

黄河源区水源涵养有关问题探讨

田世民, 韩冰, 梁帅, 王弯弯, 曹永涛

Discussion on water conservation capacity in the source area of the Yellow River

TIAN Shimin, HAN Bing, LIANG Shuai, WANG Wanwan, CAO Yongtao

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12170/20211019002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

黄河流域砒砂岩区地貌-植被-侵蚀耦合研究进展

Research progress of spatial distribution about geomorphology-vegetation-water erosion in Pisha stone area of Yellow River

水利水运工程学报. 2020(4): 64 <https://doi.org/10.12170/20191229002>

基于MODFLOW模型滹沱河傍河地下水源地保护区划分

Division of protection area of groundwater source area near Hutuo River based on MODFLOW mode

水利水运工程学报. 2021(3): 59 <https://doi.org/10.12170/20200611001>

黄河下游生态型引黄灌区水资源承载力研究

Study on water resources carrying capacity of ecological diversion irrigation district in the lower reaches of the Yellow River

水利水运工程学报. 2020(2): 22 <https://doi.org/10.12170/20200209001>

黄河下游复航的生态建设方案探讨

Discussion on ecological construction scheme for navigation recovery in the lower Yellow River

水利水运工程学报. 2021(1): 45 <https://doi.org/10.12170/20200117001>

新水沙条件与整治工程下和畅洲汊道演变分析

Riverbed evolution characteristics in the Hechangzhou braided reach under new flow-sediment conditions and waterway regulations

水利水运工程学报. 2021(5): 19 <https://doi.org/10.12170/20210208004>

长江口水源地取水口盐度对径潮动力的响应

Response of salinity at water source intakes to runoff and tidal dynamics of Yangtze River estuary

水利水运工程学报. 2018(5): 14 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2018.05.003>

DOI:10.12170/20211019002

田世民, 韩冰, 梁帅, 等. 黄河源区水源涵养有关问题探讨 [J]. 水利水运工程学报, 2022(1): 19-27. (TIAN Shimin, HAN Bing, LIANG Shuai, et al. Discussion on water conservation capacity in the source area of the Yellow River[J]. Hydro-Science and Engineering, 2022(1): 19-27. (in Chinese))

黄河源区水源涵养有关问题探讨

田世民^{1,2,3}, 韩冰^{1,2,3}, 梁帅^{1,2,3}, 王弯弯^{1,2,3}, 曹永涛^{1,2,3}

(1. 黄河水利科学研究院, 河南 郑州 450003; 2. 河南省黄河水生态环境工程技术研究中心, 河南 郑州 450003; 3. 河南省黄河流域生态环境保护与修复重点实验室, 河南 郑州 450003)

摘要: 黄河源区是黄河流域重要产水区和水源涵养区, 在气候变化和人类活动双重胁迫下, 黄河源区各类型生态系统发生了显著变化, 影响了源区水源涵养功能。在总结前人研究的基础上, 阐述了水源涵养的概念和内涵, 系统梳理了黄河源区水源涵养主体的变化过程, 论述了水源涵养功能对水源涵养主体变化的响应特征, 分析了黄河源区未来水源涵养能力演变所面临的形势, 并基于此提出了黄河源区水源涵养能力提升的对策与建议。可为黄河源区水源涵养相关研究的进一步开展及其水源涵养能力提升提供支撑。

关键词: 黄河源区; 水源涵养; 演变特征; 提升对策

中图分类号: P333

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2022)01-0019-09

青藏高原是我国重要的生态安全屏障和水资源安全战略基地, 在世界水塔指数排名中, 青藏高原位于世界第7和亚洲第1^[1], 水源涵养是青藏高原重要生态功能之一。黄河源区位于青藏高原东北部, 以唐乃亥水文断面为出口, 多年(1950—2020年)平均径流量204.0亿m³, 占黄河流域年径流量的三分之一, 是黄河流域重要产水区和水源涵养区。黄河流域是一个动态的复杂开放巨系统^[2], 系统内部上中下游紧密联系并存在互馈关系, 源区水源涵养对全流域水资源安全和社会经济发展具有举足轻重的作用。2019年习总书记提出了黄河流域生态保护和高质量发展重大国家战略, 特别强调了黄河源区水源涵养能力提升的问题。2020年国家“十四五”规划及2021年中共中央、国务院印发的《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》, 均提出要加强上游水源涵养能力建设, 强化水源涵养功能。然而, 当前针对水源涵养概念还存在一定的分歧, 黄河源区水源涵养状况及亟待开展的下一步工作缺乏系统梳理。基于此, 本文从水源涵养概念、黄河源区水源涵养状况、问题及下一步工作重点等方面, 对黄河源区水源涵养有关问题进行探讨, 为黄河源区水源涵养研究提供参考和借鉴。

1 水源涵养概念解析

“水源涵养”最早于20世纪60年代以“森林水源涵养”的概念由苏联传入我国。国外研究中, 水源涵养一般泛指水资源保护, 我国水源涵养研究主要强调生态系统的水文调节作用, 属生态系统服务范畴^[3]。早期研究将水源涵养定义为森林对河流径流量的影响^[4], 后来拓展为森林生态系统拦蓄降水, 从而有效涵蓄

收稿日期: 2021-10-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51979120, 51979012); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(HKY-JBYW-2020-33, HKY-JBYW-2019-19)

作者简介: 田世民(1981—), 男, 河南偃师人, 正高级工程师, 博士, 主要从事河流水生生态综合管理等研究。

E-mail: tsm1981@163.com 通信作者: 曹永涛(E-mail: 490200811@qq.com)

