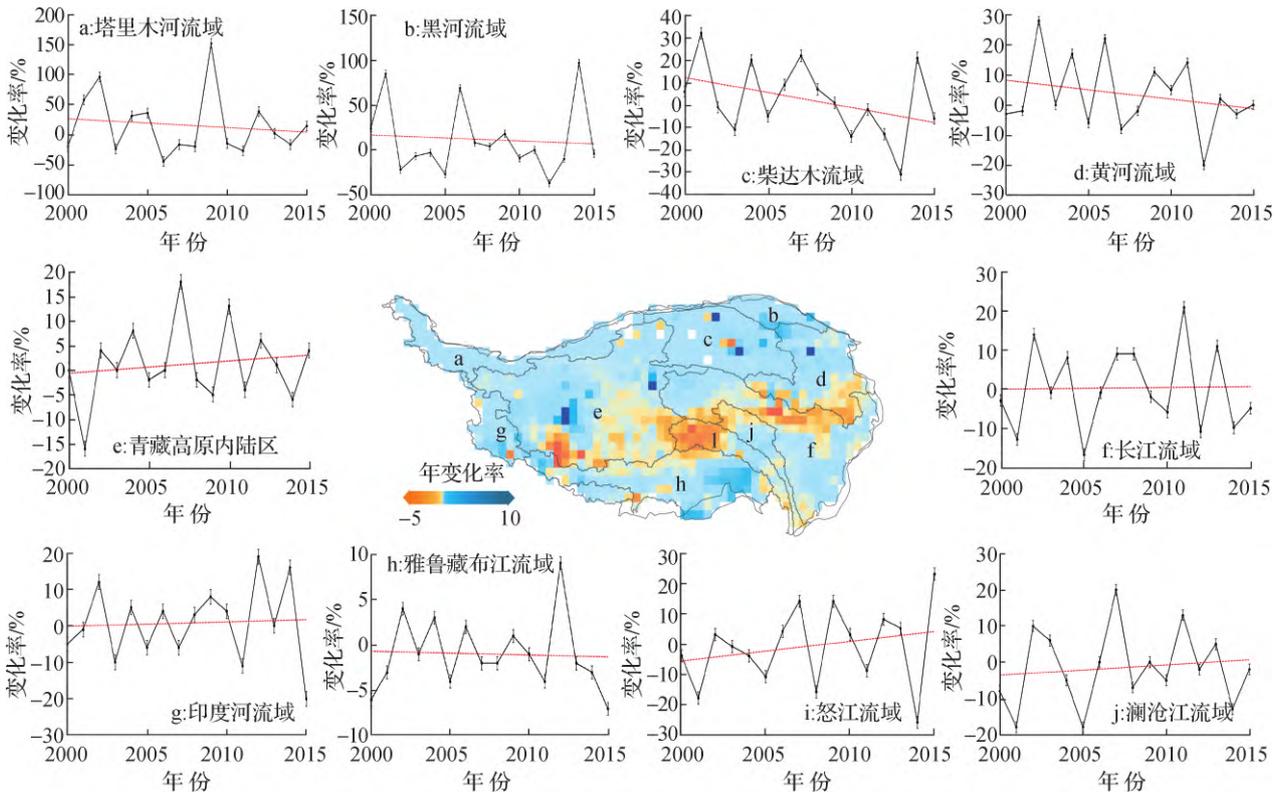


图5 青藏高原不同流域地下水年变化率

Fig. 5 Annual variation rate of groundwater in different basins of the Qinghai-Tibet Plateau

高原湿地在生态水文过程中通过蓄水功能为地下蓄水层提供补给, 调节河流径流量, 减缓洪峰流量, 维持水量平衡, 确保地下水系统稳定地接收水源, 实现可持续利用。青藏高原是中国重要的湿地分布区, 拥有独特的高原湿地, 湿地面积达 13.19 万  $\text{km}^2$ , 占全国湿地面积的 20%<sup>[21]</sup>。近 30 a 来, 青藏高原湿地总体呈现退化状态, 但变化幅度从 2000 年以后逐渐减弱, 大部分地区退化幅度明显减缓并出现局部逆转趋势<sup>[65]</sup>。近年来, 湿地变化主要受气候“暖湿化”的影响, 多年冻土面积减少, 引起湿地水分变化, 使湖泊湿地水位上升、沼泽湿地储水量增加<sup>[65]</sup>。可见, 随着气温升高, 非冰期时间延长、年蒸散速率增大、湖泊湿地面积扩张、河流水量增大<sup>[66]</sup>, 湿地面积变化呈现先减后增的状态。人为因素对于湿地变化的影响也十分重要, 例如, 1960 年后, 若尔盖湿地建造了近 1 000 条排水渠道来排干地下水, 除雨季外, 地下水流缓慢, 降低了湿地面积, 并降低了邻近的地下水位<sup>[67]</sup>; 2000—2015 年, 若尔盖部分湿地区域转变为草地、裸地和建成区, 改变了水的净化过程, 削弱了土壤调节和储存水分的能力; 2015 年后在该地区实施了许多措施和政策, 才使得湿地面积逐渐增加<sup>[39]</sup>。

