

川西亚高山区域的水源涵养功能变化趋势

汪璇^{1,3}, 邓丽梅^{1,3}, 刘刚才¹, 陆传豪^{1,3}, 董先勇², 朱万泽¹

(1.中国科学院 山地表生过程与生态调控重点实验室, 中国科学院、水利部 成都山地灾害与环境研究所 四川 成都 610041; 2.中国三峡集团公司, 四川 成都 610041; 3.中国科学院大学 北京 100049)

摘要: [目的] 揭示川西亚高山区水源涵养功能的变化趋势, 为明确该区的水源涵养动态特征提供科学依据。[方法] 以岷江上游的杂谷脑河流域为例, 根据杂谷脑河流域出口处的历年降水、气温和水沙资料, 应用水量平衡原理, 研究该流域水源涵养能力的变化特征。[结果] ①研究区径流量呈明显减少趋势, 平均每年减少 2.83 mm, 即水源涵养量平均每年提升 28.3 t/hm², 特别是 2000 年左右(开始实施生态保护和生态修复工程)至 2020 年, 平均每年减少 3.12 mm, 即水源涵养量平均每年提升 31.2 t/hm²; ②径流中的含沙量也呈显著的递减趋势, 即表明该区的径流在递减而土壤保持能力在提升; ③研究区降水无显著的波动式变化, 表明径流减少不是降水导致的。[结论] 生态保护和生态修复等生态工程对水源涵养有明显的促进作用。

关键词: 亚高山; 水源涵养; 变化趋势; 生态系统; 川西

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2022)01-0303-05

中图分类号: S157.1

文献参数: 汪璇, 邓丽梅, 刘刚才, 等. 川西亚高山区域的水源涵养功能变化趋势[J]. 水土保持通报, 2022, 42(1):303-307. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.01.040; Wang Xuan, Deng Limei, Liu Gangcai, et al. Change trend of water-holding function in alpine and subalpine regions of Western Sichuan Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(1):303-307.

Change Trend of Water-holding Function in Alpine and Subalpine Regions of Western Sichuan Province

Wang Xuan^{1,3}, Deng Limei^{1,3}, Liu Gangcai¹, Lu Chuanhao^{1,3}, Dong Xianyong², Zhu Wanze¹

(1.Key Laboratory of Mountain Surface Processes and Ecological Regulation, Chinese

Academy of Sciences, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of

Sciences and Ministry of Water Conservancy, Chengdu, Sichuan 610041, China; 2.China Three Gorges

Corporation, Chengdu, Sichuan 610041, China; 3.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: [Objective] The changing trend of water-holding function in a subalpine area of Western Sichuan Province was analyzed in order to provide a scientific basis for defining the dynamic characteristics of water conservation in this area. [Methods] Taking the Zagunao River basin in the upper reaches of the Minjiang River as an example, the variation characteristics of water conservation capacity of the Zagunao River basin were studied based on precipitation, temperature, water, and sediment data collected at the outlet of the Zagunao River basin and by using the principle of water balance. [Results] ① Runoff was significantly reduced over time, with an average annual decrease of 2.83 mm (i.e., water-holding capacity increased by 28.3 t/ha annually), especially around year 2000 (when the ecological protection and ecological restoration project started) to 2020 when the average annual decrease was 3.12 mm (i.e., water-holding capacity increased by 31.2 t/ha annually); ② Sand content in the runoff also showed a significant decreasing trend, indicating that runoff in the area was decreasing while soil conservation capacity was increasing; ③ There was no significant fluctuation trend in precipitation over the study period, indicating that the observed runoff

收稿日期: 2021-08-25

修回日期: 2021-10-08

资助项目: 四川省重大科技专项“川西亚高山退化生态系统水源涵养功能提升技术与示范”(2018SZDZX0031)

第一作者: 汪璇(1998—), 女(汉族), 四川省广元市人, 博士研究生, 研究方向为土壤侵蚀与水土保持。Email: wangxuan19@mails.ucas.ac.cn.

通信作者: 刘刚才(1967—), 男(汉族), 四川省安岳县人, 博士, 研究员, 主要从事土壤侵蚀与土壤肥力研究。Email: liugc@imde.ac.cn.

decrease was not caused by precipitation changes. [Conclusion] Ecological engineering, such as ecological protection and restoration, plays an obvious role in promoting water conservation.

