

## 西北内陆河流域水循环和生态演变与功能保障机制研究

陈喜, 黄日超, 黄峰, 刘秀强, 张阳阳, 张润润

### A comprehensive study of the maintaining mechanisms for hydrological cycle and ecological evolution and function in the northwest inland river basins of China

CHEN Xi, HUANG Richao, HUANG Feng, LIU Xiuqiang, ZHANG Yangyang, and ZHANG Runrun

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202203018>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 基于地表水循环遥感观测的黑河流域水平衡分析

Water balance analysis based on remote sensing observation of surface water cycle in the Heihe River watershed

闫柏琨, 李文鹏, 甘甫平, 郑跃军, 祁晓凡, 白娟, 郭艺, 吴艳红, 王龙凤, 马燕妮 水文地质工程地质. 2022, 49(3): 44-56

#### 西北地区地下水水量-水位双控指标确定研究——以民勤盆地为例

A study of the determination of indicators of dual control of groundwater abstraction amount and water table in northwest China: a case study of the Minqin Basin

王晓玮, 邵景力, 王卓然, 崔亚莉, 张秋兰 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 17-24

#### 永定河生态补水的地下水位动态响应

Response of groundwater regime to ecological water replenishment of the Yongding River

胡立堂, 郭建丽, 张寿全, 孙康宁, 杨郑秋 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 5-11

#### 黑河流域中游盆地地表水与地下水转化机制研究

Study on the conversion mechanism of surface water and groundwater in the middle reaches of the Heihe River Basin

祁晓凡, 李文鹏, 崔虎群, 康卫东, 刘振英, 邵新民 水文地质工程地质. 2022, 49(3): 29-43

#### 吉林省西部潜水资源与生态环境风险分析

Assessment of resources and ecological risks induced by groundwater utilization in the unconfined aquifer in the western Jilin Province: A case study in the Taoer River catchment

查恩爽, 肖霄 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 36-43

#### 柴达木盆地生态植被的地下水阈值

Groundwater threshold of ecological vegetation in Qaidam Basin

党学亚, 卢娜, 顾小凡, 金晓媚 水文地质工程地质. 2019, 46(3): 1-1



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202203018

陈喜, 黄日超, 黄峰, 等. 西北内陆河流域水循环和生态演变与功能保障机制研究 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(5): 12-21.  
CHEN Xi, HUANG Richao, HUANG Feng, *et al.* A comprehensive study of the maintaining mechanisms for hydrological cycle and ecological evolution and function in the northwest inland river basins of China[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(5): 12-21.

## 西北内陆河流域水循环和生态演变与 功能保障机制研究

陈喜<sup>1,2,3,4</sup>, 黄日超<sup>1,2,3</sup>, 黄峰<sup>4</sup>, 刘秀强<sup>1,2,3</sup>, 张阳阳<sup>1,2,3</sup>, 张润润<sup>4</sup>

(1. 天津大学地球系统科学学院, 天津 300072; 2. 天津大学表层地球系统科学研究院, 天津, 300072;  
3. 天津市环渤海关键带科学与可持续发展重点实验室, 天津 300072; 4. 河海大学水文水资源与水利  
工程科学国家重点实验室, 江苏南京 210098)

**摘要:** 在气候变化、生态保护以及水资源调控影响下, 西北内陆河流域水循环和生态环境状态发生了显著改变, 迫切需要解答气候变化对植被恢复和产水量的影响, 调水和压采等措施下地下水水位动态、管控指标及其对生态环境的维持机制。为此, 文章阐述了内陆河流域气候-植被-土壤-水文相互作用机理以及上中下游演变状况。针对上游产区, 提出了山区气候变化下植被和水文动态演变模拟和预测方法, 得出石羊河上游山区气候暖湿趋势和植被水分利用效率的提高, 可降低植被恢复对增加蒸腾量、减少产水量的影响程度; 但如未来继续升温, 水分利用效率提高的正效应将被植被恢复增加的水分消耗抵消, 从而减小径流量。针对中下游绿洲-荒漠过渡区, 通过分析荒漠植被-土壤(水盐)-地下水作用机理, 提出了西北干旱区生态地下水水位埋深和生态需水量确定方法及阈值, 得出荒漠植被适宜和极限生态地下水水位埋深的平均值分别为 2.9 m 和 5.5 m, 对应埋深下的单位面积荒漠植被生长季平均蒸腾耗水量为 0.08 ~ 0.10 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>。针对尾间湖区, 建立生态输水量与尾间湖地下水水位、生态指标之间关系, 提出了石羊河流域尾间湖生态输水优化方案, 得出青土湖生态输水量应提高至 0.45×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>/a。在流域层面, 采用水资源-社会经济-生态环境协调的系统分析手段, 提出了石羊河流域满足地下水均衡、供需平衡和生态功能的多水源调控方案, 即“保田增林”或“以田换林”方案。