## 2 青藏高原水资源问题

青藏高原作为“亚洲水塔”, 承载着丰富的冰川、积雪和冻土资源, 这些重要水源对于维持水文平衡和生态系统至关重要。随着青藏高原的冰川和积雪退缩加剧, 冻土退化速度加快, 水资源的供应和分配出现了许多问题。这些水资源变化不仅影响着青藏高原地区的生态环境, 也对下游地区的水资源供应和社会经济发展产生重要影响。青藏高原是许多主要河流的重要水源地, 全球约 20% 的人口依赖这些河流<sup>[68]</sup>, 养育着全

球约1/3的人口<sup>[69]</sup>,气候变暖对青藏高原产生了重要影响。据预测,气温升高在未来仍将持续,极端事件的强度和频率也将增加,可能造成破坏性后果<sup>[70]</sup>。当前,青藏高原面临着多种水资源风险,最主要的问题是水资源分布不平衡、水资源污染以及未来水资源供应的不确定性,综合管理和保护青藏高原的水资源至关重要。

## 2.1 分布不平衡

1980—2018年,青藏高原受到气候变暖、降水增加、蒸散量增加<sup>[71]</sup>以及人类活动破坏等影响,导致冰川和积雪融化、高山湖泊大小和分布变化以及河川径流变化,意味着储存状态(固体与液体)和空间分布不平衡不断增加,进一步导致淡水资源在储水区之间的再分配<sup>[16]</sup>,影响当地生态系统和下游地区供水的时空变化<sup>[16]</sup>,甚至导致个别地区水资源错配短缺、水污染和水生态环境恶化等问题出现<sup>[50]</sup>。尽管青海和西藏缺水指数远低于临界值<sup>[72]</sup>,总体不存在缺水问题,但从市域尺度层面,青藏高原15个市域单元中,西宁、海东和海南藏族自治州缺水指数超过临界值,分别处于极端、中度和轻度短缺状态;县域尺度层面,青藏高原的115个县域单元中,约有25%的县域单元出现不同程度的水资源短缺<sup>[72]</sup>。水资源短缺程度的测算结果对于选取的空间尺度非常敏感,在人口相对较多、农业和工业比例相对较高的地区,水资源供应往往难以满足需求。因此,县域和市域之间进行水资源的优化调配对于解决地理单元的水资源短缺问题非常重要<sup>[72]</sup>。在流域尺度上,青藏高原的供水服务呈现供过于求的状态,年盈余水量呈先增加后减少的趋势,2015年的盈余水量较2010年减少62.93%;空间上水资源高盈余值地区主要分布在北部和南部,这些地区地势较低,可以接收来自上游地区的水源,但由于水资源与人口、产业分布不匹配,少数地区存在供需不平衡的情况<sup>[73]</sup>。

## 2.2 水资源污染

1980—2018年,气候变化和人类活动对地表水环境质量安全造成多重压力,城市化加速和广泛的经济发展在水污染过程中逐渐起着决定性作用<sup>[74]</sup>,如有超过65%的湖泊系统出现微量金属污染,40%的湖泊受到严重污染,25%的湖泊为中度和轻度污染<sup>[75]</sup>。青藏高原地区在历史上人为干扰相对较低,湖泊与河流相对比较天然、清澈,污染较少<sup>[74]</sup>,但近年在青藏高原部分水质良好的湖泊河流中也发现总氮(TN)和总磷(TP)等水质参数浓度升高<sup>[76]</sup>。研究表明,青藏高原地区湖泊的营养物浓度呈上升趋势,2016年高原环境的化学需氧量(COD)、TN和TP排放总量平均为1990年的1.15~2.72倍<sup>[74]</sup>,湖区水环境恶化,重金属污染增大。例如,萨尔温江采水样本中Pb和Ni的含量很高,最大值分别为781和18 mg/L;雅鲁藏布江水样中Pb、Zn和Ni的含量很高,最大值分别为130、29和104 mg/L<sup>[77]</sup>。然而相对来说,青藏高原大部分河水中微量元素的Nemerow污染指数相对较低,为0.08~3.48;重金属评价指标、污染程度和水质指数均显示地表水资源处于优或良的状态<sup>[78]</sup>。

青藏高原地区在南亚季风和西风带的作用下,受到来自印度次大陆和欧亚大陆的有机污染物质输送<sup>[79]</sup>。在城市和郊区的空气中发现的合成纤维和微塑料,进一步证明大气可能是运输微塑料的方式之一<sup>[80]</sup>。自然水域中普遍存在微塑料污染,若未经充分去除,可能通过城市供水系统威胁人体健康。青藏高原地区河流和地表水中的平均微塑料丰度分别为247~2686 items/m<sup>3</sup>和856 items/m<sup>3</sup>,河流和湖泊沉积物中的平均微塑料丰度分别为0~933 items/m<sup>3</sup>和362 items/m<sup>3</sup><sup>[81]</sup>。居民和游客丢弃的垃圾是塑料垃圾的重要来源,由于缺乏垃圾处理和回收设施,流域内塑料废料在地表水中累积,导致微塑料污染水平不低于人类活动较为密集的发达地区,部分地级市污染甚至超过国内其他淡水流域的城市<sup>[81]</sup>。此外,青藏高原当地的寺庙小旗帜和帐篷等也是微塑料的重要来源<sup>[81]</sup>。

