

近 50 年来中国山地地表水资源变化

黄 鹏^{1,2}, 王根绪^{1,2,*}

(1. 四川大学水利水电学院, 成都 610000;

2. 四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 成都 610000)

摘要: 山地系统作为“世界水塔”, 为人类社会发展提供了重要的水资源; 然而, 近几十年来山地水资源发生明显变化, 威胁着人类可持续发展。基于长期的水文、气象以及相关环境要素资料, 利用趋势分析方法, 本研究系统分析了近 50 年来中国山地地区水资源的变化规律。结果表明, 近 50 年来中国山地地表水资源均出现明显变化, 且各山区的变化趋势存在差异, 其中青藏高原与天山地区地表水资源总体呈增加趋势, 而横断山区、太行山、秦岭、长白山以及云贵高原地区地表水资源出现不同程度的减少趋势。进一步分析表明, 各山地地表水资源变化的主要影响过程存在明显差异, 气候变化对高海拔的青藏高原和天山地区地表水资源变化起主导作用, 人类相关活动对其它山地地区的影响则更加强烈。为应对中国山地地表水资源变化带来的挑战, 需充分考虑各山地地区独特的自然环境以及社会系统。

关键词: 中国山地; 地表水资源; 趋势分析; 适应对策

DOI: 10.48014/fcws.20220930001

引用格式: 黄鹏, 王根绪. 近 50 年来中国山地地表水资源变化[J]. 中国水科学前沿, 2023, 1(4): 41-52.

0 引言

全球山地水资源约超过总河流水资源的 30%, 而一些地区山地水资源的占比能达到 95%^[1]。山地作为“世界水塔”, 为下游地区提供了源源不断的优质水源, 下游地区的人类社会对山地水资源的依赖性也急剧增加, 近 50 年来增加了约 3 倍^[2]。我国山地较多, 深刻影响了国家水资源的时空分配格局, 如“亚洲水塔”青藏高原是长江、黄河、澜沧江、怒江以及雅鲁藏布江等大江大河的发源地; 发源于“中亚水塔”天山的伊犁河、开都河和清水河等河流是该地区主要的水资源; “中央水塔”秦岭是汉江、嘉陵江、渭河等河流的发源地, 也是我国“南水北调中线工程”和“引汉济渭工程”的水源涵养区; 太行

山是“华北水塔”的重要组成, 发源于沁河、漳河、漳河等河流; “东北水塔”长白山是松花江、鸭绿江和图们江等河流的发源地(图 1)。山地地区通常海拔较高, 其形成的丰富水资源在重力作用下, 可以通过河流网络或地下水含水层运输至较远的低海拔地区, 如长江、黄河共横跨我国 18 个省级行政区, 将青藏高原的水资源输送至东部地区, 哺育了无数生命, 而天山地区水资源被河流输送至较为干旱的下游地区, 成为当地重要的水资源。

然而, 近年来受气候变化以及人类活动的双重影响, 山地水资源发生了剧烈变化, 威胁人类社会的可持续发展^[3,4]。尽管当前已有学者针对个别中国山地地区的地表水资源演变趋势展开研究, 但较少研究系统分析中国主要山地地区地表水资源的

* 通讯作者 Corresponding author: 王根绪, wanggx@scu.edu.cn

收稿日期: 2022-09-30; 录用日期: 2023-09-05; 发表日期: 2023-12-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(U2240226)资助。

变化规律。本文基于长期的地表径流观测资料,并结合气象、植被等数据,系统揭示近 50 年来我国主要山地地区地表水资源的演变特征。

1 数据与方法

1.1 研究数据

本研究包括了中国的山地地区,即青藏高原、横断山区、天山、太行山、秦岭、长白山和云贵高原(图 1),收集了 24 个水文站径流观测资料,见表 1。本研究还使用了 TERRACLIMATE 的气

象数据集(降水、最高、最低温度),该数据集为融合了多个产品的高精度气象数据(<https://www.climatologylab.org/terraclimate.html>)。此外,本研究使用了 GIMMS 的归一化植被指数(NDVI)数据(https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/NASA_GIMMS_3GV0#terms-of-use),GLIMS 的冰川覆盖数据(http://www.glims.org/MapsAndDocs/downloaded_field_desc.html)以及 COPENICUS 的土地利用数据(<https://land.copernicus.eu/global/products/lc>)。

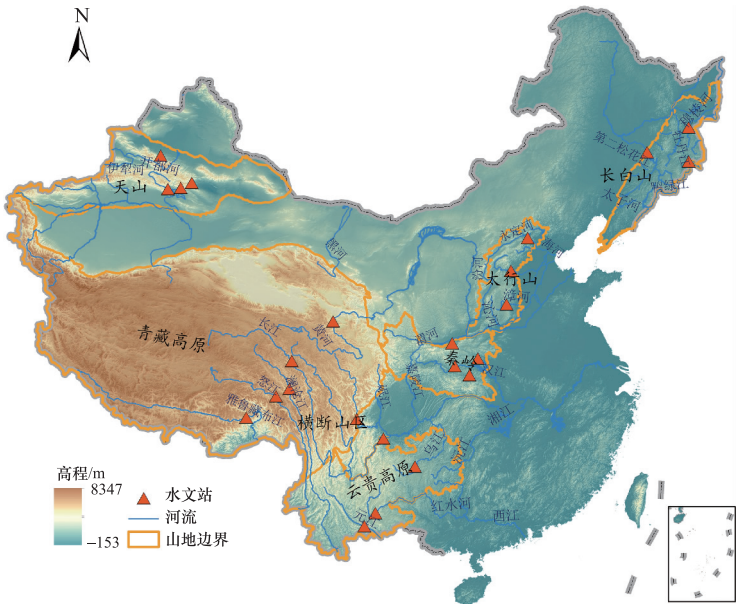


图 1 中国主要山地以及河流分布

Fig. 1 Distribution of China’s major mountains and rivers

注:该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2020)4619 号的标准地图制作,底图无修改,后图同。

