

DOI:10.3880/j.issn.1006-7647.2022.04.015

# 黄河源区水源涵养能力研究综述

周冰玉<sup>1</sup>,李志威<sup>2</sup>,田世民<sup>3</sup>,游宇驰<sup>1</sup>

(1. 长沙理工大学水利与环境工程学院,湖南长沙 410114;

2. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室,湖北武汉 430072; 3. 黄河水利科学研究院,河南郑州 450003)

**摘要:**黄河源区是黄河流域的主要产流区和水源涵养区,近年来源区径流量呈下降趋势,气温、降水、辐射、潜在蒸散发等是影响水源涵养的主要气候因素,草地退化、湿地萎缩、冻土消融也使得水源涵养单元受到显著影响。为科学认识和理解黄河源区水源涵养功能对湿地保护、水资源调蓄的重要意义,总结了水源涵养功能及其评估方法,阐述了黄河源区生态景观演变过程和泥炭地储水量研究现状,分析了不同水源涵养单元对源区水源涵养能力的影响。指出融合多种研究手段、方法,多尺度、多过程、多要素揭示黄河源区水源涵养变化机理是未来黄河源区水源涵养功能研究的发展方向。

**关键词:**水源涵养;草地退化;湿地萎缩;冻土消融;气候变化;黄河源区

中图分类号:TV147

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2022)04-0087-07

**A review on water conservation capacity in Yellow River source region//**ZHOU Bingyu<sup>1</sup>, LI Zhiwei<sup>1,2</sup>, TIAN Shimin<sup>3</sup>, YOU Yuchi<sup>1</sup> (1. School of Hydraulic and Environmental Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 3. Yellow River Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou 450003, China)

**Abstract:** The source region of the Yellow River (SRYR) is the main runoff area and water conservation area in the Yellow River basin. The runoff in the SRYR has been declining in recent decades. Climate factors such as temperature, precipitation, radiation, and potential evapotranspiration are the main factors affecting water conservation. Grassland degradation, wetland shrinkage and frozen soil ablation also significantly affected the water conservation units. To scientifically know and understand the water conservation function of the SRYR in wetland protection, water resource regulation and storage, the water conservation function and its evaluation methods were summarized. The evolution process of the ecological landscape in the SRYR and the current research of peatland water storage were expounded. The impact of different water conservation units on the water conservation capacity of the SRYR was analyzed. A variety of research methods should be integrated to reveal the change mechanism of water conservation in the SRYR from multi-scale, multi-process and multi-element, which can be the future research direction.

**Key words:** water conservation; grassland degradation; wetland shrinkage; permafrost ablation; climate change; Yellow River source region

黄河源区地处青藏高原东北部,平均高程3500m以上,包括黄河源至唐乃亥水文站的地域。源区面积约占整个黄河流域的17.0%,1950—2015年平均年径流量为200.6亿m<sup>3</sup>,约占黄河流域年径流量的1/3,是“中华水塔”青藏高原的主要构成部分。作为黄河的重要水源涵养区和主要产流区,黄河源区是中国西部地区可持续发展的生态屏障。

水源涵养是陆地生态系统的重要生态服务功能之一,是反映区域生态系统状况的重要指示器<sup>[1]</sup>。黄河源区的主要水源涵养单元包括草地、湿地、冻土、冰川等,其中,草地面积约占黄河源区总面积的

71.0%,其通过土壤与植被间的相互作用蓄存水分并发挥水源涵养功能<sup>[2-3]</sup>;湿地面积占黄河源区总面积的8.4%,源区的若尔盖湿地是我国面积最大的泥炭沼泽湿地,被誉为黄河上游的蓄水池<sup>[4]</sup>;大片连续、不连续和岛状冻土交错分布于源区,是高寒地带重要的固态水源<sup>[5]</sup>;源区的冰川面积较小且集中于阿尼玛卿山区域,发育现代冰川50余条,有3条大冰川的面积超过10km<sup>2</sup>,冰川对黄河源区水资源变化的影响相对较小。

自1960年以来,受气候变化和人类活动的双重影响,黄河源区的水源涵养单元发生了显著变化:草

基金项目:国家自然科学基金(51979012, 51978120, U2243214)