土壤水分和调节河川流量的功能^[5],森林对降水、蒸散发、径流及水质的影响也被纳入其中^[6]。如今,水源涵养的内涵进一步扩展,指生态系统通过对降水的截留、吸收和贮存,改变流域产流特征、水文循环路径和水分存储形式,调节流域地表水、土壤水和地下水之间存储和交换关系,从而既能保障和维持流域生态系统健康,又能最大限度为流域外部提供生态产品和服务的功能^[7]。

水源涵养包含大气、水分、植被和土壤等自然过程^[8],其变化直接影响区域气候水文、植被和土壤状况,是区域生态系统状况的重要指示器。当前研究对水源涵养能力和水源涵养量的理解存在一定的分歧,有研究者用单位时间单位面积的水源涵养量来表征水源涵养能力^[9]。从概念上讲,水源涵养能力和水源涵养量都是水源涵养功能的具体体现。水源涵养能力是指某一区域或某一类型生态系统在水源涵养方面表现出来的能力,和温度、辐射、风速、蒸散发等气候条件及下垫面、土壤、地形等区域基底特征密切相关。而水源涵养量则和时空尺度有关,在提到水源涵养量时一定是指某一区域在某一时间尺度内的水源涵养总量^[7]。水源涵养能力高的区域水源涵养量不一定也高,但在相同的降水条件下即外部输入一致时,相同时间尺度内水源涵养能力高的区域,其水源涵养量也就越高。

气候变化和人类活动是影响黄河源区水源涵养能力的主要因素,而人类活动影响水源涵养能力的本质是改变了区域下垫面条件。因此,对黄河源区或其他区域来说,提升水源涵养能力,需要从气候条件和基底特征两个方面进行改善,但气候条件及土壤、地形等基底特征是无法通过人工进行调控的,只能通过改善下垫面来对水源涵养能力进行调节。

2 黄河源区水源涵养状况

在全球气候变化影响下,黄河上游地区年均气温在近 50 年呈现持续攀升的趋势,尤其是黄河源区,上升趋势约为 $0.053\text{ }^{\circ}\text{C/a}$ ^[10],降水量整体呈增加趋势,并表现出冬季显著增多、秋季略有减少的特征,蒸散发强度除西南部外其他地区也呈上升趋势(0.27 mm/a)^[11-12]。20 世纪 80—90 年代,黄河源区生态环境受到一定破坏,2000 年后,随着三江源国家公园的建立,三江源地区得到了较好的保护和恢复,生态退化情势减缓,生态环境质量得以提升。根据《三江源国家公园公报(2019)》,2019 年三江源地区草地覆盖率、产草量分别比 10 年前提高了 11%、30% 以上,水源涵养量年均增幅 6% 以上^[13-14]。

2.1 黄河源区水源涵养主体

冻土、草地、湿地、冰川等是黄河源区水源涵养的主体。黄河源区分布着大片连续、不连续和岛状多年冻土、季节冻土,是高寒地区重要的固态水源^[15]。草地约占黄河源区面积的 71.02%^[16],通过植被与土壤间的相互作用蓄存水分并发挥水源涵养功能^[17]。湿地占黄河源区面积的 8.4%^[18],源区若尔盖湿地被誉为黄河上游的蓄水池^[19]。源区冰川面积较小且集中分布于阿尼玛卿山区域,发育现代冰川 50 余条,面积超过 10 km^2 的大冰川有 3 条^[20]。

2.2 水源涵养主体演变特征

2.2.1 冻土消融 黄河源区多年冻土、高寒生态、水文过程等相互作用十分强烈^[21],黄河源区多年冻土主要发育在海拔 4 000 m 以上的区域,黄河沿以上的源头区,多年冻土面积占 85% 以上^[22]。季节性冻土主要分布在鄂陵湖以下区域,约占整个源区面积的 9.7%。源区冻土变化趋势可分为两个阶段,1972—1992 年部分季节性冻土转变为多年冻土,多年冻土面积增加 323 km^2 ^[23];20 世纪 80 年代以来源区冻土发生区域性退化,主要表现为冻土深度减小、永久冻土层向季节性冻土转变、冻土层分布逐渐破碎化等^[24-25],多年冻土面积从 2.4 万 km^2 减少到 2.2 万 km^2 ^[26]。气候是黄河源区多年冻土空间分布的主控因子,冻土温度升高、活动层加深、季节冻深变浅,造成融区扩展乃至贯通^[27-28],改变了局部地区水文循环。

2.2.2 草地退化 自 20 世纪 60 年代以来,黄河源区草地整体退化,过度放牧导致草地承载力下降,再加上鼠类大量繁殖,加速了草地的退化^[29]。研究表明,与 20 世纪 80 年代相比,近年来黄河源区高覆盖高寒草地

分别有 8% 和 15% 演变为中覆盖和低覆盖草地,中覆盖高寒草地有 29% 演变为低覆盖草地,部分天然草地演变为人工草地^[30-31]。本研究利用 1980—2018 年 30 m Landsat 遥感数据分析黄河源区土地利用类型变化,发现 2000 年之前,黄河源区中、高覆盖草地面积持续减少,2000 年后由于三江源、甘南等区域生态保护与修复工程的实施,草地面积有所恢复。