表 1 水文站信息		
Table 1 Hydrological station information		
地区	流域(控制水文站)	时间范围
青藏高原	黄河(唐乃亥站)	1956—2018 年
	雅鲁藏布江(奴下站)	1956—2018 年
	长江(直门达站)	1957—2018 年
	澜沧江(昌都站)	1960—2018 年
	怒江(嘉玉桥站)	1981—2018 年
横断山区	长江(屏山站)	1960—2011 年
	岷江(泸定站)	1982—2018 年
天山	奎屯河(将军庙站)	1964—2018 年

续表		
地区	流域(控制水文站)	时间范围
	开都河(大山口站)	1972—2016 年
	清水河(克尔古提站)	1956—2012 年
	阿拉沟河(阿拉沟站)	1956—2012 年
太行山	滹沱河(小觉站)	1957—2013 年
	漳河(匡门口站)	1959—2017 年
	永定河(官厅水库站)	1956—2016 年
秦岭	丹江(紫荆关站)	1956—2005
	堵河(竹山站)	1962—2015 年
	灞河(马渡王站)	1956—2018 年

续表

地区	流域(控制水文站)	时间范围
长白山	甸河(向家坪站)	1956—2018年
	穆棱河(梨树镇站)	1963—2013年
	松花江(扶余站)	1956—2018年
云贵高原	图们江(南坪站)	1960—2016年
	元江(蛮耗站)	1956—2013年
	南盘江(江边街站)	1956—2016年
	乌江(鸭池河站)	1960—2019年

1.2 研究方法

1.2.1 趋势评估与显著性检验

本研究采用 Sen 与 Mann-Kendall(MK)相结合的方法对长时间序列的气象、水文等资料进行趋势评估和显著性检验。Sen 趋势度计算方法如下:

$$\beta = \text{Median}\left(\frac{x_j - x_i}{j - i}\right), \forall 1 < i < j < n \quad (1)$$

其中 β 为该序列的平均变化率以及事件序列的趋势,当 β 为正值时,序列呈上升趋势;当 β 为负值时,序列呈下降趋势;Median 为取中值函数; x_j, x_i 分别为第 j, i 时间序列对应的观测值。

MK 变化趋势显著性检验的计算方法如下:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \times \sum_{j=i+1}^n \text{sign}(x_j - x_i) \quad (2)$$

其中 S 为统计量, $\text{sign}(x_j - x_i)$ 计算方法如下:

$$\text{sign}(x_j - x_i) = \begin{cases} 1, (x_j - x_i) > 0 \\ 0, (x_j - x_i) = 0 \\ -1, (x_j - x_i) < 0 \end{cases} \quad (3)$$

统计量 S 大致的服从正态分布,在不考虑序列存在等值数据点的情况下,其均值 $E(S) = 0$, 方差 $\text{Var}(S) = n(n-1)(2n+5)/18$ 。检验统计量 Z 计算如下:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, S > 0 \\ 0, S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, S < 0 \end{cases} \quad (4)$$

Z 为正值表示序列上升趋势,负值表示减少趋势, Z 的绝对值在大于等于 1.645, 1.96, 2.576 时表示分别通过了置信度 90%, 95%, 99% 的显著性

检验。

1.2.2 径流变差系数

径流变差系数 cv 被用来评估径流的年际变化差异:

$$cv = \frac{\text{std}(x)}{\text{mean}(x)} \quad (5)$$

其中 std 表示标准差; mean 平均值函数。

1.2.3 归一化径流

为了比较不同山地地区径流的变化趋势,本研究将径流序列进行归一化:

$$x'_i = \frac{\max(x) - x_i}{\max(x) - \min(x)} \quad (6)$$

其中 \max 与 \min 分布表示取最大值和最小值函数。

2 结果与讨论

2.1 中国山地地表水资源的演变趋势

2.1.1 近50年来中国地表水资源变化趋势

近50年间,中国山地地表水资源均出现明显变化,且各山区的变化趋势存在差异(图2)。近50年来青藏高原地表水资源总体呈增加趋势,但各流域的地表水资源变化亦有不同^[5-7]:长江源区直门达水文站以上流域地表水资源呈明显增加趋势,尤其在近20年增加最为明显,其增加趋势通过MK检验,达到显著水平,但途经横断山区后,长江上游金沙江流域屏山水文站观测的地表水资源增加趋势减弱,呈非显著性增加趋势,而长江支流岷江泸定水文站以上流域的地表水资源更是呈现显著减少趋势;澜沧江源区(昌都水文站以上)、怒江源区(嘉玉桥水文站以上)及雅鲁藏布江源区(奴下水文站以上)的地表水资源增加趋势稍弱,未达到显著水平;然而黄河唐乃亥水文站以上源区地表水资源却呈现一定减少趋势,尽管未达到显著水平,但与青藏高原其他源区的地表水资源变化趋势明显不同。近50年来天山地区地表水资源总体也呈现增加趋势,其中清水河源区(克尔古提水文站以上)、阿拉沟河源区(阿拉沟水文站以上)等地表水资源具有显著增加趋势^[8],奎屯河源区(将军庙水文站以上)、开都河源区(大山口水文站以上)等地表水资源增加趋势较弱^[9,10]。不同于高海拔的青藏高原和天山

地区,近 50 年来秦岭地区地表水资源总体呈现减少趋势,其中秦岭的灞河流域(马渡王水文站以上)、丹江流域(紫荆关水文站以上)和旬河流域(向家坪水文站以上)等地表水资源均呈现显著减少趋势^[11,12],而秦岭南部的堵河流域(竹山水文站以上)流域地表水资源减少趋势并不显著^[13]。近 50 年来太行山地区地表水资源也呈现出显著的减少趋势,其北部的永定河流域(官厅水库水文站以上)、中部的漳河流域(匡门口水文站以上)以及南部的滹沱河流域(小觉水文站以上)地表水资源均呈现显著减少趋势^[14-16]。近 50 年来长白山地区地表水资源