## 2.3 未来水资源变化情势

由于未来气候持续变暖、人口增长和城市化导致的用水需求增加,可预见青藏高原将面临固态水资源持

续减少、融水补给能力下降以及河岸地区的水资源短缺等问题,部分地区干旱和水质问题也将会更严重<sup>[82]</sup>。然而,未来水资源变化十分复杂,受到多种因素影响,当前研究数据有限,难以进行准确的定量估计和不同情景下的分析与评估。

IPCC 第六次评估报告指出,全球变暖趋势不可逆转,青藏高原山地冰川退缩将进一步加剧<sup>[52]</sup>,即使温度不再升高,冰川退缩仍将持续进行<sup>[83]</sup>,这将导致冰川和融雪径流发生剧烈变化。随着冰川退缩,冰川融水释放增加,导致径流量上升,当冰储量减少至某一水平,冰川的融化量不足以支撑径流进一步上升时,即达到拐点,冰川径流将下降<sup>[84]</sup>。根据 RCP2.6 预估,21 世纪末青藏高原地区冰川亏损量将达  $36\% \pm 7\%$ ,更高排放情景下冰川亏损量更大<sup>[69]</sup>,进入河流的冰川融水将减少  $28\% \pm 1\%$ <sup>[25]</sup>。而且,冰储量减少将增大冰川的不稳定性,进而引发水安全问题和冰川灾害<sup>[85]</sup>,对下游居民的生命财产安全构成重大威胁<sup>[86]</sup>。冰川和积雪作为不断变化的天然水库,不同的 RCP 情景和 CMIP5 模型预测,未来青藏高原年平均雪深度将普遍下降,预计下降速率约为  $0.06 \sim 0.07 \text{ cm/a}$ <sup>[87]</sup>,冰川和雪融化对径流的贡献将下降到 11.9%。积雪量的减少将会使青藏高原整体积雪径流呈下降趋势,减少对下游水资源的补给(表 3),进而影响南亚、东南亚和东亚的未来社会经济发展和当地对气候变化的适应能力<sup>[87]</sup>。

冻土退化与河流和湖泊变化之间的未来关系也仍在争论中,人们普遍认为冻土退化将导致青藏高原的水文变化<sup>[88]</sup>,但对多年冻土退化背后的机制缺乏深入了解是未来预测的最大障碍。青藏高原大部分多年冻土在 SSP2-4.5、SSP3-7.0 和 SSP5-8.5 3 种情景下,预计到 2100 年面积损失分别为  $44\% \pm 4\%$ 、 $59\% \pm 5\%$  和  $71\% \pm 7\%$ <sup>[89]</sup>,活动层厚度将分别增加  $0.7 \pm 0.1 \text{ m}$ 、 $1.5 \pm 0.3 \text{ m}$  和  $3.0 \pm 1.0 \text{ m}$ 。冻土区域地下冰的融化可以增加从地表水到地下水的补给,而地下冰本身的融化也是补给地表和地下径流的重要水源<sup>[90]</sup>。由于目前缺乏对冻土机制的深入理解和可用的模型,从地下冰释放的水量有很大不确定性<sup>[91]</sup>,难以量化青藏高原未来地下冰释放及其对水资源的影响。

表 3 青藏高原不同流域径流的未来变化

Table 3 Future changes of runoff in different basins of the Qinghai-Tibet Plateau

流域	降雨量/mm	降雪量/mm	总径流量/Gt	积雪径流/Gt	冰川径流/Gt	相对贡献		文献
						积雪/%	冰川/%	
雅鲁藏布江	554.0 ↑	84.1 ↓	76.73 ↑	2.93 ↓	13.91 ↑	3.1 ~ 5.1	13.1 ~ 21.2	[86, 92-93]
怒江上游	659.2 ↑	659.2 ↓	26.67 ↑	0.83 ↓	3.21 ↑	2.4 ~ 3.8	10.2 ~ 13.0	[86, 93]
澜沧江上游	624.3 ↓	157.2 ↓	15.67 ↑	1.70 ↓	0.89 ↓	7.7 ~ 13.0	4.8 ~ 6.2	[86, 93]
长江上游	513.2 ↓	113.8 ↓	43.00 ↑	3.22 ↓	4.45 ↑	5.3 ~ 9.8	9.4 ~ 11.2	[86, 93]
黄河上游	566.8 ↑	149.5 ↓	25.88 ↓	0.98 ↓	0.46 ↑	3.0 ~ 4.9	0.5 ~ 0.8	[86, 93]
雅砻江	796.2 ↓	73.8 ↓	48.00 ↓	0.60 ↓	0.30 ↓	0.9 ~ 1.6	2.3 ~ 2.5	[86, 93]
闽江	945.0 ↑	53.4 ↓	75.97 ↑	0.81 ↓	1.80 ↑	0.9 ~ 1.4	1.6 ~ 1.9	[86, 93]