作者简介:周冰玉(1998—),女,硕士研究生,主要从事高原湿地水文研究。E-mail: zby19980102@163.com

通信作者:李志威(1984—),男,副教授,博士,主要从事青藏高原河流动力学研究。E-mail: lizw2003@whu.edu.cn

地覆盖度降低,湖泊水域萎缩,湿地面积不断减少(若尔盖泥炭湿地逆向演替<sup>[6]</sup>),多年冻土严重退化<sup>[7]</sup>,冰川面积减少,沙漠化土地面积增加。黄河源区水源涵养演变呈现多过程、多因素耦合驱动的特征,各水源涵养主体的结构和功能在环境变化下相互影响且不断变化。国内外学者围绕黄河源区生态景观演变、水文过程、气候和人类活动等主要影响因素变化以及不同地域和不同生态系统的水源涵养功能开展了一系列研究<sup>[8-10]</sup>。然而,以往的研究侧重于黄河中下游河段的水沙变化、河床演变和防洪保安,对于黄河源区的水源涵养演变机理缺少系统研究和科学认识。当前我国西北地区的气候呈现由冷干向暖湿化发展的趋势<sup>[11]</sup>,在此背景下开展黄河源区水源涵养能力研究,揭示多尺度、多过程、多因素耦合驱动下水源涵养演变机理,对于深入了解黄河源区水源演变过程,提升水源涵养能力有重要意义。

本文在现有黄河源区蓄水量研究以及2011—2020年野外考察与观测的基础上,总结了水源涵养功能及其评估方法,对黄河源区生态景观演变及水文过程响应进行了综合分析,探讨了草地退化、湿地萎缩、冻土消融对黄河源区水源涵养功能的影响。

## 1 水源涵养功能及其评估方法

### 1.1 水源涵养功能和影响因素

水源涵养指陆地生态系统通过对降水的截留、吸收和储存,改变水文循环路径、区域产流特性和水分储存方式,调节地表水、土壤水和地下水之间的补-径-排关系,进而对流域水文过程产生影响<sup>[12]</sup>。随着多学科研究的深入,水土保持拦蓄降水和土壤含水等水源涵养功能逐渐受到关注,水源涵养功能的内涵也不断扩大和外延。

国内关于水源涵养功能的研究开始于1920年,相关学者对黄土高原以及大江大河流域的水源涵养功能均进行了不同程度的研究<sup>[13]</sup>。我国水源涵养的空间分布规律总体上呈东南高西北低、由东向西逐渐递减的特点,2010年全国生态系统水源涵养总量为12 224.33亿m<sup>3</sup>,其中森林部分的水源涵养量

占60.80%,其次为草地和灌丛,水源涵养量分别占15.65%和14.10%<sup>[1]</sup>。黄河源区水源涵养量在1980年相对较高,之后显著降低,2000年后又有所恢复,其中2001—2017年若尔盖流域年均水源涵养总量为65.7亿m<sup>3</sup>,在黄河源区及黄河上游发挥了重要的水源涵养作用<sup>[10,14]</sup>。然而,受降水减少和潜在蒸散增加的共同影响,近30年来黄河源区水源涵养量以1.15mm/a的速率减少<sup>[10]</sup>。

水源涵养功能受自然因素和人类活动的双重影响,其中,降水量以及大气水分需求能力变化对水源涵养量有重要影响,降水、气温、蒸散发、辐射及下垫面等因子是影响水源涵养的主要气候因素<sup>[10]</sup>。在这些因素中,降水和蒸散发对径流变化的贡献率为87.9%<sup>[15]</sup>。近几十年来,黄河源区降水表现出冬季显著增加、秋季略有减少的特征,降水和径流在年际变化上具有一致性,但在年内尺度上径流响应具有滞后性。黄河源区气温在过去几十年总体表现为上升趋势,即气温每升高1℃,黄河源区蒸散发量将提高5.0%~10.0%<sup>[16]</sup>。20世纪90年代黄河源区东南部降水减少,蒸散发显著增大,导致了源区径流量减少<sup>[17]</sup>。

### 1.2 水源涵养功能评估方法

水源涵养功能评估方法的发展大致经历了森林水文过程研究、量化计算及多模型集成3个阶段<sup>[18-20]</sup>,见表1。

除表1所列的主要评估计算方法外,多因子回归法、林冠截留剩余量法、降水储存量法等也可用于计算水源涵养能力,但由于数据获取困难、普遍适用性低而较少使用。具体运用过程中,应根据实际情况选取不同的方法,如具备蒸散发数据则通常使用水量平衡法,大时空尺度研究区适用多模型集成方法等。