Keywords: subalpine; water-holding capacity; change trend; ecosystem; Western Sichuan Province

生态系统服务功能与价值的研究是近年来在国内外备受重视,受到科学界的高度关注。水源涵养功能是生态系统的重要服务功能之一,水源涵养能力与植被类型和盖度、枯落物组成和现存量、土层厚度及土壤物理性质等密切相关,是植被和土壤共同作用的结果。因此,不同区域水源涵养的时空特征不同。

虽然关于水源涵养功能的研究已有数十年的历史,但是水源涵养功能作为生态与水文学交叉的研究热点,由于其特有的复杂性,目前尚未形成一个完全公认的定义^[1];早期指森林对河川径流的调节能力;目前有学者认为是某区域在一定时段内收入与支出水量之差;核心意义是指生态系统对降水的截留和储存能力。水源涵养评估方法也较多^[1-3],包括蓄水法、降雨贮存量法、水量平衡法、综合指标评价法、模型计算等方法,其中,InVEST 模型相对而言有较广泛的应用^[4-9];同时,目前也没有形成标准的方法,而且不同方法,包括同一方法采用不同的参数等,其评价结果差异较大^[10-11]。因此,生态系统水源涵养能力的评估还任重道远。

西南高山亚高山主要分布于川西、滇西北和藏东南,面积超过 100 km²,是中国第二大林区。川西亚高山是中国第二大林区的主体部分,该区域森林集中分布于长江上游的金沙江、雅砻江、岷江、大渡河等流域及其支流,是长江上游的天然生态屏障,也是中国“两屏三带”生态安全屏障中“青藏高原生态屏障”和“黄土高原—川滇生态屏障”的重要区域,生态屏障战略地位十分突出,对维护长江流域生态安全,促进长江流域经济社会可持续发展具有举足轻重的作用,直接影响着四川省的经济社会可持续发展状况,具有重要的生态和社会经济方面的意义。在 20 世纪下半叶以来,整个川西亚高山森林遭受大规模的采伐利用,加之森林火灾、森林病虫害、过度放牧等自然和人为干扰的影响,绝大多数天然林退化为次生林地、疏林灌丛地、荒草地、迹地等,生态系统的结构和功能遭受严重的破坏,其蓄水、保水等功能低。在 2000 年以来,该区不仅全面停止了森林砍伐,而且进行了生态修复和保护等生态工程,森林覆盖率由 2000 年之前的 61.8% 升至 2017 年的 65.6%^[12];近年来植被覆盖率递增 0.24%/a^[13],植被情况逐年持续好转^[14-15]。但是,川西亚高山区的水源涵养有何变化趋势,还不得而知。为此,本研究以该区岷江上游杂谷脑河流域为例,通过对杂谷脑河流域出口的降水、气温和水、沙

变化的分析,以揭示川西亚高山区水源涵养的变化趋势,为明确该区的水源涵养动态特征提供科学依据。

1 研究区概况

杂谷脑河流域位于北纬 31°12′—31°55′,东经 102°36′—103°39′,流域呈扇形,南、西、北三面为群山环抱,西北高、东南低,其西部、西北部以鹧鸪山、邛崃山与大渡河流域相邻,北部以鹧鸪山支脉与岷江支流黑水河接壤,南部以邛崃山支脉与草坡河、渔子溪为界。杂谷脑河为岷江上游右岸一级支流,发源于鹧鸪山南麓,从源头到古城,两岸山势陡峻,水流湍急,属典型的高山峡谷型河流,古城以下山势渐缓,河谷逐步开阔。杂谷脑河流域面积 4 632 km²,干流河道总长 168 km,平均坡降 18.4%。流域内最高海拔为 5 615 m,最低海拔为 1 812 m。根据 DEM(90 m 分辨率)分析表明,2 000 m 以下和 5 000 m 以上的区域面积仅占全流域的 3.2%,3 000~4 500 m 高程区间的面积最大,占据流域面积的 79.9%,3 800 m(林线)以上的区域占流域面积的 53.3%^[16]。