2.2.3 湿地萎缩 黄河源区湿地主要包括湖泊湿地、河流湿地和沼泽湿地,其中沼泽湿地和湖泊湿地分别占湿地总面积的 65.8% 和 33.6%^[32]。20 世纪 70 年代以来,源区湿地呈萎缩状态,其中以沼泽湿地面积减少最为显著^[33],与 70 年代相比,2015 年源区沼泽草甸、泥炭湿地、湖泊等面积分别减少了 619.3、213.5 和 5.49 km²^[34]。若尔盖泥炭湿地面积约占整个若尔盖流域的 13%,储水量约 45 亿 m³,1981—2011 年平均向黄河补水(67.1±14.9)亿 m³/a^[35]。随着放牧需求增加,人们在若尔盖流域进行了大规模的挖沟排水活动,导致湿地地下水位下降,大片湿地消失^[36],水源涵养指数持续减小^[37]。在三江源生态保护修复背景下,黄河源区湿地逐步得到有效保护。根据《青海省 2018 年生态气象监测公报》,2018 年黄河源头扎陵湖、鄂陵湖湖泊面积较 2004 年分别增加 74.6 km² 和 117.4 km²,源区湿地面积增加 104 km²,“千湖之县”玛多县湖泊数量由原来的 4 077 个增加到 5 849 个,重现千湖美景。

2.2.4 冰川退缩 黄河源区冰川覆盖面积约为 126.7 km²,集中分布于阿尼玛卿山区域。哈龙冰川、唯格勒当雄冰川、耶和龙冰川是 3 条面积较大的冰川,约占冰川面积的 41%^[38]。自 1960 年以来,阿尼玛卿山冰川整体处于亏损状态,主体冰川面积退缩幅度为 8%~13%,其中最大的冰川长度退缩了 900 m^[39]。与 20 世纪 80 年代相比,黄河源区永久性冰川雪地面积极减少 52%^[40],冰储量从 113 亿 m³ 减少至 85 亿 m³,减少了 24.8%^[24, 26],期间有个别冰川存在前进现象,但无法扭转整体退缩趋势^[41-42]。冰川持续消融退缩,严重降低了冰川融水对径流的调节作用,对黄河流域水资源配置及生态系统产生不利影响^[38, 42]。

2.3 水源涵养功能对水源涵养主体变化的响应

2.3.1 水源涵养功能对冻土变化的响应 黄河源区多年冻土对地下水的补径排关系起主要控制作用,当前黄河源区季节冻土与多年冻土界限正在发生变化,对源区径流年内分配具有较大影响。研究表明,在多年冻土覆盖率大于 40% 的区域,冻土退化导致流域退水过程减缓,冬季径流增大^[43],春季气温回升时冻土活动层消融引起土壤孔隙增大,导致径流系数显著降低^[44]。黄河源区冻土活动层和融化夹层厚度的变化与径流关系密切,活动层和融化层厚度每增加 1 m,冬季径流分别增加约 150 m³/s 和 400 m³/s^[45]。冻土土壤颗粒间充填分凝冰、胶结冰等地下冰体,渗透性极低,具有较强的隔水和贮水作用。随着多年冻土退化,渗透系数增强,冻土隔水效应弱化甚至破坏,一方面降水更多入渗从而减少地表径流,另一方面层上水和层下水之间形成更多水力通道并改变基流,从而影响水源涵养功能^[43]。

2.3.2 水源涵养功能对草地变化的响应 草地通过植被、水、土壤间的相互作用起到截留降水、调节坡面径流、净化水质等作用,从而体现水源涵养功能^[9]。水分在土壤、植被、大气连续体系统间发生运移,影响草地生态系统中储水量和水量平衡,草地在恢复重建过程中,土壤的理化性质得到了改善,水源涵养能力有所提高^[46]。近年来,在西北地区气候暖湿化及黄河源区生态保护工程叠加效应下,黄河源区植被状况有所改善。自 1982 年以来,黄河源区年平均植被归一化指数与气温存在显著的正相关性^[14],高寒地区气温上升可延长植被生长季并增加其光合作用,从而促进植被生长^[47],提升水源涵养能力。

2.3.3 水源涵养功能对湿地变化的响应 湿地水源涵养功能涉及土壤内多个水文过程及其水文效应^[48],湿地在涵养水源、调节径流及生物多样性维持等方面具有十分重要的作用^[49]。储存水量是湿地水源涵养能力的关键表征指标。湿地储水量不仅受泥炭层厚度影响,还受泥炭层物理特性以及地下水位的直接影响。水力侵蚀对泥炭湿地的土壤结构、孔隙流以及地下水位等均有一定的影响,并直接影响湿地储水量和水源涵养能力^[50]。作为源区最大的湿地,若尔盖泥炭湿地内分布着纵横交织的近 1 400 条人工沟渠,沟道侵蚀和溯源侵蚀对湿地内水系演化和湿地演变具有直接影响,是若尔盖湿地退化和萎缩的主要驱动力^[51]。受水力侵蚀影响,若尔盖湿地土壤有机质含量及泥炭层厚度不断下降,部分区域土壤沙化,导致若尔盖湿地水源涵

养能力下降^[52], 每年补给黄河的水量约减少 0.48 亿 m^3 ^[53]。

2.3.4 水源涵养功能对冰川变化的响应 黄河源区冰川融水对径流的补给量约 3.9 亿 m^3/a , 占源区径流的 1.9%^[46]。黄河源区冰储量约为 8.34 km^3 , 对应水资源量为 $7.09 \times 10^{12} \text{ kg}$ ^[54]。冰川为黄河源区提供了巨大的生态缓冲容量, 干旱年份冰川融水在一定程度上补给河川径流, 湿润年份这种补给作用又使得河川径流量的变化趋于平缓, 这对源区水源涵养具有重要作用。研究表明, 阿尼玛卿山所在区域气温升高幅度较大, 气温升高影响大于降水影响, 未来一定时期温度上升引起的冰川消融将持续存在^[55]。冰川消退后, 补给河流的淡水量也会随之减少, 源区水文过程受到影响, 水源涵养能力降低。