## 2 黄河源区生态景观演变和泥炭地储水量

### 2.1 黄河源区生态景观演变及水文过程响应

在自然因素和人类活动的双重影响下,黄河源区草地、湿地、冻土、冰川等生态景观类型均发生了不同程度的退化<sup>[21-24]</sup>,导致水源涵养能力下降<sup>[8]</sup>,

表1 水源涵养功能评估方法的发展历程

发展阶段	评估方法	优点	缺点
森林水文过程研究阶段	通过观察测量数据来分析森林与水的关系,研究森林植被类型对径流的影响等方法	揭示了森林生态系统的水文过程、机制与特征	仅针对森林生态系统,缺乏系统化的定量评价指标
量化计算阶段	蓄水能力法、水量平衡法、水文模型法等方法	蓄水能力法直观表达了水源涵养能力;水量平衡法主要考虑生态系统的水分输入和输出;水文模型法可实现对水源涵养过程的动态模拟和分析	蓄水能力法没有考虑生态系统的水文蒸散过程,适用于较小尺度的生态系统;水量平衡法所需的蒸散发数据获取难度大,未考虑林冠截留等因素;水文模型法仅基于孤立的生态系统的水文过程,缺乏与其他生态过程的耦合
多模型集成阶段	基于各种生态过程的模型耦合等方法	更加全面系统,能够有效模拟水源涵养过程及相关的生态过程	所需数据量庞大、算法复杂度高

其中,草地覆盖度下降(8%和15%的高覆盖高寒草原分别演变为中覆盖和低覆盖高寒草原,部分天然草地演变为人工草地);泥炭湿地自然疏干,湿地景观趋向破碎化,出现旱化沼泽草甸、草甸和沙化草甸等并存的景观格局;冻土退化显著(活动层加深、季节冻深变浅、融区扩展或贯通增加了储水空间,使得基流并不随降水增加而增加);冰川融水大幅减少(阿尼玛卿山冰川整体处于物质亏损状态,1966—2000年耶和龙冰川的冰面海拔下降了1950m,2000—2013年哈龙冰川厚度呈减薄趋势)。水文过程是黄河源区水源涵养能力的一个重要体现。自1956年以来,黄河源区径流经历了“丰—枯—丰—枯—丰”的交替变化过程<sup>[25-26]</sup>,径流量总体呈下降趋势<sup>[9]</sup>。黄河源区径流年内分配不均,主要集中在汛期,唐乃亥站汛期径流量占全年径流量的71%。源区内径流存在单峰和双峰两种峰型,峰值一般出现在7月和9月,1990年后演变为单峰型<sup>[27]</sup>。1956—2018年除6月和12月的径流量呈上升趋势,1—5月和7—11月的径流量呈下降趋势,其中5月、8月和9月的径流下降幅度较大<sup>[28]</sup>。相比1990年以前,黄河源区径流量已减少15%~20%。1960年以来,黄河源区下垫面不断发生冻土退化、植被覆盖度降低、湖泊及湿地萎缩等变化,对黄河源区的水文过程产生了一定影响<sup>[29-30]</sup>。近期,随着三江源国家公园的建设以及草地与湿地生态修复措施的实施,黄河源区的生态环境状况有所好转,但局部地区水源涵养能力仍持续降低。

综上,前期研究主要揭示了黄河源区生态景观类型的演变过程以及径流的长期变化特征,没有基于水文响应过程划分水源涵养单元并开展源区水源涵养能力变化研究,且不同水源涵养单元或涵养主体间的相互作用机制也不明晰。此外,有关径流演变的研究主要依托黄河沿、玛曲、吉迈、唐乃亥等干流水文站,且同时采用以上4个水文站径流序列的研究仅占17%<sup>[9]</sup>,干支流径流演变空间特征阐述也不够,径流变化与水源涵养单元演变的对应关系和响应机制尚不明确。

## 2.2 若尔盖泥炭地储水量研究

若尔盖盆地是黄河上游极其重要的水源地,被誉为我国黄河上游的“蓄水池”。分布于若尔盖盆地的泥炭湿地是一个巨大的离散海绵,作为我国最重要的高原沼泽湿地,其丰富的地下水资源量对区域生态平衡和黄河上游水量供给产生了重要的影响<sup>[31]</sup>。研究表明,若尔盖泥炭沼泽面积不断减少,但地下水储存量仍较大<sup>[32]</sup>。储水量可通过白河唐克水文站、黑河大水和若尔盖水文站、黄河干流玛曲