由于流域内地形复杂,相对高差大,气区内候具有明显的垂直地带差异性:气温有随海拔升高而降低、而降雨有随海拔升高而增大的趋势。从流域内已有的降水资料来看,米亚罗等海拔高度 2 400 m 以上区域,是本流域最湿润的地区。随着高程降低,降水量逐渐减少。河流的下游理县及其以下河谷,有明显的干旱河谷气候特征,降雨稀少,至河口汶川县城,降水量达到流域的最低值。

流域内森林资源丰富,主要植被类型有:草甸、灌丛、针叶林、阔叶林、针阔混交林、人工林等;主要物种有:蒿草、苔草、羊茅、高山栎、高山柳、岷江冷杉、云杉、桦木等等。主要土壤类型有:山地灰褐土、褐色土、棕壤、暗棕壤、灰化土、亚高山草甸土、高山草甸土和高山寒漠土。

2 材料与方法

2.1 数据来源与水源涵养量估算

流域(杂谷脑河上游)出口的水、沙数据,来源于中国长江三峡集团公司负责的杂谷脑水文站,该站位于理县县城,1958 年 8 月设立,控制集水面积 2 404 km²。水沙数据监测获取过程中,水位、流量和输沙量以及

水文站负荷的测定,均遵循中国水利电力部颁布的国家标准进行,其中,中国水文站水文测量、采样和实验室分析的程序和方法,与国际上使用的程序基本相同,数据处理过程中,遵循标准进行了严格的检查和错误分析,以确保准确性^[17]。该站气象信息(气温和降水量等)由四川省气象局提供。

区域水量平衡方程^[18]:

$$P=R+E+W-M \quad (1)$$

式中: P 为降水量; R 为径流量; E 为蒸散发量; W 为流域内储存的降水量(即水源涵养量); M 为流域内冰川消融量,由于流域内冰川很少^[19],故 M 在研究期间无显著变化可忽略不计。因此,流域的年均径流量为:

$$R=P-E-W \quad (2)$$

公式(2)表明,根据流域径流量的变化,可以推测流域内储水量 W 的变化情况;当 P 和 E 不变时,即有径流 R 增加则流域内的储水量 W 即水涵养量减少,反之则反,即有:

$$\Delta R = -\Delta W \quad (3)$$

公式(3)表示径流变化量的绝对值就是区域内储水量变化量的绝对值,即径流减少多少,区内水源涵养量就增加多少。

2.2 数据统计分析与制图

本研究所有数据的统计分析均使用 Excell 软件,制图和回归分析都采用 Windows 系统下的 Sigmaplot 12.0 软件。

相关变量如降雨、径流等分析,采用非参数检验方法,即 Mann-Kendall(M-K)秩相关检验法^[20]来检测长期变化趋势,其中, Z 值是标准正态分布,是按照时间序列顺序计算出来的统计量序列, $Z > 0$ 时表示上升趋势, $Z < 0$ 时表示下降趋势,若 $|Z| \geq 1.96$,表示通过置信度 95% 的显著性检验,即表明序列存在显著的表现趋势变化。

3 结果与分析

3.1 杂谷脑河水文站年均径流量

图 1 表明,杂谷脑河水文站的年均径流量呈显著的连续递减趋势($p=0.0055$)。20 世纪 60 年代初,该区年均径流量达约 1 000 mm,当前约为 830 mm,减少 17.3%,平均每年减少 0.29%(2.83 mm),即平均每年水源涵养量增加 28.3 t/hm²。不同时间段看,20 世纪 60 年代初至 90 年代,平均每年减少 0.26%(2.54 mm),即平均每年水源涵养量增加 25.4 t/hm²;但 20 世纪 90 年代末至 2020 年,平均每年减少约 0.32%(3.12 mm),即平均每年水源涵养量增加