**关键词:** 内陆河流域; 水循环; 生态地下水水位; 生态输水; 水资源配置

中图分类号: P641.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2022)05-0012-10

## A comprehensive study of the maintaining mechanisms for hydrological cycle and ecological evolution and function in the northwest inland river basins of China

CHEN Xi<sup>1,2,3,4</sup>, HUANG Richao<sup>1,2,3</sup>, HUANG Feng<sup>4</sup>, LIU Xiuqiang<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Yangyang<sup>1,2,3</sup>,  
ZHANG Runrun<sup>4</sup>

(1. School of Earth System Science, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Institute of Surface-Earth System Science, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 3. Tianjin Key Laboratory of Earth Critical Zone Science and Sustainable Development in Bohai Rim, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 4. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China)

收稿日期: 2022-03-06; 修订日期: 2022-04-18

投稿网址: [www.swdgedz.com](http://www.swdgedz.com)

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0406101); 国家自然科学基金联合基金项目(U21A2004)

第一作者: 陈喜(1964-), 男, 博士, 教授, 主要从事地表和地下水模拟、生态水文等研究。E-mail: [xi\\_chen@tju.edu.cn](mailto:xi_chen@tju.edu.cn)

**Abstract:** In recent decades, the hydrological cycle, ecology and environment of the inland river basins in northwest China have been significantly changed due to climate change and implementations of the ecological protection and water division projects. It is necessary to investigate how climate change affects vegetation restoration and runoff generation, and how groundwater table variation and its controlling index maintain ecology and environment under the inter-basin water diversion and reduction of groundwater withdrawal. In this study, we illustrate the mechanism of climate-vegetation-soil-hydrology interactions and their evolutions in the upper, middle and lower reaches of the catchments. For the upper reaches, we propose a method of simulation and prediction of mountain vegetation and hydrological changes under climate warming and wetting. When the method is applied in the Shiyang River basin, the results demonstrate that increase of efficient water use can reduce vegetation recover induced evaporation (thus runoff reduction). In the oasis-desert transition areas of the middle and lower reaches, we analyze desert vegetation-soil (moisture and salt)-groundwater interactions, and propose methods to determine critical values of the ecological groundwater depth and water requirement. For the terminal lake, we establish the relationships among ecological water division, groundwater table and ecological index. These relationships are used to optimize the schemes of ecological water division. In the whole inter-basin, we apply a system analysis approach of water resources-economic and social development-ecological and environment processes to obtain the schemes of the multi-water source allocations in the Shiyang River basin. These schemes can maintain groundwater withdrawal and recharge balance, water requirement and supply balance and ecological functions.

**Keywords:** inland river basin; hydrological cycle; ecological groundwater table; ecological water division; water resource allocation

西北内陆河流域深居欧亚大陆腹地, 地域辽阔, 总面积为  $2.51 \times 10^6 \text{ km}^2$ , 约占全国土地面积的 26%, 是我国水资源短缺最严重的地区之一, 也是生态极端脆弱区之一<sup>[1]</sup>。内陆河流域四周被高山、高原所围绕, 形

成了干旱地带独特的水循环系统, 降水、地表径流和地下水具有显著的地带性分异规律, 呈现为上游山区径流形成区、山前平原地表水与地下水转化区以及中下游绿洲平原水源消耗区<sup>[2-4]</sup>(图 1)。