呈现出稍弱的减少趋势,其第二松花江流域(扶余水文站以上)、图们江流域(南坪水文站以上)以及穆稜河流域(梨树镇水文站以上)地表水资源均呈现非显著性减少趋势^[17-19]。近 50 年来南方的云贵高原山区地表水资源亦呈现出减少趋势,其中珠江流域上游的南盘江流域(江边街水文站以上)呈现出显著的减少趋势^[20],而乌江流域(鸭池河水文站以上)和元江流域(蛮耗水文站以上)地表水资源均呈现非显著性减少趋势^[21,22]。总之,除了青藏高原和天山以外,我国大部分山地河流地表水资源均不同程度出现减少态势。

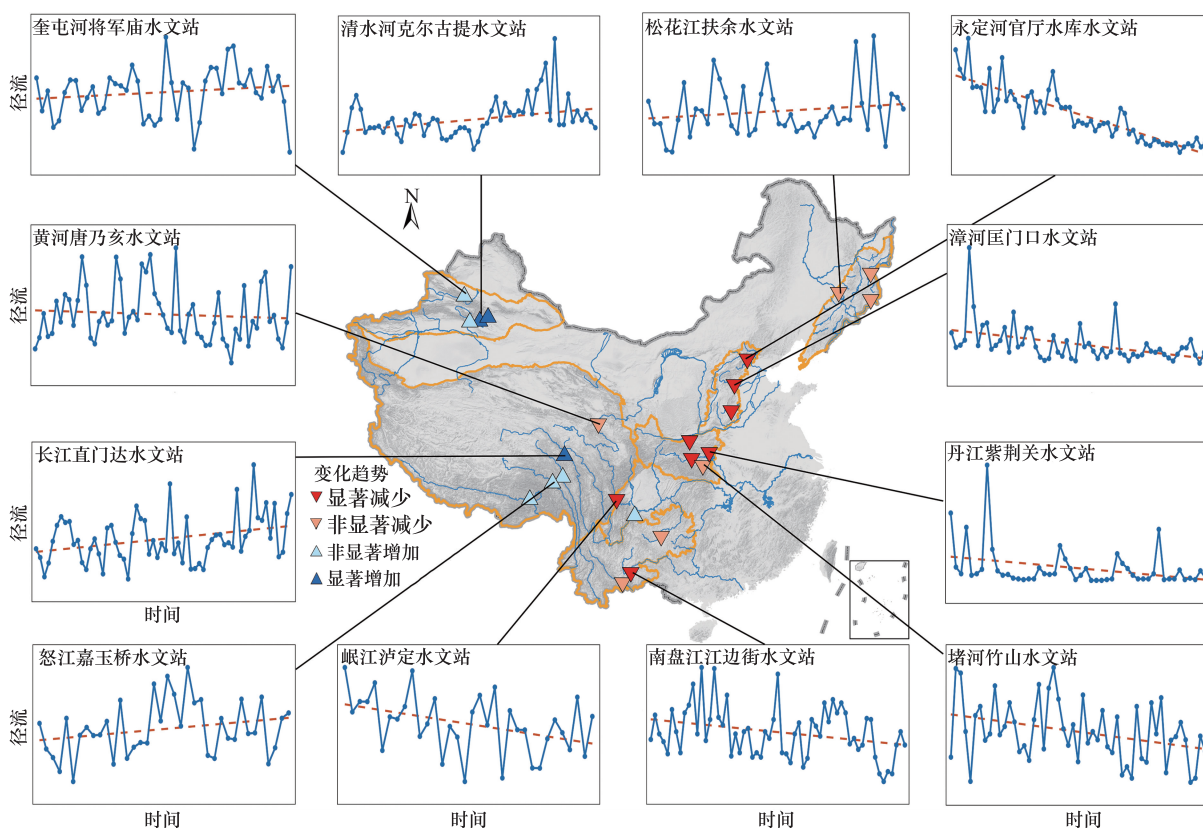


图 2 近 50 年来中国山地地表水资源变化趋势

Fig. 2 Trend of mountain surface water resources in China in recent 50 years

同时,近 50 年来中国山地地表水资源年内分布也存在变化。青藏高原地表水资源年内峰值发在 6—9 月,基本与降水 and 气温峰值同期出现^[23],近 50 年来其地表水资源在春季、秋季和冬季增长趋势更为明显,夏季变化则不显著,使得地表水资源年内分布格局出现较大变化^[5]。天山地区地表水资源年内分配不均,多集中在夏季(6—8 月),占全年的 50%左右,但近 50 年来天山地区地表水资源峰值出

现提前或推后倾向,阿拉沟源区地表水资源峰值从 7 月提前到 6 月^[8],而开都河源区地表水资源峰值推后了近半个月^[10]。秦岭地区地表水资源在年内主要集中在夏、秋两季,其峰值一般出现在 9 月,近 50 年来秦岭地区各季节地表水资源均有减少趋势,但不同流域的变化趋势存在差异,例如灞河流域地表水资源除冬季外的其他季节都明显减少^[24],而金钱河流域(南宽坪水文站以上)春季和冬季地表水

资源减少趋势极为显著,但夏季只有较弱的减少趋势^[25]。太行山地区地表水资源年内多集中在汛期(6—10月),占全年地表水资源的70%左右,近50年来各季节地表水资源皆呈减少趋势,但汛期地表水资源减少的绝对量值最大,导致太行山地区地表水资源年内趋向于均化^[16]。长白山地区地表水资源年内分布也较为集中,地表水资源主要集中在4—10月,约占全年地表水资源的90%,近50年来长白山地区地表水资源年内分布变化趋势稍有不同,其北部的穆棱河流域地表水资源年内分布不均匀趋势增加^[19],而东部的图们江流域各季节地表水资源存在不同程度减少,但夏季地表水资源减少趋势最为明显^[18]。云贵高原地区地表水资源年内主要集中在5—11月,近50年来云贵高原地区地表水资源年内分配不均匀性减弱^[20,22],尤其是南盘江流域近