31.2 t/hm²。因此,21 世纪以来,杂谷脑河上游亚高山区域径流量减少趋势更明显,即水源涵养量增加趋势较明显。

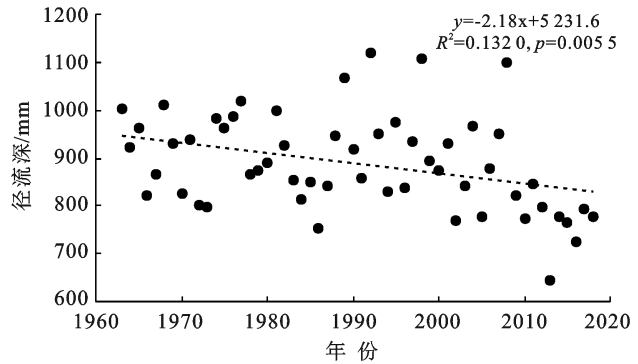


图 1 杂谷脑河水文站年均径流量的动态

从 M-K 趋势分析结果看, Z 值除了少数年份外都小于 0,即绝大多数年份,区域内的径流是呈减少趋势的;特别是从 2000 年左右起, Z 值小于 0(图 2),即表明近 20 a 开始,杂谷脑河上游亚高山区域内的年均径流量呈显著减少趋势,也就是说,2000 年后该区域的水源涵养量增加趋势显著。

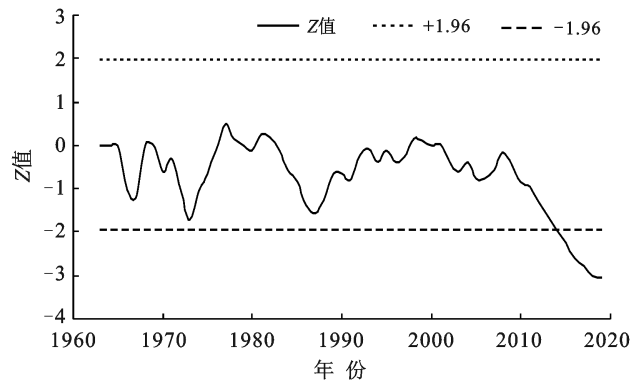


图 2 杂谷脑河水文站年均径流量的趋势分析

3.2 杂谷脑河上游出口降水与气温

从杂谷脑河上游出口即理县县城气象动态看,年均气温有显著($p < 0.001$)的递增趋势,从 1960 年的年均气温 7.2 °C,增加到 2019 年的 11.9 °C,增加了 4.7 °C;但是,年均降水量没有明显增加的趋势,而是呈上下波动式的动态,回归分析表明,也没有显著($p=0.5229$)的波动式变化趋势(图 3)。

从 M-K 趋势分析(图 4)看,杂谷脑河上游出口即理县县城的年均降水量也没有明显变化趋势, Z 值在 0 上下波动,并呈减少—增加—再减少—再增加趋势;而气温的 Z 值大致呈“V”型趋势,大致从 1995 年开始呈上升趋势,至 2010 年开始, Z 值大于 1.96,即表明近 10 a 来,气温开始显著上升。

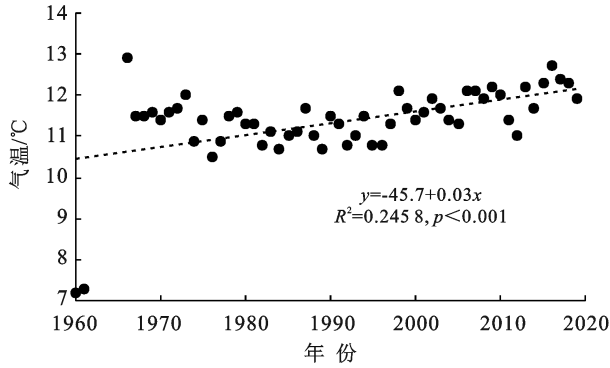


图 3 杂谷脑河上游出口理县县城的降水气温动态

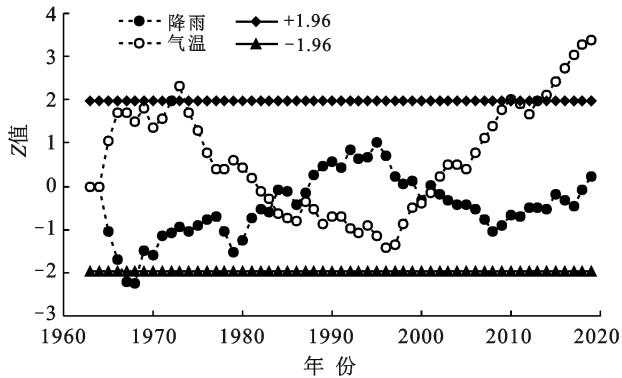
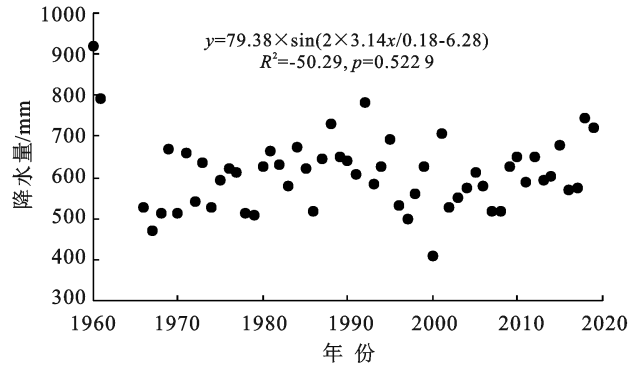