2.3.5 水源涵养功能对水源涵养主体变化的综合响应 总体而言, 自 20 世纪 60 年代以来, 黄河源区水源涵养主体的变化导致源区水源涵养能力下降^[56]。研究表明, 近 30 年来, 黄河源区水源涵养量以 1.15 mm/a 的速率减少, 尤其是 2002 年之前, 减少速率达 4.12 mm/a ^[12]。2000 年以来, 国家实施了一系列重大生态保护和建设工程, 有效遏制了黄河源区生态退化的趋势, 源区生态状况呈现稳定提升, 进入了整体好转与局部退化并存的阶段。但受气候条件及人类活动的影响, 黄河源区局部地区生态退化状况仍未得到根本改观, 冰川、冻土、草地等水源涵养主体分布格局尚不稳定, 现状水源涵养能力仍然偏低^[42]。

3 水源涵养能力演变面临的形势

3.1 气候变化影响长期存在

气候变化是一个缓慢而长期的过程, 近几十年来黄河源区及整个青藏高原地区的温度均呈上升态势, 未来一定时期该区域的温度仍将呈现升高的趋势。预计到 2040 年, 黄河源区温度与气候基准年 (1961—1990 年) 相比将显著升高, 最低气温升高 2.48 $^{\circ}\text{C}$, 最高气温升高 2.67 $^{\circ}\text{C}$ ^[57]。预计到 2050 年, 在 RCP4.5 和 RCP8.0 情景下黄河源区降水量与基准年 (1971—2010) 相比呈现减少趋势, 减少幅度分别为 0.53 mm/a 和 0.89 mm/a ^[58]。因此, 气候变化的影响将长期存在, 并将持续对水源涵养功能产生不利影响。

3.2 人类活动强度趋于平稳

随着生态文明理念不断深入人心, 政府正在采取一系列措施来调整人的行为、纠正人的错误行为, 减少人类活动对生态环境的不利影响。同时, 三江源国家公园建设过程中采取的退牧还草、生态移民等重大工程和非工程措施, 将进一步减缓人类活动对黄河源区的不利影响。在黄河流域国家战略的大背景下, 黄河源区社会经济发展模式将进一步优化。长期来看, 未来人类活动强度将趋于平稳, 不会再以牺牲生态环境为代价来发展经济, 人类活动对黄河源区的干扰将向有利方向发展。

3.3 冰川冻土将持续退化

全球气候变暖无法逆转, 冰川冻土仍将持续退化。最新研究结果表明, 青藏高原及周边冰川变化的前景不容乐观, 预计冰川面积减少至当前一半所需的时间将提前约 10 年^[59]。预测认为, 未来全球温度升高 1.5 $^{\circ}\text{C}$ 情景下, 青藏高原地区将升温约 2.1 $^{\circ}\text{C}$ 。中国气候变化蓝皮书 (2021) 表明, 这种异常升温趋势将加速青藏高原及周边地区冰川冻土的消融, 预计在 RCP4.5、RCP6.0 和 RCP8.5 情景下, 青藏高原及周边地区冰川将减少 49%、51% 和 64%, 冻土减少 27.7%、21.1% 和 35.5%。冰川和冻土的消融、消退将对黄河源区水源涵养功能产生较大的负面效应。

3.4 草地湿地面积逐步恢复

草地和湿地生态系统的退化, 既有气候变化的影响, 也有人类活动的影响, 其中人类活动影响为主要因素。随着人类活动不利影响的减缓及人工修复等正面影响的不断增强, 源区退化草地将得到进一步治理和恢复, 湿地萎缩趋势得到遏制、面积将有所恢复。据统计, 截止到 2018 年, 黄河源区草地面积与 2000 年相比增加了 11.4%, 森林面积增加了 2.6%^[42]。未来黄河源区草地和湿地面积将逐步恢复, 生态环境质量将进一步好转, 重点区域水源涵养能力将得到稳定提高。

4 黄河源区水源涵养能力提升对策建议

(1)完善黄河源区水文监测体系。受气候和地形条件影响,黄河源区水文测量难度较大。目前黄河源区水文站密度约为 $1.1\text{ 万 km}^2/\text{站}$,站点密度远低于黄河流域水文站网的平均密度($2\ 330\text{ km}^2/\text{站}$),也低于全国水文站网的平均密度($3\ 000\text{ km}^2/\text{站}$)。需在现有水文测站的基础上,选择较大和重要支流建立水文测站,完善水文监测体系,提升水文站点密度,以更准确掌握黄河源区径流来源的空间分布及变化特征。整合黄河源区气象、水文、生态等监测数据,形成统一、数据共享的监测网,为黄河源区水源涵养演变模拟与诊断研究提供基础数据。

(2)实施精准化生态环境治理。习总书记在“9·18”讲话中提到,上游水源涵养能力稳定提升,同时黄河上游局部地区生态系统退化、水源涵养功能降低。因此,下一步需要摸清生态系统退化的局部地区,在退化草地和湿地实施精准化生态修复。基于水文响应特性将黄河源区划分为不同的水源涵养单元,识别各水源涵养单元水源涵养功能演变的主要驱动因子,基于水源涵养特征的空间差异,确立自然修复与人工修复相结合的黄河源区空间管控策略。采取具有针对性的修复措施,因地制宜,促进生态平衡,提升水源涵养能力。

(3)建立黄河流域生态补偿机制。尽快建立黄河流域生态补偿机制,逐步实现流域内省区之间尤其是青海省与其他各省区间的生态补偿,进一步加大生态环境保护力度。同时,建立黄河源区不同区域和主体之间的生态补偿,协调好生态环境保护和社会经济高质量发展之间的关系。通过生态补偿机制建设,建立黄河源区生态保护与社会经济发展相协调的长效机制,为源区水源涵养能力稳定提升提供长效保障。