水文站等站点的水文数据间接证实和粗略估算。根据泥炭持水量公式测算,若尔盖泥炭地储水量可达45.0亿 $m^3$ ,若尔盖盆地每年向黄河源区的补水量约为(67.1±14.9)亿 $m^3$ ,且呈逐年减少趋势<sup>[33]</sup>,其中20.0亿 $m^3$ 的地表水入渗成为地下水,主要储存于泥炭层中,可补给超过1/3的河道径流量。

若尔盖泥炭地储水量研究对于黄河流域的水资源可持续利用与保护具有重要的意义<sup>[32]</sup>,但目前对具体水资源量以及其随时间的变化趋势仍然未知,主要原因是:①泥炭层分布存在明显的空间差异<sup>[34]</sup>。②泥炭层的储水量并不完全取决于其厚度,还受到泥炭层的物理性质、地下水位的高低及其变化的影响。③泥炭层地下水位不仅受降雨强度、雨量和时间的影响,还与无雨期的长短、地表形态和植被分布等密切相关。此外,泥炭地的人工开沟排水<sup>[35-36]</sup>、自然水系溯源下切疏水<sup>[37]</sup>、城镇及牧民生活用水等都对若尔盖泥炭层的输水量变化过程产生了不同程度的持续扰动,且存在较大的时空差异。人工沟道和自然沟道对地下水位及横向排水量均有影响,其中人工沟道大多沟深较浅,对地下水的影响有限,自然冲沟切穿泥炭层后将增加地下水出流量。但随着垂直沟道的横向距离的增加,两者的影响力均逐步减弱<sup>[38]</sup>。

综上,估算泥炭层的储水量及其变化较为困难,仅粗略估计泥炭层储水量的上限与下限还远远不够。众所周知,泥炭地储水量的减少是沼泽萎缩和泥炭退化的必要条件之一,而泥炭沼泽退化的发生是一个在时间尺度上以10a为单位的渐变过程。因此,泥炭层储水量的减少也至少是一个以a为单位的渐变水文过程。研究典型小流域在一个水文年内降雨期和非降雨期泥炭层内各种水文过程和储水量的时空变化及其水量平衡,对于认识整个若尔盖盆地的沼泽湿地水文过程及萎缩机制具有十分重要的意义,对于黄河上游水资源的优化配置与可持续利用也具有一定参考价值。

## 3 黄河源区水源涵养能力影响因素

### 3.1 草地退化与湿地萎缩对水源涵养的影响

草地约占陆地总面积的27%,是地表面积最大的生态系统类型,同时草地也是黄河源区占比最大的植被覆盖类型。水分在土壤-植被-大气连续体系间发生运移,影响着草地生态系统的储水量和水量平衡。在草地生态系统中植被覆盖度与土壤水分存在显著相关,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,并体现水源涵养功能<sup>[3]</sup>。土壤特性对草地水源涵养功

能具有重要影响,研究发现黄河源区的草地在恢复重建过程中,土壤的理化性质得到了持续改变,水源涵养能力得到一定提高<sup>[39]</sup>。同时,草地面积增加在一定程度上又引起耗水增加,在干旱半干旱地区草地的增加部分导致了产水量的减少<sup>[20]</sup>。

湿地处于水生态系统和陆地生态系统之间,作为多功能过渡性生态系统,其对于径流调节、水源涵养及生物多样性形成等方面起到主要作用。湿地的蓄水能力因土壤特性而异,当土壤有机质含量较高时可发育成泥炭层,从而具备良好的蓄水能力<sup>[40]</sup>。从全球范围来看,泥炭湿地面积占全球陆地面积的3%,占全球湿地面积的40%~70%,储蓄了10%的淡水资源<sup>[41]</sup>。泥炭湿地是黄河源区主要的湿地类型,其储存水量的变化是水源涵养能力的关键表征指标。

草地和湿地作为黄河源区重要的生态景观类型,其各种水文过程、储水量时空变化及水量平衡对于深入了解黄河源区水源涵养演变过程及演变机制具有重要的科学意义。近几十年来,随着人类活动强度的增大,人工排水导致的草地和湿地水文过程干扰日趋严重。若尔盖湿地分布着纵横交织的近1400条人工沟渠,总长度达1800.0 km<sup>[29,42]</sup>,不断增强的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,对湿地内水系演化和湿地演变具有直接影响和加速作用,从而影响湿地储水量和水源涵养能力<sup>[43]</sup>。沟道侵蚀和溯源侵蚀是切穿泥炭层、降低地下水位、增加侧向排水和疏干泥炭沼泽的关键水力过程,是若尔盖泥炭湿地退化和萎缩的主要驱动力<sup>[29,42]</sup>。受水力侵蚀的影响,若尔盖湿地土壤有机质含量及泥炭层厚度不断下降,部分地区土壤沙化,水源涵养能力有所下降。受湿地萎缩的影响,若尔盖泥炭湿地补给黄河的水量也以约0.5亿 m<sup>3</sup>/a的速度减少<sup>[44]</sup>。