图 4 杂谷脑河上游出口理县县城的降水气温趋势分析

3.3 杂谷脑河上游出口含沙量

杂谷脑河上游亚高山区域,每 10 a 径流减少 28.3 mm,因此,这个区域的径流减少是较明显的。以岷江上游的紫坪铺水文站观测资料为基础,获得的研究结果也是径流呈较明显的减少趋势^[21-22]。我们也可以从这个区域出口的含沙量动态(图 5)及其趋势分析结果(图 6)也可以进一步表明,这个区域的径流呈减少趋势。这个区域出口的含沙量呈显著($p=0.0026$)的递减趋势,趋势分析也表明:除个别年份外,Z 值都小于 0,即含沙量一直呈减少趋势,这从侧面表明了,这个区域的径流是减少的趋势,因为:径流中含沙量与径流量呈一定正相关关系^[23-25];同时,这也表明:这个区域保持土壤的能力在增加而土壤流失在减少,从而提高生态系统土壤部分的水源涵养能力。

4 讨论与结论

4.1 讨论

杂谷脑河上游出口处的气象资料表明,降水没有明显变化趋势,即变化可以忽略不计,与我们事先的假设一致。多数研究认为:降水量增或减的变化因区域不同而不同^[26-27];气候变化在高海拔地区较明显^[28]。在过去的几十年中,整个青藏高原区域的气候变化呈暖湿化趋势,气温平均以 0.19~0.25 °C/10 a 的

速度增长,年降水量则以 23.5~28.6 mm/10 a 的速度增加^[29],西藏大部分地区的年降水量变化为正趋势,降水倾向率为 1.4~66.6 mm/10 a^[30-31]。三江源各源区的年均降雨量和气温呈上升趋势^[32-33]。在川西的贡嘎山东坡 > 3 600 m 的区域降水有增加趋势^[34];本研究表明,研究区域降水呈不显著的波动式变化,无明显增减趋势。因此,根据这些研究结果,可以推测区内的径流减少不是降水减少引起的。

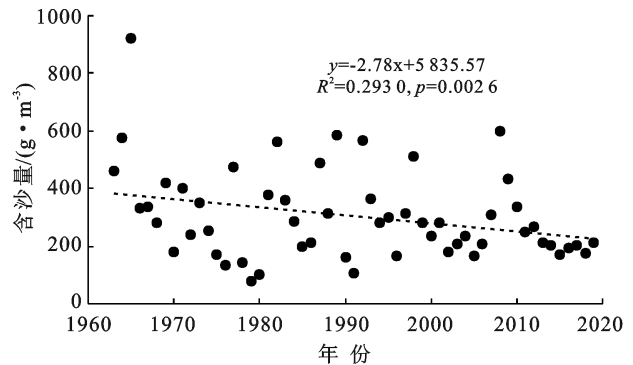


图 5 杂谷脑河上游出口含沙量的动态

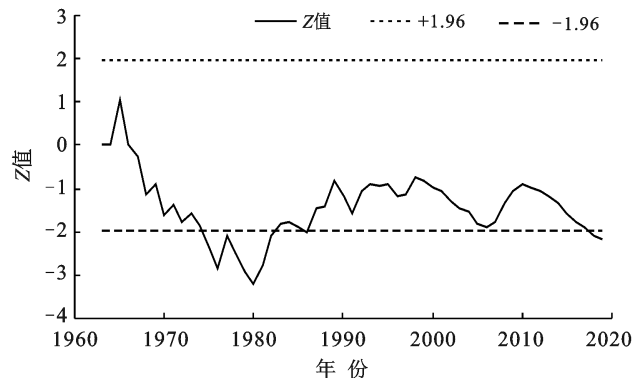


图 6 杂谷脑河上游出口含沙量的趋势分析

当然,从另一个方面看,岷江流域在近 60 a 来气温呈显著的上升趋势,特别是上游地区更明显^[35];本研究流域出口站的气温也是呈增加趋势,特别是近 10 a 来,气温有显著增加趋势。气温升高可能会增大区域内的蒸散发而使得径流减少。但是,有研究认