(4)加强水源涵养相关科学研究。黄河源区水源涵养变化受水文、气象、人类活动等多要素影响,涉及到生态系统内部及不同类型生态之间等多个过程,同时体现在不同的时间和空间尺度上。因此,亟需开展黄河源区水源涵养变化机理研究,揭示多要素、多过程、多尺度下黄河源区水源涵养变化驱动机制,构建源区水源涵养演变计算模型,定量评估黄河源区水源涵养能力及历史与未来演变特征,为水源涵养能力提升提供理论支撑。

5 结 语

(1)水源涵养能力和水源涵养量都是水源涵养功能的具体体现,水源涵养能力和区域气候条件及基底特征密切相关,水源涵养量则需结合一定的时空尺度进行研究。

(2)黄河源区是黄河流域重要水源涵养区,冻土、草地、湿地、冰川等是黄河源区水源涵养的主体。受气候变化和人类活动影响,黄河源区水源涵养主体发生显著变化,黄河源区水源涵养能力总体降低。2000年以来,黄河源区生态环境有所恢复,但未得到根本改观,现状水源涵养能力仍然偏低。

(3)未来一定时期,气候变化影响将长期存在,由此引起的冻土消融、冰川消退仍将持续,但人类活动引起的负面影响将逐步得到改善。

(4)需从完善黄河源区水文监测体系、实施以水源涵养单元为基础的精准化生态治理、建立流域生态补偿机制、加强水源涵养基础研究等方面,做好水源涵养能力建设,强化水源涵养功能。

参 考 文 献:

- [1] 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.
- [2] 江恩慧,王远见,田世民,等.流域系统科学初探[J].水利学报,2020,51(9): 1026-1037. (JIANG Enhui, WANG Yuanjian,

- TIAN Shimin, et al. Exploration of watershed system science[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(9): 1026-1037. (in Chinese))
- [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. (ZHOU Jiawen, GAO Jixi, GAO Zhiqiu, et al. Analyzing the water conservation service function of the forest ecosystem[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(5): 1679-1686. (in Chinese))
- [4] LANDON A C, KYLE G T, KAISER R A. Predicting compliance with an information-based residential outdoor water conservation program[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 536: 26-36.
- [5] 王云飞, 叶爱中, 乔飞, 等. 水源涵养内涵及估算方法综述[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2021, 19(6): 1041-1071. (WANG Yunfei, YE Aizhong, QIAO Fei, et al. Review on connotation and estimation method of water conservation[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, 19(6): 1041-1071. (in Chinese))
- [6] 魏晓华, 李文华, 周国逸, 等. 森林与径流关系——一致性和复杂性[J]. *自然资源学报*, 2005, 20(5): 761-770. (WEI Xiaohua, LI Wenhua, ZHOU Guoyi, et al. Forests and streamflow—consistence and complexity[J]. *Journal of Natural Resources*, 2005, 20(5): 761-770. (in Chinese))
- [7] 乔飞, 富国, 徐香勤, 等. 三江源区水源涵养功能评估[J]. 环境科学研究, 2018, 31(6): 1010-1018. (QIAO Fei, FU Guo, XU Xiangqin, et al. Assessment of water conservation function in the Three-River Headwaters Region[J]. Research of Environmental Sciences, 2018, 31(6): 1010-1018. (in Chinese))
- [8] 张彪, 李文华, 谢高地, 等. 森林生态系统的水源涵养功能及其计量方法[J]. 生态学杂志, 2009, 28(3): 529-534. (ZHANG Biao, LI Wenhua, XIE Gaodi, et al. Water conservation function and its measurement methods of forest ecosystem[J]. Chinese Journal of Ecology, 2009, 28(3): 529-534. (in Chinese))
- [9] 龚诗涵, 肖洋, 郑华, 等. 中国生态系统水源涵养空间特征及其影响因素[J]. 生态学报, 2017, 37(7): 2455-2462. (GONG Shihan, XIAO Yang, ZHENG Hua, et al. Spatial patterns of ecosystem water conservation in China and its impact factors analysis[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(7): 2455-2462. (in Chinese))
- [10] 曹巍, 刘璐璐, 吴丹, 等. 三江源国家公园生态功能时空分异特征及其重要性辨识[J]. 生态学报, 2019, 39(4): 1361-1374. (CAO Wei, LIU Lulu, WU Dan, et al. Spatial and temporal variations and the importance of hierarchy of ecosystem functions in the Three-river-source National Park[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(4): 1361-1374. (in Chinese))
- [11] 王道席, 田世民, 蒋思奇, 等. 黄河源区径流演变研究进展[J]. *人民黄河*, 2020, 42(9): 90-95. (WANG Daoxi, TIAN Shimin, JIANG Siqi, et al. Research progress of the evolution of runoff in the source area of the Yellow River[J]. *Yellow River*, 2020, 42(9): 90-95. (in Chinese))
- [12] 尹云鹤, 吴绍洪, 赵东升, 等. 过去30年气候变化对黄河源区水源涵养量的影响[J]. *地理研究*, 2016, 35(1): 49-57. (YIN Yunhe, WU Shaohong, ZHAO Dongsheng, et al. Ecosystem water conservation changes in response to climate change in the Source Region of the Yellow River from 1981 to 2010[J]. *Geographical Research*, 2016, 35(1): 49-57. (in Chinese))
- [13] 徐浩杰, 杨太保, 曾彪. 黄河源区植被生长季NDVI时空特征及其对气候变化的响应[J]. 生态环境学报, 2012, 21(7): 1205-1210. (XU Haojie, YANG Taibao, ZENG Biao. Spatial-temporal variation of growing-season NDVI and its responses to climate change over the source region of the Yellow River[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2012, 21(7): 1205-1210. (in Chinese))
- [14] 管晓祥, 刘翠善, 鲍振鑫, 等. 黄河源区植被NDVI演变及其与降水、气温的关系[J]. 水土保持研究, 2021, 28(5): 268-277. (GUAN Xiaoxiang, LIU Cuishan, BAO Zhenxin, et al. Variation of vegetation NDVI and its relationship with climate factors in the Yellow River source region[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(5): 268-277. (in Chinese))
- [15] 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.
- [16] 陈琼, 张懿锂, 刘峰贵, 等. 黄河流域河源区土地利用变化及其影响研究综述[J]. *资源科学*, 2020, 42(3): 446-459. (CHEN Qiong, ZHANG Yili, LIU Fenggui, et al. A review of land use change and its influence in the source region of the Yellow River[J]. *Resources Science*, 2020, 42(3): 446-459. (in Chinese))
- [17] 王根绪, 沈永平, 钱鞠, 等. 高寒草地植被覆盖变化对土壤水分循环影响研究[J]. 冰川冻土, 2003, 25(6): 653-659. (WANG Genxu, SHEN Yongping, QIAN Ju, et al. Study on the influence of vegetation change on soil moisture cycle in alpine meadow[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003, 25(6): 653-659. (in Chinese))
- [18] 水利部黄河水利委员会. 黄河流域综合规划[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2013. (Yellow River Water Conservancy Commission of the Ministry of Water Resources. Comprehensive planning of the Yellow River Basin[M]. Zhengzhou: Yellow River Water Conservancy Press, 2013.)