20年来枯季径流占比增加,汛期减少趋势明显。

2.1.2 近10年中国山地水资源变化态势

此外,近10年来中国山地地表水资源呈现出新的变化态势。近10年来青藏高原长江、黄河源区以及怒江源区地表水资源均呈现较弱的减少趋势(图3及表2)。同时,近10年来横断山区的岷江高场水文站以上流域、天山地区的开都河流域以及秦岭地区的灞河、旬河等流域地表水资源也出现减少趋势,然而太行山的永定河流域地表水资源且呈现出明显增加趋势。此外,近10年来各山地地区径流变差系数也存在明显不同,青藏高原、天山以及横断山区的径流变差系数相对较低,地表水资源较为稳定,但太行山、秦岭以及长白山等地区的径流变差系数相对较高,其地表水资源年际变化较大(表2)。

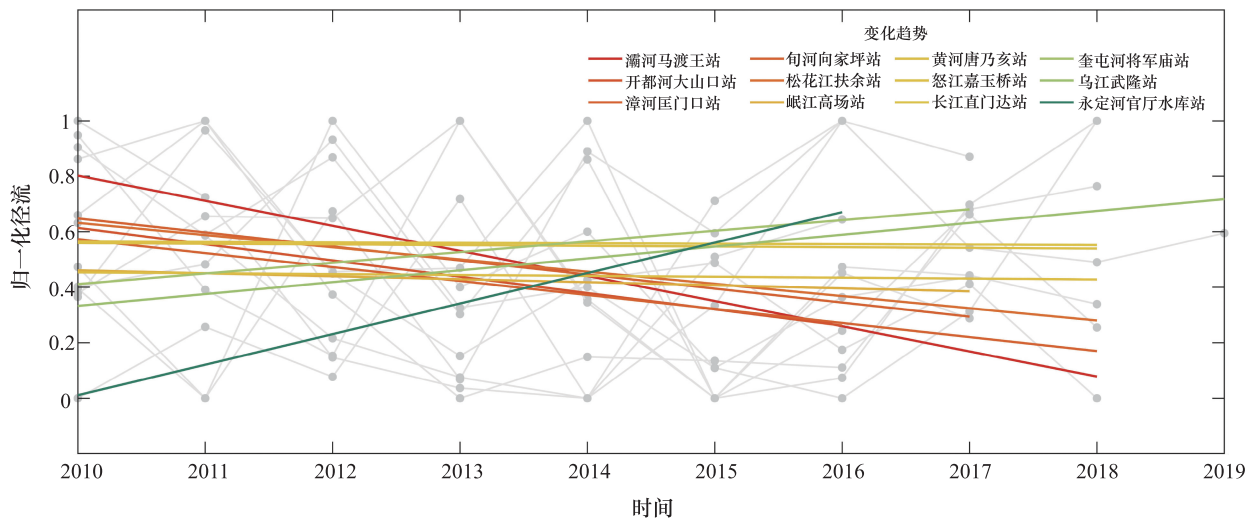


图3 近10年来中国山地地表水资源变化趋势,趋势值见表2

Fig. 3 Trend of mountain surface water resources in China in recent 10 years, the trend values are shown in Table 2

表2 近10年来中国山地地表水资源变化趋势及变差系数

Table 2 Trend and variation coefficient of mountain surface water resources in China in recent 10 years

地区	流域(控制水文站)	变化趋势($\times 10^{-2}$ /年)	径流变差系数
青藏高原	长江(直门达站)	-0.14	0.21
	黄河(唐乃亥站)	-0.42	0.25
	怒江(嘉玉桥站)	-0.25	0.14
横断山区	岷江(高场站)	-1.17	0.10
天山	奎屯河(将军庙站)	3.79	0.13
	开都河(大山口站)	-5.87	0.14
太行山	永定河(官厅水库站)	10.99	0.14
	漳河(匡门口站)	-5.06	0.44

续表

地区	流域(控制水文站)	变化趋势($\times 10^{-2}$ /年)	径流变差系数
秦岭	旬河(向家坪站)	-5.04	0.39
	灞河(马渡王站)	-9.05	0.33
长白山	松花江(扶余站)	-4.40	0.42
云贵高原	乌江(武隆站)	4.34	0.23

2.2 中国山地地表水资源变化的影响机制

2.2.1 气候变化对中国山地地表水资源的影响

气候变化是近 50 年来中国山地地表水资源变化的重要因素,不同山地地区地表水资源对气候变化的响应存在明显差异,这也是各山地地表水资源变化趋势不同的主要原因。青藏高原与天山地区作为高纬度、高海拔的地区,其地表水资源来源包括降水以及冰川、冻土和积雪融化等过程(图 4a),相似的水文过程导致其地表水资源变化趋势对降水、温度等气象因子的变化有着较为接近的响应。近 50 年来青藏高原和天山地区降水和温度总体都呈现增加趋势(图 4b~d),“暖湿化”效应明显,降水增加直接导致地表水资源增多,而温度的增加也会导致这两个区域冰川、冻土和积雪的融化,成为地表水资源的重要补给来源^[26,27],因此青藏高原和天山地区大部分流域地表水资源呈现增加趋势。但局部地区气象因子的变化趋势仍有不同,如黄河源区东部降水呈减少趋势(图 4b),这也是近 50 年来黄河源区地表水资源呈下降趋势的部分原因。此外,温度增加虽然能够加速冰川冻土融化,增加水资源补给,但冻土融化也会引发新的水文效应,例如横断山区长江上游部分低海拔季节性冻土融化现象明显,土壤渗透性能增加,导致地表水资源减少,然而在高海拔多年冻土区径流系数则往往较高,有利于地表水资源的产生^[28]。尽管秦岭、太行山、长白山以及云贵高原等其他山地地区温度也呈增加趋势,但这些区域并没有冰川融化等过程,加之这些地区降水存在减少趋势(图 4a~d),不同程度上导致这些地区地表水资源呈减少趋势。事实上,太行山整个地区降水皆呈现显著的减少趋势,而秦岭和长白山两个地区南、北部的降水变化趋势存在一定差异,秦岭南部地区降水有一定增加趋势,但北侧却呈减少趋势,相反,长白山北部降水呈