为:川西高原 2000 年以来,实际蒸散发量呈没有显著的波动式变化趋势^[36],因为,蒸散发除了气温外,还有风速、植被等诸多其他影响因素。因此,该区径流减少主要是由于区内水源涵养能力增加导致的,也不是蒸散发的增加而引起的。

2000 年以来,该区域实施了严禁森林砍伐和生态修复等工程,该区域的水源涵养量增加趋势显著,表明实施生态工程,包括生态修复和生态保护,对水源涵养有较明显的正作用^[37-39]。从该区的植被覆盖情况看,2000 年之前有逐年变差趋势^[40-41],而 2000 年之后,植被覆盖度整体上呈缓慢上升的趋势^[14-15,42]。因此,该区 2000 年以来的水源涵养量增加较明显。

4.2 结论

杂谷脑河上游亚高山区域的水源涵养能力呈较明显的增加趋势,特别是 2000 年以来,该区域实施了生态保护和生态修复等工程,该区域的水源涵养能力增加显著,平均每年水源涵养量增加 31.2 t/hm²。因此,实施生态工程对区域的水源涵养能力提升有明显的促进作用。紫坪铺水文站的径流也有较明显的减少趋势。

[参 考 文 献]

- [1] 王云飞,叶爱中,乔飞,等.水源涵养内涵及估算方法综述[J/OL].南水北调与水利科技(中英文);1-19[2021-09-15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20210728.1026.002.html>.
- [2] 侯晓臣,孙伟,李建贵,等.森林生态系统水源涵养能力计量方法研究进展与展望[J].干旱区资源与环境,2018,32(1):121-127.
- [3] 周佳雯,高吉喜,高志球,等.森林生态系统水源涵养服务功能解析[J].生态学报,2018,38(5):1679-1686.
- [4] 余新晓,周彬,吕锡芝,等.基于 InVEST 模型的北京山区森林水源涵养功能评估[J].林业科学,2012,48(10):1-5.
- [5] 陈骏宇,刘钢,白杨.基于 InVEST 模型的太湖流域水源涵养服务价值评估[J].水利经济,2016,34(2):25-29,84.
- [6] 杨英,王立新,任卫华,等.基于 InVEST 模型的河南淅川县森林资源水源涵养功能评估[J].林业资源管理,2017(3):51-55.
- [7] 王耕,韩冬雪.基于 InVEST 模型的大凌河上游汇水区水源涵养功能评估[J].水土保持通报,2018,38(3):206-211.
- [8] 王玉纯,赵军,付杰文,等.石羊河流域水源涵养功能定量评估及空间差异[J].生态学报,2018,38(13):4637-4648.
- [9] 刘业轩,石晓丽,史文娇.福建省森林生态系统水源涵养服务评估:InVEST 模型与 meta 分析对比[J].生态学报,2021,41(4):1349-1361.
- [10] 杨金明.基于分布式水文模型的森林水源涵养功能评价[D].黑龙江 哈尔滨:东北林业大学,2014.
- [11] 沈钰仟,肖隼,欧阳志云,等.基于生态系统质量的水源涵养服务评估:以西南五省为例[J].山地学报,2020,38(6):816-828.
- [12] 赖家明,杨武年.基于 RS 的川西天然林区近 29 年植被覆盖动态变化[J].国土资源遥感,2018,30(4):132-138.
- [13] 郑勇,杨武年,刘冲,等.川西高原近 20 a 植被覆盖变化遥感动态监测及驱动力分析[J].遥感技术与应用,2020,35(6):1447-1456.
- [14] 谢慧君,张廷斌,易桂花,等.川西高原植被 NDVI 动态变化特征及对气候因子的响应[J].水土保持通报,2020,40(4):286-294,328.
- [15] 伍良旭,王晗,邵怀勇,等.川西高原植被时空格局及其对气候变化的响应[J].水土保持研究,2021,28(1):171-178.
- [16] 崔雪晴.岷江上游杂谷脑流域生态水文过程对土地覆盖和气候变化的响应[D].北京:中国林业科学研究院,2013.
- [17] Xu Jiongxin, Yan Yunxia. Effect of reservoir construction on suspended sediment load in a large river system: Thresholds and complex response [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2010,35(14):1666-1673.
- [18] 芮孝芳.水文学原理[M].北京:中国水利水电出版社,2004:13-14.
- [19] 任炳辉.我国冰川资源[J].自然资源,1978(1):46-57.
- [20] 陆传豪,董先勇,唐家良,等.金沙江流域大型梯级水库对水沙变化的影响[J].中国水土保持科学,2019,17(5):36-43.
- [21] 邵骏,袁鹏,李秀峰.岷江上游年径流变化的多时间尺度分析[J].东北水利水电,2007(6):52-54.
- [22] 梁淑琪,王文圣,黄伟军.1937—2018 年岷江上游径流演变特征分析[J].西北大学学报(自然科学版),2020,50(5):761-770.
- [23] 刘彦,张建军,张岩,等.三江源区近数十年河流输沙及水沙关系变化[J].中国水土保持科学,2016,14(6):61-69.
- [24] 张宏亮,盛文博,陈学林.黑河中游高崖水文站水沙关系及时空分布特征[J].甘肃水利水电技术,2018,54(3):8-10,13.
- [25] 王婧,那巍.黄河河龙区间洪水泥沙关系分析[J].灌溉排水学报,2019,38(S1):107-110.
- [26] Montagne D, Cornu S. Do we need to include soil evolution module in models for prediction of future climate change? [J]. Climatic Change, 2010,98:75-86.
- [27] Nunes J P, Seixas J, Keizer J J, et al. Sensitivity of runoff and soil erosion to climate change in two Mediterranean watersheds (Part I): Model parameterization and evaluation [J]. Hydrological Processes, 2009,23:1202-1211.
- [28] Solomon S, Qin D H, Manning M. Climate change 2007, the physical science basis [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007:34.