River Water Conservancy Press, 2013. (in Chinese))

- [19] ZENG M X, ZHU C, SONG Y G, et al. Paleoenvironment change and its impact on carbon and nitrogen accumulation in the Zoige wetland, northeastern Qinghai—Tibetan Plateau over the past 14, 000 years[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2017, 18(4): 1775-1792.
- [20] 施雅风, 王宗太, 刘潮海, 等. 简明中国冰川目录[M]. 上海: 上海科学普及出版社, 2005. (SHI Yafeng, WANG Zongtai, LIU Chaohai, et al. Concise catalogue of Chinese glaciers[M]. Shanghai: Shanghai Science Popularization Press, 2005. (in Chinese))
- [21] 王有恒, 谭丹, 韩兰英, 等. 黄河流域气候变化研究综述[J]. 中国沙漠, 2021, 41(4): 235-246. (WANG Youheng, TAN Dan, HAN Lanying, et al. Review of climate change in the Yellow River Basin[J]. *Journal of Desert Research*, 2021, 41(4): 235-246. (in Chinese))
- [22] LUO D L, JIN H J, LÜ L Z, et al. Spatiotemporal changes in extreme ground surface temperatures and the relationship with air temperatures in the Three-River Source Regions during 1980—2013[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2016, 123(3/4): 885-897.
- [23] 马帅, 盛煜, 曹伟, 等. 黄河源区多年冻土空间分布变化特征数值模拟[J]. *地理学报*, 2017, 72(9): 1621-1633. (MA Shuai, SHENG Yu, CAO Wei, et al. Numerical simulation of spatial distribution and change of permafrost in the source area of the Yellow River[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(9): 1621-1633. (in Chinese))
- [24] 肖风劲, 徐雨晴, 黄大鹏, 等. 气候变化对黄河流域生态安全影响及适应对策[J]. *人民黄河*, 2021, 43(1): 10-14, 52. (XIAO Fengjin, XU Yuqing, HUANG Dapeng, et al. Impact of climate change on ecological security of the Yellow River Basin and its adaptation countermeasures[J]. *Yellow River*, 2021, 43(1): 10-14, 52. (in Chinese))
- [25] 李静, 盛煜, 吴吉春, 等. 黄河源区冻土分布制图及其热稳定性特征模拟[J]. *地理科学*, 2016, 36(4): 588-596. (LI Jing, SHENG Yu, WU Jichun, et al. Mapping frozen soil distribution and modeling permafrost stability in the source area of the Yellow River[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2016, 36(4): 588-596. (in Chinese))
- [26] 罗栋梁, 金会军. 黄河源区玛多县1953—2012年气温和降水特征及突变分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2014, 28(11): 185-192. (LUO Dongliang, JIN Huijun. Variations of air temperature and precipitation from 1953 to 2012 in the Madoi Station in the sources areas of the Yellow River[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2014, 28(11): 185-192. (in Chinese))
- [27] LI R, WU Q B, LI X, et al. Characteristic, changes and impacts of permafrost on Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2019, 64(27): 2783-2795.
- [28] LUO D L, JIN H J, JIN X Y, et al. Elevation-dependent thermal regime and dynamics of frozen ground in the Bayan Har Mountains, northeastern Qinghai-Tibet Plateau, southwest China[J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2018, 29(4): 257-270.
- [29] 陈英玉, 王永贵, 周向阳. 黄河源区荒漠化现状及其驱动力研究[J]. *青海大学学报(自然科学版)*, 2008, 26(4): 71-76, 80. (CHEN Yingyu, WANG Yonggui, ZHOU Xiangyang. Research on the status of the desertification and its driving force in the source region of the Yellow River[J]. *Journal of Qinghai University (Nature Science)*, 2008, 26(4): 71-76, 80. (in Chinese))
- [30] 张懿锂, 刘林山, 王兆锋, 等. 青藏高原土地利用与覆被变化的时空特征[J]. *科学通报*, 2019, 64(27): 2865-2875. (ZHANG Yili, LIU Linshan, WANG Zhaofeng, et al. Spatial and temporal characteristics of land use and cover changes in the Tibetan Plateau[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2019, 64(27): 2865-2875. (in Chinese))
- [31] 孙华方, 李希来, 金立群, 等. 生物土壤结皮对黄河源区人工草地植被与土壤理化性质的影响[J]. *草地学报*, 2020, 28(2): 509-520. (SUN Huafang, LI Xilai, JIN Liqun, et al. Effects of biological soil crusts on the physical and chemical properties of soil and vegetation of artificial grassland in the Yellow River source zone[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2020, 28(2): 509-520. (in Chinese))
- [32] 牛岳. 基于决策树模型的黄河源湿地信息提取[D]. 北京: 中国地质大学, 2020. (NIU Yue. Wetland information extraction of the Yellow River source based on decision tree model[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2020. (in Chinese))
- [33] 李林, 李凤霞, 朱西德, 等. 黄河源区湿地萎缩驱动力的定量辨识[J]. *自然资源学报*, 2009, 24(7): 1246-1255. (LI Lin, LI Fengxia, ZHU Xide, et al. Quantitative identification of driving force on wetland shrinkage over the source region of the Yellow River[J]. *Journal of Natural Resources*, 2009, 24(7): 1246-1255. (in Chinese))
- [34] 杜际增, 王根绪, 杨燕, 等. 长江黄河源区湿地分布的时空变化及成因[J]. *生态学报*, 2015, 35(18): 6173-6182. (DU Jizeng, WANG Genxu, YANG Yan, et al. Temporal and spatial variation of the distributive patterns and driving force analysis in the