注 “↑”表示增加,“↓”表示减少。

预计到 21 世纪末,可能有高达 84% (SSP245) 和 97% (SSP586) 的青藏高原地区受到陆地储水量短缺的影响<sup>[94]</sup>,约  $25.84\% \pm 7.87\%$  的下游流域水资源压力将会加剧<sup>[95]</sup>。在未来人口预测变化情况及  $1.5 \text{ }^\circ\text{C}$  和  $2.0 \text{ }^\circ\text{C}$  的变暖水平下,河流流量的未来减少可能会对人口激增和农业扩张的河岸地区构成缺水的威胁<sup>[14]</sup>。以印度河为例,印度河上游水资源为下游国家提供了总供水量的 1/4,但地表水供应不足已经导致该地区含水层严重枯竭;到 2030 年,印度河上游流域水资源补给下降,印度河的河流流量将减少 2.5%,导致水资源不足的人口增加 2.6%,最有可能需要加剧深层含水层的地下水开采<sup>[14]</sup>。湄公河流域也迫切需要水资源,到 2040 年,湄公河流域的总灌溉面积将增加近 1 倍<sup>[14]</sup>,将会进一步引起水资源供需不平衡问题。

### 3 结 语

受气候变化和人类活动影响,青藏高原水资源面临多方面的变化和挑战。当前固态水资源向液态水资源的转换加快,导致短期内地表水资源增加,但会减少未来的水资源供应并降低调节作用。这种变化影响了同一流域内需水和供水之间的关系,可能导致当前洪水、冰湖溃决、滑坡、泥石流等自然灾害频繁发生,同时也增加了未来干旱灾害的可能性,对农业、居民生活和经济增长带来影响。尽管青藏高原水资源开发利用程度相对较低,但人口和产业分布的不平衡导致了水资源供需错配和短缺的问题。同时,青藏高原也面临着水资源污染的挑战,需要采取有效的政策和措施来保护和治理水资源,以确保其可持续利用。未来青藏高原水资源将面临固态水资源减少、供需不平衡等问题,而人口增长、农业扩张和其他人类活动也将会加剧河岸地区的水资源短缺。

当前,需要进一步加强对水资源变化的系统观测,建设更广泛、更完善的水文监测网络,实时、准确地收集地下水位、地表水流量等关键水文要素数据;需要重视青藏高原水资源的管理和可持续利用,包括防止污染和过度开发、提高水资源利用效率,以有效应对供需不平衡的挑战。作为“亚洲水塔”,青藏高原水资源系统是一个复杂的大系统,需要加强对影响水资源变化因素的研究,深入探索气候变化对水资源系统的影响机理,从多个维度综合刻画水文过程、水资源变化和水灾害。未来的研究需要建立更为完善的高寒山区水循环综合观测网络,综合气候变化、冰冻圈动态、地下水过程等地表-地下水文过程,开展高精度的区域水文模拟与预测。

#### 参考文献:

- [1] LEE J Y, MAROTZKE J, BALA G, et al. Future global climate: scenario-based projections and near-term information [M] // Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge: Cambridge University Press, 2021: 553-672.
- [2] YOU Q, KANG S, LI J, et al. Several research frontiers of climate change over the Tibetan Plateau [J]. *J Glaciol Geocryol*, 2021, 43: 885-901.
- [3] MENG Y L, DUAN K Q, SHI P H, et al. Sensitive temperature changes on the Tibetan Plateau in response to global warming [J]. *Atmospheric Research*, 2023, 294: 106948.
- [4] KANG S C, GUO W Q, ZHONG X Y, et al. Changes in the mountain cryosphere and their impacts and adaptation measures [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2020, 16(2): 143.
- [5] YAO T D, XUE Y K, CHEN D L, et al. Recent third pole's rapid warming accompanies cryospheric melt and water cycle intensification and interactions between monsoon and environment: multidisciplinary approach with observations, modeling, and analysis [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2019, 100(3): 423-444.
- [6] HU G J, ZHAO L, WU X D, et al. Evaluation of reanalysis air temperature products in permafrost regions on the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2019, 138(3): 1457-1470.
- [7] 龚成麒,董晓华,魏冲,等. 1978—2018年青藏高原降水区划及各区降水量时空演变特征 [J]. *水资源与水工程学报*, 2022, 33(5): 96-108. (GONG C Q, DONG X H, WEI C, et al. Precipitation division of the Qinghai-Tibet Plateau from 1978 to 2018 and spatiotemporal evolution characteristics of each zone [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2022, 33(5): 96-108. (in Chinese))
- [8] SUN J, YE C C, LIU M, et al. Response of net reduction rate in vegetation carbon uptake to climate change across a unique gradient zone on the Tibetan Plateau [J]. *Environmental Research*, 2022, 203: 111894.
- [9] QIN J, DING Y J, ZHAO Q D, et al. Assessments on surface water resources and their vulnerability and adaptability in China [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2020, 11(4): 381-391.