- [J].国际城市规划,2015,30(2):48-54.
- [3] Resilience Alliance. Urban Resilience Research Prospectus [M]. Canberra, Australia: CSIRO, 2007.
- [4] 张明斗,冯晓青.长三角城市群内各城市的城市韧性与经济发展水平的协调性对比研究[J].城市发展研究,2019,26(1):82-91.
- [5] 马德彬,沈正平.城市韧性与经济发展水平耦合协调研究:以京津冀城市群为例[J].资源开发与市场,2021,37(7):820-827.
- [6] 周倩,刘德林.长三角城市群城市韧性与城镇化水平耦合协调发展研究[J].水土保持研究,2020,27(4):286-292.
- [7] 张明斗,冯晓青.中国城市韧性度综合评价[J].城市问题,2018(10):27-36.
- [8] 刘玲,赵松岭,杨欣玥,等.京津冀城市韧性时空分异格局及影响因素研究[J].石家庄学院学报,2020,22(6):53-60.
- [9] 张鹏,于伟,张延伟.山东省城市韧性的时空分异及其影响因素[J].城市问题,2018(9):27-34.
- [10] 修春亮,魏冶,王琦.基于“规模—密度—形态”的大连市城市韧性评估[J].地理学报,2018,73(12):2315-2328.
- [11] 盖伦·纽曼,黎东莹,朱芮,等.城市再造与韧性提升:以绿色基础设施为导向的闲置土地再利用的经济绩效评估[J].景观设计学,2018,6(6):10-23.
- [12] 王娇,臧鑫宇.韧性理念下的山地城市公共空间生态设计策略[J].风景园林,2017(4):50-56.
- [13] 张荣天,焦华富.长江经济带城市土地利用效率格局演变及驱动机制研究[J].长江流域资源与环境,2015,24(3):387-394.
- [14] 赵丹丹,胡业翠.城市土地利用效率与城市化耦合协调性研究:以我国 285 个地级及以上城市为例[J].水土保持研究,2017,24(1):291-304.
- [15] Ma Li, Long Hualou, Tu Shuangshuang, et al. Farmland transition in China and its policy implications [J]. Land Use Policy, 2020,92:104470.
- [16] 程皓,阳国亮,纪晓君.中国十大城市群城市韧性与环境压力脱钩关系研究[J].统计与决策,2019,35(7):79-83.
- [17] 周利敏.韧性城市:风险治理及指标建构:兼论国际案例[J].北京行政学院学报,2016(2):13-20.
- [18] 唐辉,陈松林.安徽省城市紧凑度与土地利用效率耦合分析[J].亚热带资源与环境学报,2019,14(4):71-80.
- [19] 韩球,何佟佟,杨勇.城市群高质量发展与土地利用效率耦合协调度评价[J].河南师范大学学报,2021,48(1):95-101.
- [20] 邱莹莹,孙峻,周戎星,等.基于 DEA 模型的城市土地利用效率空间差异分析[J].武汉理工大学学报(信息与管理工程版),2017,39(5):593-597.
- [21] Andersen P, Petersen N C. A procedure for ranking efficient units in data envelopment analysis [J]. Management Science, 1993(10):1261-1264.
- [22] Li Yangfan, Li Yi, Zhou Yan, et al. Investigation of a coupling model of coordination between urbanization and the environment [J]. Journal of Environmental Management, 2012,98:127-133.
- [23] 尹鹏,刘继生,陈才.东北振兴以来吉林省四化发展的协调性研究[J].地理科学,2015,35(9):1101-1108.
- [24] 廖重斌.环境与经济协调发展的定量评判及其分类体系:以珠江三角洲城市群为例[J].热带地理,1999,19(2):171-177.
- [25] 唐皇凤,王锐.韧性城市建设:我国城市公共安全治理现代化的优选之路[J].内蒙古社会科学(汉文版),2019,40(1):46-54.
- [26] 陈利,朱喜钢,孙洁.韧性城市的基本理念、作用机制及规划愿景[J].现代城市研究,2017,32(9):18-24.
- [27] 杨俊,黄贤金,王占岐,等.新时代中国城市土地集约利用若干问题的再认识[J].中国土地科学,2020,34(11):31-37.