增加趋势,而南部呈减少趋势(图 4b)。这部分解释了太行山的各流域地表水资源均呈现显著减少趋势,而秦岭部分流域地表水资源呈显著减少,一些流域地表水资源变化并不显著,长白山地区地表水资源呈非显著性的减少趋势。同时云贵高原的南盘江流域降水减少趋势相比于该地区的其他流域更加明显,在一定程度上也解释了云贵高原地区只有南盘江流域地表水资源呈显著下降趋势,而乌江和元江流域地表水资源下降趋势并不显著。

同时,气候变化也改变了中国山地地表水资源的年内分布状况。青藏高原近 50 年来降水季节性变化趋势较为显著,尤其在春季和冬季降水增加极为突出^[29],这主导了青藏高原地表水资源的季节性变化;同时,气温的上升,尤其在春、秋、冬三个季节,会改变气温分布的“临界点”,加剧冰川、冻土以及积雪等融化,因此青藏高原地区冰川冻土覆盖较高流域的地表水资源季节性变化也与各季节气温的变化密切相关。由于冰川与冻土融化对地表水资源的补给,以及强降水发生季节的变化,天山地区地表水资源峰值的出现时间也发生了改变,但各流域冰川、冻土覆盖面积的不同,导致了它们对降水、气温变化的敏感性不一致^[8],如冰川冻土覆盖率更大的阿拉沟流域对气温更为敏感,而清水河流域对降水变化更为敏感。在没有冰川冻土覆盖的秦岭地区,降水的年内变化很大程度上决定了该地区地表水资源的季节性变化,但近 50 年来秦岭部分流域径流系数呈减少趋势,其原因主要是该地区气温和植被覆盖的增加导致更多降水转为蒸散发^[25],说明气温和植被覆盖的变化在一定程度上也能够影响该地区地表水资源的季节性变化。相似地,近 50 年来太行山地区径流系数也呈减少趋势,同时各季节地表水资源均明显减少^[30],这与该地区降水减少和气温上升密切相关。而长白山近 50 年来南、北部降水分别呈减少和增加趋势,其产生重要的影响包

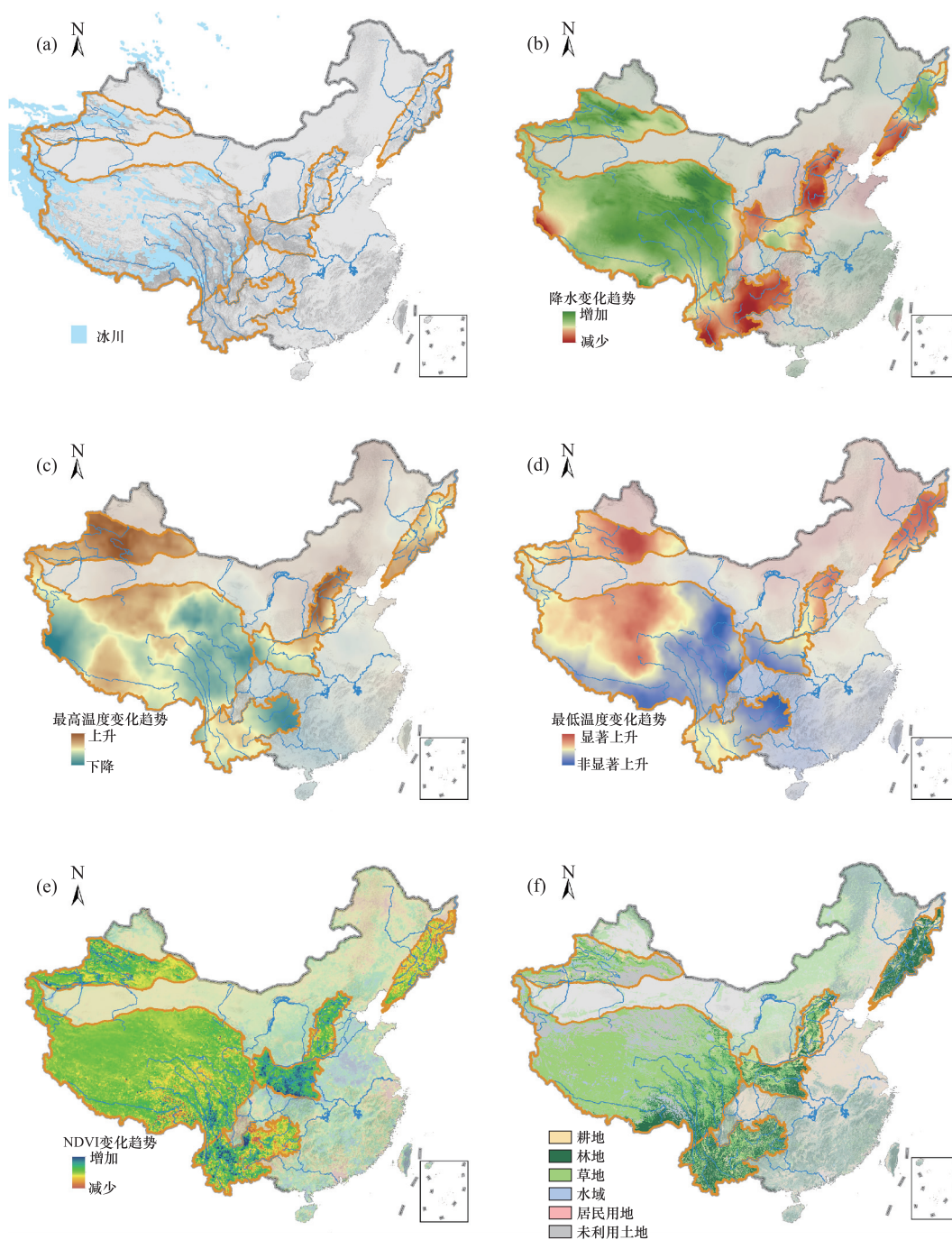


图 4 中国山地地表水资源变化影响因素

Fig. 4 Factors influencing changes in surface water resources in Chinese mountainous regions