- [10] 王顺久. 青藏高原积雪变化及其对中国水资源系统影响研究进展[J]. 高原气象, 2017, 36(5): 1153–1164. (WANG S J. Progresses in variability of snow cover over the Qinghai–Tibetan Plateau and its impact on water resources in China[J]. Plateau Meteorology, 2017, 36(5): 1153–1164. (in Chinese))
- [11] ZOU Y G, KUANG X X, FENG Y Q, et al. Solid water melt dominates the increase of total groundwater storage in the Tibetan Plateau[J]. Geophysical Research Letters, 2022, 49(18): e2022GL100092.
- [12] ARMSTRONG R L, RITTGER K, BRODZIK M J, et al. Runoff from glacier ice and seasonal snow in High Asia: separating melt water sources in river flow[J]. Regional Environmental Change, 2019, 19(5): 1249–1261.
- [13] 刘虎, 王磊. 第三极地区冰川径流研究进展[J]. 冰川冻土, 2022, 44(3): 737–752. (LIU H, WANG L. A review of glacier runoff studies in the Third Pole region[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022, 44(3): 737–752. (in Chinese))
- [14] CUI T, LI Y K, YANG L, et al. Non-monotonic changes in Asian Water Towers' streamflow at increasing warming levels[J]. Nature Communications, 2023, 14: 1176.
- [15] IMMERZEEL W W, LUTZ A F, ANDRADE M, et al. Importance and vulnerability of the world's water towers[J]. Nature, 2020, 577(7790): 364–369.
- [16] YAO T D, BOLCH T, CHEN D L, et al. The imbalance of the Asian water tower[J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2022, 3(10): 618–632.
- [17] LI X Y, LONG D, SCANLON B R, et al. Climate change threatens terrestrial water storage over the Tibetan Plateau[J]. Nature Climate Change, 2022, 12(9): 801–807.
- [18] DENG H J, CHEN Y N, CHEN X W. Driving factors and changes in components of terrestrial water storage in the endorheic Tibetan Plateau[J]. Journal of Hydrology, 2022, 612: 128225.
- [19] MÜLLER SCHMIED H, CÁCERES D, EISNER S, et al. The global water resources and use model WaterGAP v2. 2d: model description and evaluation[J]. Geoscientific Model Development, 2021, 14(2): 1037–1079.
- [20] LIU H C, HE G J, PENG Y, et al. Dynamic monitoring of surface water in the Tibetan Plateau from 1980s to 2019 based on satellite remote sensing images[J]. Journal of Mountain Science, 2021, 18(11): 2833–2841.
- [21] 周思儒, 信忠保. 近 20 年青藏高原水资源时空变化[J]. 长江科学院院报, 2022, 39(6): 31–39. (ZHOU S R, XIN Z B. Spatial and temporal characteristics of water resources in Qinghai–Tibet Plateau in recent two decades[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2022, 39(6): 31–39. (in Chinese))
- [22] YAN D J, HUANG C, MA N, et al. Improved landsat-based water and snow indices for extracting lake and snow cover/glacier in the Tibetan Plateau[J]. Water, 2020, 12(5): 1339.
- [23] 张建云, 刘九夫, 金君良, 等. 青藏高原水资源演变与趋势分析[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(11): 1264–1273. (ZHANG J Y, LIU J F, JIN J L, et al. Evolution and trend of water resources in Qinghai–Tibet Plateau[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2019, 34(11): 1264–1273. (in Chinese))
- [24] HUGONNET R, MCNABB R, BERTHIER E, et al. Accelerated global glacier mass loss in the early twenty-first century[J]. Nature, 2021, 592(7856): 726–731.
- [25] MILES E, MCCARTHY M, DEHECQ A, et al. Health and sustainability of glaciers in high Mountain Asia[J]. Nature Communications, 2021, 12(1): 2868.
- [26] LI J H, XU X L. Glacier change and its response to climate change in Western China[J]. Land, 2023, 12(3): 623.
- [27] LI S H, ZHAO H B, YU W S, et al. Glacier anomalies and relevant disaster risks on the Tibetan Plateau and surroundings[J]. Chinese Science Bulletin, 2019, 64(27): 2770–2782.
- [28] PULLIAINEN J, LUOJUS K, DERKSEN C, et al. Patterns and trends of Northern Hemisphere snow mass from 1980 to 2018[J]. Nature, 2020, 581(7808): 294–298.
- [29] ZHAO Q D, DING Y J, WANG J, et al. Projecting climate change impacts on hydrological processes on the Tibetan Plateau with model calibration against the glacier inventory data and observed streamflow[J]. Journal of Hydrology, 2019, 573: 60–81.
- [30] HE Y L, TIAN W, HUANG J P, et al. The mechanism of increasing summer water vapor over the Tibetan Plateau[J]. Journal