然而,当前关于水力侵蚀对黄河源区草地和湿地地下水位及排水量变化的影响研究较少。由于缺乏长期和系统的监测,定量阐述地下水运动过程的数据支撑不足,因而水力侵蚀对草地和湿地水量平衡及水源涵养功能的影响机制尚不明确。

### 3.2 冻土水热过程对水源涵养的影响

黄河源区位于青藏高原的多年冻土区,地处东北部边缘地带,是季节冻土、岛状多年冻土和连续多年冻土并存地带<sup>[30]</sup>,冻土空间分布格局十分复杂,对河湖沼泽、高寒草地乃至动植物生境都产生了深远影响。多年冻土是黄河源区重要水源涵养单元,据统计,青藏高原多年冻土总地下冰含量为1.3万 km<sup>3</sup>,其中黄河源区地下冰含量为(49.6±18.0) km<sup>3</sup>,主要分布在3.0~10.0 m深度,其储水量相当于鄂陵湖、

扎陵湖的2.8倍<sup>[45-46]</sup>。多年冻土被分凝冰、胶结冰等地下冰体填充,因而渗透性极低,具有较强的隔水和贮水作用<sup>[47]</sup>。针对黄河源区不同冻土区冻融过程的监测表明,冻土温度越低,其冻结持续时间相对越长,由下向上的冻结过程就越明显,对大气降水和地表及壤中流的驻留作用也就相对越强<sup>[48]</sup>。

近几十年来,在气候变化和人类活动的双重影响下,黄河源区冻土显著退化,具体表现为岛状多年冻土消失、融区扩展或贯通、活动层加深、季节冻深变浅等<sup>[45]</sup>,深刻影响并改变了局部地区水文循环和高寒生态环境。测温记录表明,最近10 a黄河源区地下15.0 m处升温达0.2℃,数值模拟揭示活动层厚度在过去40 a平均增加50.0 cm,而多年冻土面积则年均减少1.1%<sup>[30,49]</sup>。研究表明,多年冻结层上水在20 a内减少了约1.5亿 m<sup>3</sup><sup>[50]</sup>,黄河源区活动层和融化层厚度每增加1.0 m,冬季径流分别约增加150.0 m<sup>3</sup>/s和400.0 m<sup>3</sup>/s。在气候变暖以及强降水作用下,浅表层土壤温度因强降水入渗携带热量可能升至0℃以上,渗透性增大,其隔水效应弱化,冻结层上水将向下渗漏,从而减少地表径流,局部地区水文结构也因之改变,并由此影响到水源涵养功能<sup>[51]</sup>。

当前黄河源区冻土研究多侧重于浅表层冻土水热过程交换及机制、多年冻土热状态时空分布格局及影响因素、冻结层上水的动态变化等,而关于水源涵养功能的研究尚未实质性展开。虽在多年冻土变化的水文径流效应上有所涉及,但也多基于黄河干流水文站径流分割并结合多年冻土热状态退化进行假设,其结论尚缺乏原型观测验证<sup>[52]</sup>。有关黄河源区多年冻土区的浅表层冻融过程和地表、地下径流变化对降水的响应,不仅缺少相应机理研究,也缺乏相应原型监测。此外,黄河源区冻土与高寒草地、泥炭湿地等不同水源涵养主体间的相互作用机制也不明晰。

## 4 结 语

黄河流域生态保护与高质量发展已成为国家重大发展战略,这对源区水源涵养能力提升有了更高的要求。然而,由于黄河源区水源涵养单元演变涉及诸多要素,过程极为复杂,现有研究未能将其进行有机耦合,相关机制和机理揭示还远远不够。主要存在如下问题:①研究手段不完善。受气候、环境、交通及监测条件等因素的影响,现有监测体系仍不完善甚至缺失。同时,在水源涵养计算模型方面,现有模型多通过参数率定和验证来体现其合理性,缺乏水源涵养演变物理过程和演变机制的支撑。②研究方法不系统。现有研究多以黄河源区生态景观类