括北部的穆棱河流域地表水资源年内分布不均匀性增加^[19],而图们江流域各季节地表水资源均呈减少趋势^[18]。

2.2.2 人类活动对中国山地地表水资源的影响

人类通过耕地、放牧、植树造林等方式改变流域下垫面条件,间接影响了区域地表水资源,同时

也可通过农业灌溉、调水、水库建设等过程直接影响区域地表水资源。青藏高原和天山地区是我国重要的牧场,过度放牧导致区域水源涵养能力降低^[31],进一步影响地表水资源变化,而近些年相关草地生态工程的实施,植被覆盖呈现增加趋势,也促进了地表蒸散发过程,但总的来说这两个区域人类活动影响较为有限^[32-34],对地表水资源的贡献约

为10%~30%，其中黄河源区地表水资源受人类活动影响相对较大^[34,35]，贡献超过了50%，横断山区的岷江流域受到的影响更为显著^[36]，贡献为60%左右。秦岭与太行山地区人类活动影响较为明显，秦岭地区由于植树造林与退耕还林等生态工程的实施，该区域植被覆盖呈显著增加趋势(图4e)，增加了植被对地表水资源的消耗，间接影响了秦岭地表水资源，同时秦岭相关水利工程的实施直接影响了地表水资源的时空格局，近些年人类活动对秦岭的地表水资源影响越加显著^[25,37]，其对地表水资源变化的贡献接近50%；太行山地区近50年耕地扩张显著，城镇化进程较快，工农业耗水增多，且兴修水利工程，显著影响了该地区的地表水资源变化，其人类活动的影响能高达70%^[16]，同时由于植被恢复工程的实施，永定河等部分流域植被覆盖存在明显增加趋势，对地表水资源减少也起着重要作用^[14]。长白山地区林地覆盖较高，耕地较少(图4f)，同时建立了长白山国家级自然保护区，有效减少了人类活动对该地区地表水资源的影响，但自然保护区内的相关交通、旅游设施修建，引起了局部植被覆盖减少^[38]，在一定程度上也会引起地表水资源变化。此外，云贵高原地区水能资源丰富，水电工程建设较多，在很大程度上影响了该地区地表水资源的年内分布趋势，导致地表水资源年内分布“均化”趋势明显^[20]。

2.2.3 气候变化和人类活动对中国山地地表水资源的联合影响

事实上，气候变化与人类活动对中国山地地表水资源的影响并不是相互独立的，两者对地表水资源变化存在着联合作用。同时，中国不同山地地区自然条件与人类社会存在明显差异，这也导致各地区气候变化与人类活动之间的联合作用机制并不一致。青藏高原气候变化与人类活动对地表水资源的联合作用主要通过共同影响其陆地生态系统而实现，作为地球第三极，其陆地生态系统主要为草地(图4f)，一方面其生态系统较为脆弱，受损后需要较长的恢复期，另一方面其对气候变化极为敏感。气候“暖湿化”以及相关生态环境工程共同驱动了该地区植被覆盖的增加(图4e)，并促进了降水转化为蒸散发，因此气候变化与人类活动驱动的植

被变绿在一定程度上还会消减气候“暖湿化”对地表水资源的增加效应^[39]。不过在一些低海拔地区仍然能观测到部分植被呈减少趋势(图4e)，其主要是由于这些区域强烈的人类活动主导了植被变化趋势^[40]。秦岭地区气候状况并没有明显的“暖湿化”现象，而该地区植被却显著增加(图4e)，这表明国家实施的天保工程及退耕还林工程等人类活动主导了该地区植被覆盖增加，并在一定程度上增加了植被对水资源的消耗。然而太行山地区近50年来降水呈显著减少趋势，加上该地区耕地扩张，农业灌溉用水需求增大，两者共同导致了该地区地表水资源的显著减少。对于人类活动相对较少的长白山地区，气候变化主导了该地区的地表水资源变化。云贵高原地区气候变化对其地表水资源的年际变化影响较大，但人类活动主要导致了该地区地表水资源的年内分布趋势发生变化。

2.3 中国山地地表水资源变化的适应对策

山地系统作为地球淡水资源的“水塔”，是众多河流的发源地，其水资源不仅支撑了当地社会经济的发展，还对下游生态系统以及人类社会起着至关重要的作用。但近50年来中国山地地表水资源呈现显著的变化趋势，且影响机制较为复杂。为应对中国山地地表水资源变化带来的挑战，需充分考虑各山地地区独特的自然环境以及社会系统，结合山地地表水资源变化的影响机制，提出适应对策。

(1)提升气象水文与生态环境变化观测能力，加强中国山地地表水资源演变机制研究。中国山地地区自然环境相对恶劣，气象水文与生态环境等要素观测站较少，难以系统认识地表水资源以及相关驱动要素的变化，限制了对中国山地地表水资源演变机制的研究。因此，针对青藏高原以及天山地区“暖湿化”现象，加强对冰川冻土融化、生态系统变化等过程观测，明确相关过程对地表水资源变化的影响效应，揭示气象、生态以及人类对地表水资源变化的共同作用机制；针对太行山地区地表水资源受到人类活动强烈影响，量化耕地扩张、城镇化等过程对地表水资源变化的间接影响，明确人类活动和气候变化对地表水资源的耦合效应；针对植被覆盖较高的秦岭、长白山以及云贵高原地区，加强植被生态系统对水循环过程影响研究，提升地表水

资源变化对生态水文过程响应机制认识。

(2)明确生态系统与社会系统水资源供需关系,优化中国山地地表水资源调控策略。近50年来中国山地地表水资源发生显著变化,对人类社会系统的水资源供给量随之变化,但与此同时,近50年来人类社会系统水需求量以及用水结构也发生变化,此外,生态系统演变过程对水资源也存在深刻影响。因此,考虑青藏高原以及天山地区“暖湿化”带来水资源变化的同时,更要认清由于冰川冻土融化引起水资源增加的不可持续性,应明确气候变化下该地区水资源变化的“拐点”,预测未来水资源的供给量变化,为优化水资源调控提供依据;同时,针对植被生态系统加速水资源消耗问题,应深入揭示秦岭、太行山和长白山等地区植被生态系统调水和耗水之间的协调关系,提升生态系统水资源的供给能力;此外,针对气候变化及人类活动对中国山地水资源年内分布变化趋势的影响,应合理调整年内不同季节的水资源需求量,不断优化用水结构,提高中国山地水资源的利用效率。