- of Geophysical Research: Atmospheres, 2021, 126(10): e2020JD034166.
- [31] MUSSELMAN K N, ADDOR N, VANO J A, et al. Winter melt trends portend widespread declines in snow water resources [J]. Nature Climate Change, 2021, 11(5): 418–424.
- [32] NOTARNICOLA C. Hotspots of snow cover changes in global mountain regions over 2000–2018 [J]. Remote Sensing of Environment, 2020, 243: 111781.
- [33] ZHANG L L, SU F, YANG D Q, et al. Discharge regime and simulation for the upstream of major rivers over Tibetan Plateau [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2013, 118: 8500–8518.
- [34] MESSENGER M L, LEHNER B, GRILL G, et al. Estimating the volume and age of water stored in global lakes using a geo-statistical approach [J]. Nature Communications, 2016, 7: 13603.
- [35] ZHANG G Q, YAO T D, CHEN W F, et al. Regional differences of lake evolution across China during 1960–2015 and its natural and anthropogenic causes [J]. Remote Sensing of Environment, 2019, 221: 386–404.
- [36] ZHANG G Q, YAO T D, PIAO S L, et al. Extensive and drastically different alpine lake changes on Asia's High plateaus during the past four decades [J]. Geophysical Research Letters, 2017, 44(1): 252–260.
- [37] ZHANG G Q, RAN Y, WAN W, et al. 100 years of lake evolution over the Qinghai–Tibet Plateau [J]. Earth System Science Data, 2021, 13(8): 3951–3966.
- [38] SUN F D, MA R, HE B, et al. Changing patterns of lakes on the Southern Tibetan Plateau based on multi-source satellite data [J]. Remote Sensing, 2020, 12(20): 3450.
- [39] ZHANG G Q, YAO T D, XIE H J, et al. Response of Tibetan Plateau lakes to climate change: trends, patterns, and mechanisms [J]. Earth-Science Reviews, 2020, 208: 103269.
- [40] 朱立平, 张国庆, 杨瑞敏, 等. 青藏高原最近 40 年湖泊变化的主要表现与发展趋势 [J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(11): 1254–1263. (ZHU L P, ZHANG G Q, YANG R M, et al. Lake variations on Tibetan Plateau of recent 40 years and future changing tendency [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2019, 34(11): 1254–1263. (in Chinese))
- [41] QIAO B J, ZHU L P, YANG R M. Temporal–spatial differences in lake water storage changes and their links to climate change throughout the Tibetan Plateau [J]. Remote Sensing of Environment, 2019, 222: 232–243.
- [42] SHUGAR D H, BURR A, HARITASHYA U K, et al. Rapid worldwide growth of glacial lakes since 1990 [J]. Nature Climate Change, 2020, 10(10): 939–945.
- [43] 龙笛, 李雪莹, 李兴东, 等. 遥感反演 2000–2020 年青藏高原水储量变化及其驱动机制 [J]. 水科学进展, 2022, 33(3): 375–389. (LONG D, LI X Y, LI X D, et al. Remote sensing retrieval of water storage changes and underlying climatic mechanisms over the Tibetan Plateau during 2000–2020 [J]. Advances in Water Science, 2022, 33(3): 375–389. (in Chinese))
- [44] TAO S L, FANG J Y, MA S H, et al. Changes in China's lakes: climate and human impacts [J]. National Science Review, 2020, 7(1): 132–140.
- [45] LUTZ A F, IMMERZEEL W W, SHRESTHA A B, et al. Consistent increase in High Asia's runoff due to increasing glacier melt and precipitation [J]. Nature Climate Change, 2014, 4(7): 587–592.
- [46] KHANAL S, LUTZ A F, KRAAIJENBRINK P D A, et al. Variable 21st century climate change response for rivers in High Mountain Asia at seasonal to decadal time scales [J]. Water Resources Research, 2021, 57(5): e2020WR029266.
- [47] KAYASTHA R B, STEINER N, KAYASTHA R, et al. Comparative study of hydrology and icemelt in three Nepal River basins using the glacio-hydrological degree-day model (GDM) and observations from the advanced scatterometer (ASCAT) [J]. Frontiers in Earth Science, 2020, 7: 354.
- [48] ZHANG Y G, XU C Y, HAO Z C, et al. Variation of melt water and rainfall runoff and their impacts on streamflow changes during recent decades in two Tibetan Plateau basins [J]. Water, 2020, 12(11): 3112.
- [49] WANG X Y, YANG T, XU C Y, et al. The response of runoff components and glacier mass balance to climate change for a glaciated High-mountainous catchment in the Tianshan Mountains [J]. Natural Hazards, 2020, 104(2): 1239–1258.
- [50] XIAO Y, XIONG Q L, LIANG P H, et al. Potential risk to water resources under eco-restoration policy and global change in the