- Yangtze River and Yellow River source regions wetland[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(18): 6173-6182. (in Chinese))
- [35] 刘红玉, 白云芳. 若尔盖高原湿地资源变化过程与机制分析[J]. *自然资源学报*, 2006, 21(5): 810-818. (LIU Hongyu, BAI Yunfang. Changing process and mechanism of wetland resources in Ruorgai Plateau, China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2006, 21(5): 810-818. (in Chinese))
- [36] 李丽, 高俊琴, 雷光春, 等. 若尔盖不同地下水位泥炭湿地土壤有机碳和全氮分布规律[J]. *生态学杂志*, 2011, 30(11): 2449-2455. (LI Li, GAO Junqin, LEI Guangchun, et al. Distribution patterns of soil organic carbon and total nitrogen in Zoige peat land with different ground water table[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(11): 2449-2455. (in Chinese))
- [37] 王根绪, 李娜, 胡宏昌. 气候变化对长江黄河源区生态系统的影响及其水文效应[J]. *气候变化研究进展*, 2009, 5(4): 202-208. (WANG Genxu, LI Na, HU Hongchang. Hydrologic effect of ecosystem responses to climatic change in the source regions of Yangtze River and Yellow River[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2009, 5(4): 202-208. (in Chinese))
- [38] 郑子彦, 吕美霞, 马柱国. 黄河源区气候水文和植被覆盖变化及面临问题的对策建议[J]. *中国科学院院刊*, 2020, 35(1): 61-72. (ZHENG Ziyang, LÜ Meixia, MA Zhuguo. Climate, hydrology, and vegetation coverage changes in source region of Yellow River and countermeasures for challenges[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2020, 35(1): 61-72. (in Chinese))
- [39] LONG D, PAN Y, ZHOU J, et al. Global analysis of spatiotemporal variability in merged total water storage changes using multiple GRACE products and global hydrological models[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 192: 198-216.
- [40] 蒋宗立, 刘时银, 郭万钦, 等. 黄河源区阿尼玛卿山典型冰川表面高程近期变化[J]. *冰川冻土*, 2018, 40(2): 231-237. (JIANG Zongli, LIU Shiyin, GUO Wanqin, et al. Recent surface elevation changes of three representative glaciers in Nyêmaqên Mountains, source region of Yellow River[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2018, 40(2): 231-237. (in Chinese))
- [41] 金姗姗, 付姣. 基于多时相Landsat TM/ETM的阿尼玛卿山冰川变化监测[J]. *北京测绘*, 2013(1): 20-23, 10. (JIN Shanshan, FU Jiao. Detection of the glacial changes in Animaqingshan area based on landsat TM/ETM images[J]. *Beijing Surveying and Mapping*, 2013(1): 20-23, 10. (in Chinese))
- [42] 郜国明, 田世民, 曹永涛, 等. 黄河流域生态保护问题与对策探讨[J]. *人民黄河*, 2020, 42(9): 112-116. (GAO Guoming, TIAN Shimin, CAO Yongtao, et al. Discussion on the issues and countermeasures of ecological conservation of the Yellow River Basin[J]. *Yellow River*, 2020, 42(9): 112-116. (in Chinese))
- [43] MA Q, JIN H J, BENSON V F, et al. Impacts of degrading permafrost on streamflow in the source area of Yellow River on the Qinghai-Tibet Plateau, China[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2019, 10(4): 225-239.
- [44] WU X L, ZHANG X, XIANG X H, et al. Changing runoff generation in the source area of the Yellow River: Mechanisms, seasonal patterns and trends[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2018, 155: 58-68.
- [45] 冯雨晴. 青藏高原冰川冻土变化及其生态与水文效应研究: 以黄河源、雅鲁藏布江流域和冻土退化带为典型区[D]. 北京: 中国地质大学, 2020. (FENG Yuqing. Changes of glaciers and permafrost in Qinghai-Tibet plateau and their ecological and hydrological effects—take the Yellow River source, Brahmaputra River Basin and permafrost degradation turning zone as typical study region[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2020. (in Chinese))
- [46] 张镭, 黄建平, 梁捷宁, 等. 气候变化对黄河流域的影响及应对措施[J]. *科技导报*, 2020, 38(17): 42-51. (ZHANG Lei, HUANG Jianping, LIANG Jiening, et al. Impact of climate change on the Yellow River Basin and responses[J]. *Science & Technology Review*, 2020, 38(17): 42-51. (in Chinese))
- [47] PIAO S L, YIN G D, TAN J G, et al. Detection and attribution of vegetation greening trend in China over the last 30 years[J]. *Global Change Biology*, 2015, 21(4): 1601-1609.
- [48] 谢亚军, 谢永宏, 陈心胜, 等. 湿地土壤水源涵养功能研究进展[J]. *湿地科学*, 2012, 10(1): 109-115. (XIE Yajun, XIE Yonghong, CHEN Xinsheng, et al. Function of water conservation of wetland soil: a review[J]. *Wetland Science*, 2012, 10(1): 109-115. (in Chinese))
- [49] ZHANG M L, XU T P, JIANG H Z. The impacts of runoff decrease and shoreline change on the salinity distribution in the wetlands of Liao River Estuary, China[J]. *Ocean Science*, 2021, 17(1): 187-201.
- [50] LUSCOMBE D J, ANDERSON K, GRAND-CLEMENT E, et al. How does drainage alter the hydrology of shallow degraded peatlands across multiple spatial scales?[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 541: 1329-1339.
- [51] LI Z W, GAO P. Impact of natural gullies on groundwater hydrology in the Zoige peatland, China[J]. *Journal of Hydrology:Regional Studies*, 2019, 21: 25-39.