(3)建立上下游生态补偿机制,提升流域水资源调控能力。中国山地地区作为河流重要的发源地,下游地区的生态系统以及社会系统也极为依赖其提供的水资源。上游山地地区保护生态环境,提升水资源保障能力,对下游地区的生态系统功能维护,社会经济可持续发展提供了重要水资源保障。如青藏高原黄河流域源区为全流域提供了近35%的水量,是下游地区乃至整个流域社会经济发展的关键。因此,需从全流域角度出发,统筹安排上下游水资源,合理协调上下游利益,建立上下游生态补偿机制,系统提升流域水资源调控能力,实现水资源高效利用,推动全流域高质量发展。

(4)稳定与提升山地水源涵养功能,增强山地水资源应对气候变化的韧性与可持续水资源供给保障能力。明确气候变化和人类活动影响下青藏高原和天山地区草原生态系统,秦岭、太行山、长白山和云贵高原地区林地生态系统的水源涵养功能演变特征及驱动机制,针对各山区不同自然条件与社会系统,建立水源涵养功能提升的管理措施、调控途径与关键决策,提高各生态系统对山地水资源的涵养能力,增强山地水资源应对气候变化的韧性与可持续水资源供给保障能力。

3 结论

本研究基于我国主要的山地地区的气象、水文及相关环境要素资料,系统分析了近五十年来我国山地地表水资源变化规律,主要结论为:

(1)近50年来中国山地地表水资源均出现明显变化,且各山区的变化趋势存在差异,其中青藏高原与天山地区地表水资源总体呈增加趋势,而横断山区、太行山、秦岭、长白山以及云贵高原地区地表水资源出现不同程度的减少趋势。

(2)气候变化与人类活动共同影响近50年来中国山地地表水资源变化,但二者对不同山地地区地表水资源对气候变化的影响存在着明显差异。其中高海拔地区的青藏高原和天山地区地表水资源变化主要受到气候变化的影响,人类相关活动对其他山地地区的影响则更加强烈。

(3)为应对中国山地地表水资源变化带来的挑战,需充分考虑各山地地区独特的自然环境以及社会系统,结合山地地表水资源变化的影响机制,提出适应对策。

利益冲突:作者声明无利益冲突。

参考文献(References)

- [1] Viviroli D, Dürr H H, et al. Mountains of the world, water towers for humanity: Typology, mapping, and global significance [J]. *Water Resources Research*, 2007, 43: W07447.
doi:10.1029/2006wr005653
- [2] Viviroli D, Kummu M, et al. Increasing dependence of lowland populations on mountain water resources. *Nature Sustainability*[J]. 2020, 3: 917-928.
doi:10.1038/s41893-020-0559-9.
- [3] Immerze W W, Lutz A F, et al. Importance and vulnerability of the world's water towers[J]. *Nature*, 2020, 577: 364-369.
doi:10.1038/s41586-019-1822-y
- [4] Shi R, Wang T, et al. Streamflow decline threatens water security in the upper Yangtze river[J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 606: 127448.
doi:10.1016/j.jhydrol.2022.127448
- [5] 张建云, 刘九夫, 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: 1264-1273.
doi:10.16418/j.issn.1000-3045.2019.11.009
- [6] 沈嘉聚, 杨汉波, 等. 长江上游年径流对气象要素年变化的敏感性[J]. 水资源保护, 1-16.
- [7] Hu J, Ma J, et al. Attribution Analysis of Runoff Change in Min-Tuo River Basin based on SWAT model simulations, China[J]. Sci Rep, 2020, 10: 2900.
doi:10.1038/s41598-020-59659-z
- [8] 李玉平, 韩添丁, 等. 天山南坡清水河与阿拉沟流域径流变化特征及其对气候变化的响应[J]. 冰川冻土, 2018, 40: 127-135.
- [9] 张慧, 李忠勤, 等. 近 50 年新疆天山奎屯河流域冰川变化及其对水资源的影响[J]. 地理科学, 2017, 37: 1771-1777.
doi:10.13249/j.cnki.sgs.2017.11.020
- [10] 向燕芸, 陈亚宁, 等. 天山开都河流域积雪、径流变化及影响因子分析[J]. 资源科学, 2018, 40: 1855-1865.
- [11] 柯新月, 汪妮. 秦岭南北典型流域径流变化规律的对比研究[J]. 西安理工大学学报, 2019, 35: 452-458.
doi:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2019.04.008
- [12] 陈伏龙, 王京, 等. 紫荆关流域降雨径流变化趋势的分析[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2010, 28: 101-105.
doi:10.13880/j.cnki.65-1174/n.2010.01.010
- [13] 梁小青, 纪昌明, 等. 1962—2015 年堵河流域径流变化特征分析[J]. 水力发电, 2019, 45: 4-8+31.
- [14] 杜勇, 李建柱, 等. 1982—2015 年永定河山区植被变化及对天然径流的影响[J]. 水利学报, 2021, 52: 1309-1323.
doi:10.13243/j.cnki.slxb.20210201
- [15] 申滔滔, 任政, 等. 基于 Budyko 假设的匡门口流域径流变化归因分析[J]. 水利科技与经济, 2021, 27: 48-52.
- [16] 王盛, 李文静, 等. 滹沱河上游径流演变及其影响因素分析[J]. 甘肃农业大学学报, 2020, 55: 162-169.
doi:10.13432/j.cnki.jgsau.2020.03.021
- [17] 汪雪格, 胡俊, 等. 松花江流域 1956—2014 年径流量变化特征分析[J]. 中国水土保持, 2017, 10: 61-65+72.
doi:10.14123/j.cnki.swcc.2017.0262
- [18] 孙凡博, 余凤, 等. 图们江干流流域气候因素对径流影响变化分析[J]. 安徽农业科学, 2019, 47: 1-4.
- [19] 曹振宇. 穆棱河流域上游径流年内分配特性[J]. 水电能源科学, 2019, 37: 21-25.
- [20] 谷桂华, 李学辉, 等. 气候变化和人类活动对南盘江上游径流的定量影响[J]. 人民珠江, 2020, 41: 21-27.
- [21] 肖杨, 周旭, 等. 降水和人类活动对乌江上游径流变化的影响分析[J]. 水资源与水工程学报, 2021, 32: 91-98.
- [22] 李雪, 李运刚, 等. 1956—2013 年元江-红河流域径流变化及其影响因素分析[J]. 资源科学, 2016, 38: 1149-1159.
- [23] 汤秋鸿, 兰措, 等. 青藏高原河川径流变化及其影响研究进展[J]. 科学通报, 2019, 64: 2807-2821.
- [24] 舒媛媛, 李娜, 等. 澜河流域近 50 年径流量变化特征分析[J]. 水资源与水工程学报, 2015, 26: 102-105.
- [25] 白红英, 侯钦磊, 等. 50 年来秦岭金钱河流域水文特征及其对降水变化的响应[J]. 地理科学, 2012, 32: 1229-1235.
doi:10.13249/j.cnki.sgs.2012.10.018
- [26] Zhang L, Su F, 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.
doi:10.1002/jgrd.50665
- [27] 王一冰, 谢先红, 等. 多源降水数据驱动下青藏高原径流集合模拟[J]. 科学通报, 2021, 66: 4169-4186.
- [28] Shi R, Yang H, et al. Spatiotemporal variations in frozen ground and their impacts on hydrological components in the source region of the Yangtze River [J]. Journal of Hydrology, 2020, 590: 125237.
doi:10.1016/j.jhydrol.2020.125237
- [29] 冯川玉, 李陈彧, 等. 青藏高原降水变化特征及趋势分析[J]. 水文, 2022, 42: 75-79.
doi:10.19797/j.cnki.1000-0852.20200539
- [30] 王金凤, 武桃丽. 漳河上游径流变化特征及其归因分析[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33: 165-171.
doi:10.13448/j.cnki.jalre.2019.303
- [31] 底阳平, 张扬建, 等. “亚洲水塔”变化对青藏高原生态系统的影响[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34: 1322-1331.
doi:10.16418/j.issn.1000-3045.2019.11.015
- [32] Yang Y, Weng B, et al. Analyzing the contributions of climate change and human activities on runoff in the Northeast Tibet Plateau [J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2020, 27: 100639.
doi:10.1016/j.ejrh.2019.100639
- [33] Liu J, Chen J, et al. Attribution of Runoff Variation in the Headwaters of the Yangtze River Based on the Budyko Hypothesis [J]. Int J Environ Res Public Health, 2019, 16: 2506.
doi:10.3390/ijerph16142506
- [34] Chu H, Wei J, et al. Identification of the impact of climate change and human activities on rainfall-runoff re-