- Tibetan Plateau [J]. *Environmental Research Letters*, 2021, 16(9): 094004.
- [51] SCANLON B R, FAKHREDDINE S, RATEB A, et al. Global water resources and the role of groundwater in a resilient water future [J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2023, 4(2): 87–101.
- [52] ZHANG F, THAPA S, IMMERZEEL W, et al. Water availability on the Third Pole: a review [J]. *Water Security*, 2019, 7: 100033.
- [53] ZHU Y X, SANG Y F, WANG B, et al. Heterogeneity in spatiotemporal variability of High Mountain Asia's runoff and its underlying mechanisms [J]. *Water Resources Research*, 2023, 59(7): e2022WR032721.
- [54] 梁斌, 齐实, 李智勇, 等. 青藏高原湖泊面积动态变化及其对气候变化的响应 [J]. *山地学报*, 2018, 36(2): 206–216. (LIANG B, QI S, LI Z Y, et al. Dynamic change of lake area over the Tibetan Plateau and its response to climate change [J]. *Mountain Research*, 2018, 36(2): 206–216. (in Chinese))
- [55] GAO G L, ZHAO J, WANG J X, et al. Spatiotemporal variation and driving analysis of groundwater in the Tibetan Plateau based on GRACE downscaling data [J]. *Water*, 2022, 14(20): 3302.
- [56] REN W H, GAO Y Y, QIAN H, et al. Spatiotemporal variation characteristics of groundwater storage and its driving factors and ecological effects in Tibetan Plateau [J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(9): 2418.
- [57] MA R, SUN Z Y, CHANG Q X, et al. Control of the interactions between stream and groundwater by permafrost and seasonal frost in an alpine catchment, Northeastern Tibet Plateau, China [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2021, 126(5): e2020JD033689.
- [58] LEI Y B, YANG K, IMMERZEEL W W, et al. Critical role of groundwater inflow in sustaining lake water balance on the Western Tibetan Plateau [J]. *Geophysical Research Letters*, 2022, 49(20): e2022GL099268.
- [59] SHAN W, WANG Y, GUO Y, et al. Impacts of climate change on permafrost and hydrological processes in Northeast China [J]. *Sustainability*, 2023, 15(6): 4974.
- [60] JIN H J, HE R X, CHENG G D, et al. Changes in frozen ground in the Source Area of the Yellow River on the Qinghai–Tibet Plateau, China, and their eco–environmental impacts [J]. *Environmental Research Letters*, 2009, 4(4): 045206.
- [61] WANG L X, ZHAO L, ZHOU H Y, et al. Permafrost ground ice melting and deformation time series revealed by sentinel–1 InSAR in the tanggula mountain region on the Tibetan Plateau [J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(4): 811.
- [62] 季芳, 范林峰, 匡星星, 等. 青藏高原多年冻土退化对蒸散发的影响 [J]. *水科学进展*, 2022, 33(3): 390–400. (JI F, FAN L F, KUANG X X, et al. Role of permafrost degradation on evapotranspiration on the Qinghai–Tibet Plateau [J]. *Advances in Water Science*, 2022, 33(3): 390–400. (in Chinese))
- [63] ZHANG G Q, YAO T, SHUM C, et al. Lake volume and groundwater storage variations in Tibetan Plateau's endorheic basin [J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(11): 5550–5560.
- [64] QIAO B J, NIE B K, LIANG C M, et al. Spatial difference of terrestrial water storage change and lake water storage change in the inner Tibetan Plateau [J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(10): 1984.
- [65] 赵志刚, 史小明. 青藏高原高寒湿地生态系统演变、修复与保护 [J]. *科技导报*, 2020, 38(17): 33–41. (ZHAO Z G, SHI X M. Ecosystem evolution of alpine wetland in Tibetan Plateau and consideration for ecological restoration and conservation [J]. *Science & Technology Review*, 2020, 38(17): 33–41. (in Chinese))
- [66] KRAAIJENBRINK P D A, BIERKENS M F P, LUTZ A F, et al. Impact of a global temperature rise of 1.5 degrees Celsius on Asia's glaciers [J]. *Nature*, 2017, 549(7671): 257–260.
- [67] YAN W C, WANG Y Y, CHAUDHARY P, et al. Effects of climate change and human activities on net primary production of wetlands on the Zoige Plateau from 1990 to 2015 [J]. *Global Ecology and Conservation*, 2022, 35: e02052.
- [68] QIN J, DING Y J, ZHAO Q D, et al. Assessments on surface water resources and their vulnerability and adaptability in China [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2020, 11(4): 381–391.
- [69] ZHANG F, ZENG C, ZHANG Q G, et al. Securing water quality of the Asian Water Tower [J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2022, 3(10): 611–612.
- [70] KARKI R, UL HASSON S, GERLITZ L, et al. Rising mean and extreme near–surface air temperature across Nepal [J]. *Inter-*

- national Journal of Climatology, 2020, 40(4): 2445–2463.
- [71] LIU Y, YAO X L, WANG Q Y, et al. Differences in reference evapotranspiration variation and climate-driven patterns in different altitudes of the Qinghai–Tibet Plateau (1961–2017) [J]. *Water*, 2021, 13(13): 1749.
- [72] 孙思奥, 任宇飞, 张蕃. 多尺度视角下的青藏高原水资源短缺估算及空间格局 [J]. *地球信息科学学报*, 2019, 21(9): 1308–1317. (SUN S A, REN Y F, ZHANG Q. A multi-scale perspective on water scarcity assessment in the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2019, 21(9): 1308–1317. (in Chinese))
- [73] LIU J Y, QIN K Y, XIE G D, et al. Is the ‘water tower’ reassuring? Viewing water security of Qinghai–Tibet Plateau from the perspective of ecosystem services ‘supply–flow–demand’ [J]. *Environmental Research Letters*, 2022, 17(9): 094043.
- [74] WU Y, WANG S R, NI Z K, et al. Emerging water pollution in the world’s least disturbed lakes on Qinghai–Tibetan Plateau [J]. *Environmental Pollution*, 2021, 272: 116032.
- [75] SHEN D, WANG Y F, JIA J J, et al. Trace metal spatial patterns and associated ecological toxic effects on phytoplankton in Qinghai–Tibet Plateau lake systems along with environmental gradients [J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 610: 127892.
- [76] TONG Y D, LI J Q, QI M, et al. Impacts of water residence time on nitrogen budget of lakes and reservoirs [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 646: 75–83.
- [77] DU H L, WANG J S, WANG Y, et al. Contamination characteristics, source analysis, and spatial prediction of soil heavy metal concentrations on the Qinghai–Tibet Plateau [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2023, 23(5): 2202–2215.
- [78] LI L M, WU J, LU J, et al. Water quality evaluation and ecological–health risk assessment on trace elements in surface water of the Northeastern Qinghai–Tibet Plateau [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2022, 241: 113775.
- [79] SUN T, YE B, WANG, et al. Pollution of PAHs in China’s lakes and its source apportionment: a review [J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 43(6): 151–160.
- [80] YAO Z Y, LI X Y, XIAO J H. Characteristics of daily extreme wind gusts on the Qinghai–Tibet Plateau, China [J]. *Journal of Arid Land*, 2018, 10: 673–685.
- [81] LIU R P, DONG Y, QUAN G, et al. Microplastic pollution in surface water and sediments of Qinghai–Tibet Plateau: current status and causes [J]. *China Geology*, 2021, 4(1): 178–184.
- [82] GUO Y N, LI P Y, HE X D, et al. Groundwater quality in and around a landfill in Northwest China: characteristic pollutant identification, health risk assessment, and controlling factor analysis [J]. *Exposure and Health*, 2022, 14(4): 885–901.
- [83] DING Y J, ZHANG S Q, ZHAO L, et al. Global warming weakening the inherent stability of glaciers and permafrost [J]. *Science Bulletin*, 2019, 64(4): 245–253.
- [84] HUSS M, HOCK R. Global-scale hydrological response to future glacier mass loss [J]. *Nature Climate Change*, 2018, 8(2): 135–140.
- [85] NIE Y, PRITCHARD H, LIU Q, et al. Glacial change and hydrological implications in the Himalaya and Karakoram [J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2021, 2: 91–106.
- [86] VIVIROLI D, KUMMU M, MEYBECK M, et al. Increasing dependence of lowland populations on mountain water resources [J]. *Nature Sustainability*, 2020, 3(11): 917–928.
- [87] YOU Q L, WU T, SHEN L C, et al. Review of snow cover variation over the Tibetan Plateau and its influence on the broad climate system [J]. *Earth–Science Reviews*, 2020, 201: 103043.
- [88] HUANG Q, LONG D, DU M D, et al. An improved approach to monitoring Brahmaputra River water levels using retracked altimetry data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 211: 112–128.
- [89] ZHANG G F, NAN Z T, HU N, et al. Qinghai–Tibet Plateau permafrost at risk in the late 21st century [J]. *Earth’s Future*, 2022, 10(6): e2022EF002652
- [90] WANG Y H, YANG H B, GAO B, et al. Frozen ground degradation may reduce future runoff in the headwaters of an inland river on the Northeastern Tibetan Plateau [J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 564: 1153–1164.
- [91] GAO H K, WANG J J, YANG Y Z, et al. Permafrost hydrology of the Qinghai–Tibet Plateau: a review of processes and modeling [J]. *Frontiers in Earth Science*, 2021, 8: 576838.