- [52] 熊远清, 吴鹏飞, 张洪芝, 等. 若尔盖湿地退化过程中土壤水源涵养功能[J]. 生态学报, 2011, 31(19): 5780-5788. (XIONG Yuanqing, WU Pengfei, ZHANG Hongzhi, et al. Dynamics of soil water conservation during the degradation process of the Zoigê Alpine Wetland[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(19): 5780-5788. (in Chinese))
- [53] LI B Q, YU Z B, LIANG Z M, et al. Effects of climate variations and human activities on runoff in the Zoige Alpine wetland in the eastern edge of the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2014, 19(5): 1026-1035.
- [54] 刘时银, 姚晓军, 郭万钦, 等. 基于第二次冰川编目的中国冰川现状[J]. 地理学报, 2015, 70(1): 3-16. (LIU Shiyin, YAO Xiaojun, GUO Wanqin, et al. The contemporary glaciers in China based on the Second Chinese Glacier Inventory[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(1): 3-16. (in Chinese))
- [55] 王凯, 杨太保, 何毅, 等. 近30年阿尼玛卿山冰川与气候变化关系研究[J]. 水土保持研究, 2015, 22(3): 300-303, 308. (WANG Kai, YANG Taibao, HE Yi, et al. Research for glaciers and climate change of A'nyêMaqên mountain nearly 30 years[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2015, 22(3): 300-303, 308. (in Chinese))
- [56] 陈怡平, 傅伯杰. 黄河流域不同区段生态保护与治理的关键问题[N]. 中国科学报, 2021-03-02(7). (CHEN Yiping, FU Bojie. Key issues of ecological protection and management in different sections of the Yellow River Basin[N]. *China Science Daily*, 2021-03-02(7). (in Chinese))
- [57] 王金花, 刘吉峰, 张荣刚. 黄河源区未来气候变化情景预测[J]. 人民黄河, 2012, 34(6): 35-37. (WANG Jinhua, LIU Jifeng, ZHANG Ronggang. Generation method of climate scene based in the headwater regions of the Yellow River[J]. *Yellow River*, 2012, 34(6): 35-37. (in Chinese))
- [58] 王梦园. 未来气候变化下的黄河源区降水径流趋势[D]. 西宁: 青海大学, 2019. (WANG Mengyuan. Precipitation runoff trend in the source region of the Yellow River under future climate change[D]. Xining: Qinghai University, 2019. (in Chinese))
- [59] 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.

Discussion on water conservation capacity in the source area of the Yellow River

TIAN Shimin^{1,2,3}, HAN Bing^{1,2,3}, LIANG Shuai^{1,2,3}, WANG Wanwan^{1,2,3}, CAO Yongtao^{1,2,3}

(1. Yellow River Institute of Hydraulic Research, YRCC, Zhengzhou 450003, China; 2. Henan Engineering Technology Research Center of Aquatic Eco-Environment, Zhengzhou 450003, China; 3. Henan Key Laboratory of Yellow River Basin Ecological Protection and Restoration, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: The source area of the Yellow River is very important for water conservation in the Yellow River Basin. Under the coupled stresses of climate change and human activities, the ecosystem in the source area of the Yellow River has degraded significantly, which has a significant impact on the water conservation function. Based on previous studies, we elaborate the concept and connotation of water conservation, relate the change process for the subjects of water conservation in the source area of the Yellow River, discuss the response characteristics of water conservation function to the change of water conservation subjects, and analyze the situation facing the evolution of the water conservation capacity of the Yellow River source area in the future. Based on the above research, the countermeasures and suggestions for improving the water conservation capacity are put forward. It can provide support for further researches and references for the improvement of water conservation capacity in the source area.

Key words: source area of the Yellow River; water conservation; evolution characteristics; promotion countermeasures