- lationship variation in the Three-River Headwaters region[J]. *Ecological Indicators*, 2019, 106:105516.
doi:10.1016/j.ecolind.2019.105516
- [35] Feng A, Li Y, et al. The determinants of streamflow variability and variation in Three-River Source of China: climate change or ecological restoration? [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2017, 76:1-10.
doi:10.1007/s12665-017-7026-6
- [36] 郭文献, 周昊彤, 等. 岷江流域径流变化及成因分析[J]. *水电能源科学*, 2022, 40:32-36.
- [37] 马新萍, 白红英, 等. 52a 来秦岭南北径流变化对比及影响因素[J]. *干旱区地理*, 2013, 36:1032-1040.
doi:10.13826/j.cnki.cn65-1103/x.2013.06.011
- [38] 张建亮, 刘方正, 等. 长白山国家级自然保护区植被时空变化及其驱动因子[J]. *生态学报*, 2016, 36:3525-3536.
- [39] Zhang J, Zhang Y, et al. Climate variability masked greening effects on water yield in the Yangtze River Basin during 2001-2018 [J]. *Water Resources Research*, 2022, 58:e2021WR030382.
- [40] 李焱, 巩杰, 等. 藏西南高原植被覆盖时空变化及其与气候因素和人类活动的关系[J]. *地理科学*, 2022, 42:761-771.
doi:10.13249/j.cnki.sgs.2022.05.002

Changes of Surface Water Resources in China's Mountains in the Past 50 Years

HUANG Peng^{1,2}, WANG Genxu^{1,2,*}

(1. College of Water Resource and Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610000, China; 2. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610000, China)

Abstract: Mountains, provide crucial water resources for the development of human society, are the water towers of the world. However, mountain water resources have undergone marked changes in recent decades, posing a threat to sustainable human development. Based on long-term hydrological, meteorological, and related environmental data, this study analyzes the evolving patterns of water resources in China's mountains over the past 50 years using trend analysis methods. The results indicate that surface water resources in China's major mountains have undergone noticeable changes over the past 50 years, with varying trends among different mountains. The Qinghai-Tibet Plateau and Tianshan regions show an overall increasing trend in surface water resources, while the Hengduan Mountains, Taihang Mountains, Qinling Mountains, Changbai Mountains, and Yunnan-Guizhou Plateau have witnessed decreasing trends to varying degrees. Furthermore, there are differences in the primary processes influencing surface water resource changes across various mountains. For example, climate change plays a predominant role in driving surface water resource changes in the high-altitude Qinghai-Tibet Plateau and Tianshan region, while human-related activities exert a stronger impact on surface water resource changes in other mountains. To address the challenges brought about by changes in China's mountain surface water resources, it is crucial to take into full consideration the unique natural environments and social systems of each mountain.

Keywords: Chinese mountains; surface water resources; trend analysis; adaptation strategies

DOI: 10.48014/fcws.20220930001

Citation: HUANG Peng, WANG Genxu. Changes of surface water resources in China's mountains in the past 50 years [J]. Theory and Practice of Chinese Pedagogy, 2023, 1(4): 41-52.

Copyright © 2023 by author(s) and Science Footprint Press Co., Limited. This article is open accessed under the CC-BY License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