- [92] BIEMANS H , SIDERIUS C , LUTZ A F , et al. Importance of snow and glacier meltwater for agriculture on the Indo–Gangetic Plain [J]. *Nature Sustainability* , 2019 , 2( 7) : 594–601.
- [93] I W , FENG L A , KUANG X X , et al. Divergent and changing importance of glaciers and snow as natural water reservoirs in the eastern and southern Tibetan Plateau [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* , 2022 , 127( 7) : e2021JD035888.
- [94] ZHANG Q , SHEN Z X , POKHREL Y , et al. Oceanic climate changes threaten the sustainability of Asia’s water tower [J]. *Nature* , 2023 , 615( 7950) : 87–93.
- [95] LENG X J , FENG X M , FU B J , et al. ‘Asian water towers’ are not a sustainable solution to the downstream water crisis [J]. *Science of the Total Environment* , 2023 , 856: 159237.

## Status and problems of water resources on the Qinghai–Tibet Plateau\*

WANG Xin<sup>1 2</sup> , LIAN Wenhao<sup>1</sup> , WEI Junfeng<sup>1</sup> , ZHANG Yong<sup>1</sup> , YIN Yongsheng<sup>1</sup> ,  
WANG Qiong<sup>1</sup> , ZHANG Fagang<sup>1</sup>

- ( 1. *School of Earth Science and Spatial Information Engineering , Hunan University of Science and Technology , Xiangtan 411201 , China;*  
2. *State Key Laboratory of Cryospheric Science , Northwest Institute of Ecological and Environmental Resources , Chinese Academy of Sciences , Lanzhou 730000 , China*)

**Abstract:** The Qinghai–Tibet Plateau has the highest and most numerous group of plateau lakes in the world , the largest glacier area on earth except for the North and South poles , and the largest perennial permafrost distribution area in mid–latitude in the world. Grasping the changing characteristics and trends of water resources on the Qinghai–Tibet Plateau is crucial for the construction of the ecological security barrier on the Qinghai–Tibet Plateau. Based on the literatures , the structural characteristics , changes and problems of water resources on the Qinghai–Tibet Plateau are systematically sorted out and summarised. Over the past decades , the water resources of the Qinghai–Tibet Plateau have shown the characteristics of glacier retreat , snowpack reduction , lake expansion , increased runoff changes , wetland degradation , permafrost degradation , etc. , and the overall trend of accelerated conversion of solid water resources to liquid water resources on the surface. This trend of conversion has led to the aggravation of water resources imbalance and increased the risk of water disasters , bringing new challenges to water resources security. There is a need to strengthen the monitoring of water resource changes on the Qinghai–Tibet Plateau , to carry out a systematic survey of the status and evolution of water resources on the Qinghai–Tibet Plateau , to improve the ability to comprehensively simulate the availability of water resources on the Qinghai–Tibet Plateau under different scenarios , and to systematically assess the imbalance and security of water resources on the Qinghai–Tibet Plateau.

**Key words:** water resources; surface water; groundwater; Qinghai–Tibet Plateau

\* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China ( No.42171137; No.42171134) .