型为对象,选择一定的区域开展监测和研究,没有基于水文响应过程区分不同的水源涵养单元。此外,在野外监测布局方面,监测区域的代表性不足,没有从黄河源区整体出发。③内在机制揭示不够。当前研究在宏观上注重对生态景观演变格局的描述,在微观上偏重于对局部过程的描述,对演变机制的揭示不够深入。

针对这些问题,未来在对黄河源区水源涵养功能的研究可从以下3个方面进行提升:①融合多种研究手段、研究方法划分水源涵养单元,分析不同水源涵养单元间的相互作用机制,阐明黄河源区各水源涵养单元的长期演变过程及对水源涵养功能的影响机制。②结合黄河源区多个水文站的径流序列资料,分析干、支流径流的空间变化特征,明晰径流变化对水源涵养单元的影响及对应关系。③黄河源区水源涵养涉及多尺度(时间和空间尺度)、多过程(时间和空间过程)、多要素(水文、气象、下垫面等),应不断丰富研究方法,结合多种影响因素构建基于水源涵养演变物理机制的计算模型,并提出提升水源涵养能力的有效对策与建议。

#### 参考文献:

[1] 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))

[2] 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 Yellow River[J]. Resources Science, 2020,42(3): 446-459. (in Chinese))

[3] 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(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(6): 653-659. (in Chinese))

[4] ZENG Mengxiu, ZHU Cheng, SONG Yougui, 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.

[5] LUO Dongliang, JIN Huijun, LU Lanzhi, 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 & Applied Climatology, 2016, 123(3/4): 885-897.

[6] 鲁瀚友,李志威,胡旭跃,等. 若尔盖高原径流量变化与储水量计算[J]. 水资源与水工程学报,2019(6): 12-19. (LU Hanyou, LI Zhiwei, HU Xuyue, et al. Estimation of runoff change and water storage in Zoige Plateau[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2019(6): 12-19. (in Chinese))

[7] WANG Taihua, YANG Hanbo, YANG Dawen, et al. Quantifying the streamflow response to frozen ground degradation in the source region of the Yellow River within the Budyko framework[J]. Journal of Hydrology, 2018, 558: 301-313.

[8] 吴燕锋,章光新. 流域湿地水文调蓄功能研究综述[J]. 水科学进展,2021,32(3): 458-469. (WU Yanfeng, ZHANG Guangxin. A review of hydrological regulation functions of watershed wetlands[J]. Advances in Water Science, 2021,32(3): 458-469. (in Chinese))

[9] 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))

[10] 左其亭,王娇阳,杨峰,等. 水源涵养相关概念辨析及水源涵养能力计算方法[J]. 水利水电科技进展,2022,42(2): 13-19. (ZUO Qiting, WANG Jiaoyang, YANG Feng, et al. Concept analysis of water conservation and calculation methods of water conservation capacity[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022,42(2): 13-19. (in Chinese))

[11] SHI Yafeng, SHEN Yongping, KANG Ersi, et al. Recent and future climate change in northwest China[J]. Climatic Change, 2007,80(3/4): 379-393.

[12] 乔飞,富国,徐香勤. 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))

[13] 刘有延,刘兴元,张博,等. 基于 InVEST 模型的黄土高原丘陵区水源涵养功能空间特征分析[J]. 生态学报,2020,40(17): 6161-6170. (LIU Youyan, LIU Xingyuan, ZHANG Bo, et al. Spatial features analysis of water conservation function in the hilly areas of the Loess Plateau based on InVEST model[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020,40(17): 6161-6170. (in Chinese))

[14] 苑跃,张亮,崔林林. 若尔盖高原生态系统水源涵养功能时空变化特征[J]. 生态学杂志,2020,39(8): 2713-2723. (YUAN Yue, ZHANG Liang, CUI Linlin. Spatiotemporal variations of water conservation capacity in Ruoergai Plateau[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020,