(上接第 307 页)

- [29] 刘晓东,张敏锋,惠晓英.青藏高原当代气候变化特征及其对温室效应的响应[J].地理科学,1998,18(2):113-121.
- [30] 杜军,王玉才.青藏高原降水变化趋势的气候分析[J].地理学报,2004,59(3):375-382.
- [31] 尚华明,洪建昌,张瑞波,等.树轮记录的西藏东北部过去 552 a 上年 10 月至当年 5 月降水量变化[J].山地学报,2018,36(6):821-832.
- [32] 张岩,张建军,张艳得,等.三江源区径流长期变化趋势对降水响应的空间差异[J].环境科学研究,2017,30(1):40-50.
- [33] 强安丰,魏加华,解宏伟.青海三江源地区气温与降水变化趋势分析[J].水电能源科学,2018,36(2):10-14.
- [34] 程根伟.贡嘎山极高山区的降水分布特征探讨[J].山地研究,1996(3):177-182.
- [35] 甄英,何静.近 60 年岷江流域气温变化趋势与突变性分析[J].安徽农业科学,2018,46(4):151-155.
- [36] 柳锦宝.基于改进线性双源遥感蒸散模型的四川省干旱监测研究[D].四川 成都:成都理工大学,2018.
- [37] 张文广,胡远满,张晶,等.岷江上游地区近 30 年森林生态系统水源涵养量与价值变化[J].生态学杂志,2007,26(7):1063-1067.
- [38] 吴丹,邵全琴,刘纪远,等.三江源地区林草生态系统水源涵养服务评估[J].水土保持通报,2016,36(3):206-210.
- [39] 曹明,李俊生,王伟,等.基于 InVEST 与倾向评分匹配模型评估秦岭国家级自然保护区水源涵养服务保护成效[J].生物多样性,2021,29(5):617-628.
- [40] 刘铁冬.杂谷脑河流域近 30 年景观格局时空演变研究[J].水土保持研究,2014,21(3):98-102,108.
- [41] 陈财,杨斌,李丹,等.岷江上游流域植被覆盖度时空变化分析[J].西南科技大学学报,2019,34(1):13-19.
- [42] 祝聪,彭文甫,张丽芳,等.2006—2016 年岷江上游植被覆盖度时空变化及驱动力[J].生态学报,2019,39(5):1583-1594.