- 39(8): 2713-2723. (in Chinese)
- [15] 刘光生,王根绪,张伟. 三江源区气候及水文变化特征研究[J]. 长江流域资源与环境, 2012, 21(3): 302-308. (LIU Guangsheng, WANG Genxu, ZHANG Wei. Research on climate and runoff variation characteristics in the Three-River Headwaters Region [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2012, 21(3): 302-308. (in Chinese))
- [16] 吴晗,董增川,蒋飞卿,等. 黄河源区气候变化特性分析[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(6): 1-7. (WU Han, DONG Zengchuan, JIANG Feiqing, et al. Analysis of climate change in the source regions of the Yellow River [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2018, 29(6): 1-7. (in Chinese))
- [17] ZHOU Degang, HUANG Ronghui. Response of water budget to recent climatic changes in the source region of the Yellow River [J]. Chinese Science Bulletin, 2012 (17): 2155-2162.
- [18] 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. (HOU Xiaochen, SUN Wei, LI Jianguai, et al. The progress of research and forecast on the quantification of the forest water conservation capacity [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2018, 32(1): 121-127. (in Chinese))
- [19] 王晓学,沈会涛,李叙勇,等. 森林水源涵养功能的多尺度内涵、过程及计量方法[J]. 生态学报, 2013, 33(4): 1019-1030. (WANG Xiaoxue, SHEN Huitao, LI Xuyong, et al. Concepts, processes and quantification methods of the forest water conservation at the multiple scales [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(4): 1019-1030. (in Chinese))
- [20] 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. (WANG Yuchun, ZHAO Jun, FU Jiewen, et al. Quantitative assessment of water conservation function and spatial pattern in Shiyang River basin [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(13): 4637-4648. (in Chinese))
- [21] JIN Huijun, HE Ruixia, CHENG Guodong, 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.
- [22] 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 Anyemaqen Mountains, source region of Yellow River [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, 40(2): 231-237. (in Chinese))
- [23] 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))
- [24] 游宇驰,李志威,李希来. 1990—2011年若尔盖高原土地覆盖变化[J]. 水利水电科技进展, 2018, 38(2): 62-69. (YOU Yuchi, LI Zhiwei, LI Xilai. Land cover change in Zoige plateau during 1990-2011 [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2018, 38(2): 62-69. (in Chinese))
- [25] 刘彩红,朱西德,白彦芳. 近50年来黄河源区流量对气候变化的响应及其未来变化趋势预测[J]. 资源科学, 2011, 33(7): 1236-1241. (LIU Caihong, ZHU Xide, BAI Yanfang. A study on runoff response to climate change and its prediction in the headwater region of the Yellow River over the recent 50 years [J]. Resources Science, 2011, 33(7): 1236-1241. (in Chinese))
- [26] 王欢,李栋梁,蒋元春. 1956—2012年黄河源区流量演变的新特征及其成因[J]. 冰川冻土, 2014, 36(2): 403-412. (WANG Huan, LI Dongliang, JIANG Yuanchun. Characteristics and reasons of the runoff variation in source regions of the Yellow River during 1956-2012 [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(2): 403-412. (in Chinese))
- [27] 蒋冲,李芬,高艳妮,等. 1956—2012年三江源区河流流量变化及成因[J]. 环境科学研究, 2017, 30(1): 30-39. (JIANG Chong, LI Fen, GAO Yanni, et al. Streamflow variation in the Three-River Headwaters region during 1956-2012 [J]. Research of Environmental Sciences, 2017, 30(1): 30-39. (in Chinese))
- [28] 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 Jianyun, LIU Jiufu, JIN Junliang, 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))
- [29] LI Zhiwei, GAO Peng. Impact of natural gullies on groundwater hydrology in the Zoige peatland, China [J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2019, 21: 25-39.
- [30] LUO Dongliang, JIN Huijun, JIN Xiaoying, 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.
- [31] 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 Ruergai Plateau, China [J]. Journal of Natural Resources, 2006, 21(5): 810-818. (in Chinese))
- [32] 游宇驰,李志威,黄草,等. 1990—2016年若尔盖高原荒

- 漠化时空变化分析[J]. 生态环境学报, 2017, 26(10): 1671-1680. (YOU Yuchi, LI Zhiwei, HUANG Cao, et al. Spatial-temporal evolution characteristics of land desertification in the Zoige Plateau in 1990-2016 [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2017, 26(10): 1671-1680. (in Chinese))
- [33] LAN Yongchao, ZHAO Guohui, ZHANG Yaonan, et al. Response of runoff in the source region of the Yellow River to climate warming [J]. Quaternary International, 2010, 226: 60-65.
- [34] CHEN Huai, YANG Gang, PENG Changhui, et al. The carbon stock of alpine peatlands on the Qinghai-Tibetan Plateau during the Holocene and their future fate [J]. Quaternary Science Reviews, 2014, 95: 151-158.
- [35] LI Zhiwei, GAO Peng, YOU Yuchi. Characterizing hydrological connectivity of artificial ditches in Zoige peatlands of Qinghai-Tibet Plateau [J]. Water, 2018, 10(10): 1364.
- [36] LI Zhiwei, WANG Zhaoyin, BRIERLEY G, et al. Shrinkage of the ruergai swamp and changes to landscape connectivity, Qinghai-Tibet Plateau [J]. Catena, 2015, 126: 155-163.
- [37] 鲁瀚友, 李志威, 胡旭跃. 基于 VMOD 模型的若尔盖泥炭沼泽地下水数值模拟 [J]. 生态与农村环境学报, 2019, 35(4): 442-450. (LU Hanyou, LI Zhiwei, HU Xuyue. Numerical simulation of local peatland groundwater in the Zoige Plateau using the Visual MODFLOW [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2019, 35(4): 442-450. (in Chinese))
- [38] LI Zhiwei, GAO Peng, LU Hanyou. Dynamic changes of groundwater storage and flows in a disturbed alpine peatland under variable climatic conditions [J]. Journal of Hydrology, 2019, 575: 557-568.
- [39] 税伟, 白剑平, 简小枚, 等. 若尔盖沙化草地恢复过程中土壤特性及水源涵养功能 [J]. 生态学报, 2017, 37(1): 277-285. (SHUI Wei, BAI Jianping, JIAN Xiaomei, et al. Changes in water conservation and soil physicochemical properties during the recovery of desertified grassland in Zoige, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(1): 277-285. (in Chinese))
- [40] 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))
- [41] BALLARD C E, MCLNTYRE N, WHEATER H S. Hydrological modelling of drained blanket peatland [J]. Journal of Hydrology, 2011, 407: 81-93.
- [42] LI Zhiwei, GAO Peng. Characterizing spatially variable water table depths in a disturbed Zoige peatland watershed [J]. Journal of Hydro-environment Research, 2020, 29: 70-79.
- [43] 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.
- [44] LI Binqun, YU Zhongbo, LIANG Zhongmin, 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.
- [45] CHENG Guodong, ZHAO Lin, LI Ren, et al. Characteristic, changes and impacts of permafrost on Qinghai-Tibet Plateau [J]. Chinese Science Bulletin, 2019, 64(27): 2783-2795.
- [46] 王生廷, 盛煜, 曹伟, 等. 基于地貌分类的黄河源区多年冻土层地下冰储量估算 [J]. 水科学进展, 2017, 28(6): 801-810. (WANG Shengting, SHENG Yu, CAO Wei, et al. Estimation of permafrost ice reserves in the source area of the Yellow River using landform classification [J]. Advances in Water Science, 2017, 28(6): 801-810. (in Chinese))
- [47] CHENG Guodong, JIN Huijun. Permafrost and groundwater on the Qinghai-Tibet Plateau and in northeast China [J]. Hydrogeology Journal, 2013, 21(1): 5-23.
- [48] 罗栋梁, 金会军, 吕兰芝, 等. 黄河源区多年冻土活动层和季节冻土冻融过程时空特征 [J]. 科学通报, 2014, 59(14): 1327-1336. (LU Dongliang, JIN Huijun, LYU Lanzhi, et al. Temporal and spatial characteristics of freezing and thawing process of permafrost active layer and seasonal frozen soil in the source region of the Yellow River [J]. Chinese Science Bulletin, 2014, 59(14): 1327-1336. (in Chinese))
- [49] SHENG Yu, MA Shuai, CAO Wei, et al. Spatiotemporal changes of permafrost in the headwater area of the Yellow River under a changing climate [J]. Land Degradation & Development, 2020, 31(1): 133-152.
- [50] 彭轩明, 吴青柏, 田明中. 黄河源区地下水位下降对生态环境的影响 [J]. 冰川冻土, 2003(6): 667-671. (PENG Xuanming, WU Qingbai, TIAN Mingzhong. The effect of groundwater table lowering on ecological environment in the headwaters of the Yellow River [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003(6): 667-671. (in Chinese))
- [51] LUO Dongliang, JIN Huijun, BENSE V F, et al. Hydrothermal processes of near-surface warm permafrost in response to strong precipitation events in the headwater area of the Yellow River, Tibetan Plateau [J]. Geoderma, 2020, 376: 114531.
- [52] MA Qiang, JIN Huijun, BENSE 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.

(收稿日期: 2021-11-22 编辑: 骆超)