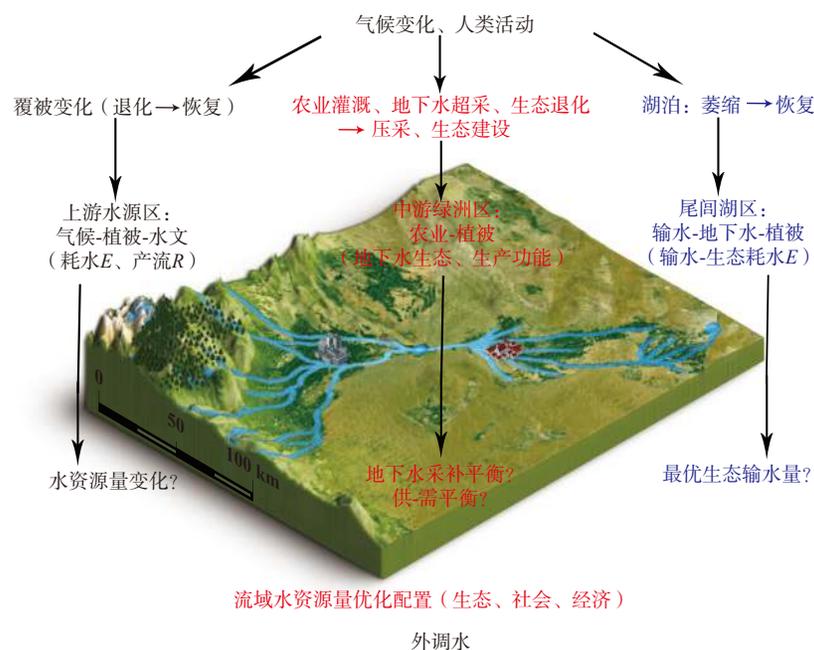


图 1 内陆河流域上、中、下游面临的问题概化图

Fig. 1 Generalized map of the problems faced by the upper, middle and lower reaches of an inland river basin

西北内陆河流域上游均为高大山区,如昆仑山、天山、阿尔泰山、祁连山等,气象、水文、植被生态系统垂直分带明显。海拔 4 000 m 以上的高山带发育有冰川,降水充沛,形成降水径流和季节性积雪、冰川融水径流;高海拔至低海拔的山前地带分布高山草甸带、亚高山草甸带、山前森林带、山地草原带、沟谷草甸带以及山前荒漠草原带,由此形成独特的生态水文分带特征<sup>[5]</sup>。近百年来,气候和人类活动发生了显著变化。气温的不断升高导致冰川融化加速、冰川退缩,在冰川融雪补给径流比例较大的流域径流显著增加<sup>[6]</sup>,而冰川退缩和消失也可导致山区失去冰川融水的补给作用;降水在 20 世纪 90 年代由偏枯向偏丰转变,至 20 世纪 90 年代河流出口径流量总体呈现下降后再上升的 V 型变化<sup>[7]</sup>。在气候变化和植树造林等生态恢复措施下,21 世纪以来,植被由退化向显著恢复转变,由此植被蒸腾增加,产水量降低,进而影响中下游可利用水资源量。由于山区气候-下垫面(冰雪、冻土、寒漠、草地、森林等)-水文(蒸散发、径流等)变化十分复杂且存在互馈关系,虽然不同学科对气候、生态和水文演变做了大量研究,但仍缺乏对高山区“气候-下垫面(植被、土壤等)-水文”的互馈机理及其演变的水资源效应研究。

从内陆河出口至中下游荒漠边缘,分布有人工绿洲、内陆河平原沿河岸形成的非地带性生态群落;在非地带性的绿洲生态与地带性的荒漠生态之间的过渡带,植被以中、低盖度草地为主;在盆地中心、河流尾间部位通常分布尾间湖,具有涵养水源、防风固

沙等功能。因此,西北内陆河中下游是一个集人工绿洲、草地、林地、湖泊湿地的复合生态系统<sup>[8-9]</sup>。由于降水稀少,中下游生态系统依赖上游山前潜流和河流输送补给的地下水维持其结构和功能,称之为依赖地下水的陆面生态系统(Groundwater Dependent Terrestrial Ecosystems, GDTEs)<sup>[10]</sup>,且 GDTEs 受强烈的人类活动影响。例如,在无人类干扰或干扰程度小的自然状态下,上游山区来水入渗形成范围较大的地下潜流带,潜流带 GDTEs 可维持高覆盖的植被(自然绿洲);远离潜流带,随着地下水水位逐渐下降,GDTEs 功能逐渐降低,形成中低覆盖且以耐旱性强的荒漠植被为主的荒漠过渡带。由此 GDTEs 形成自然生态保护屏障。但在经历长期气候干化、人工绿洲扩张,地下水超采形成区域降落漏斗,GDTEs 维持的自然绿洲和过渡带逐步消失,生态系统退变初期呈现以植被覆盖度降低为标志的“渐变”,逐步向以植被群落退化为标志的“质变”和沙漠化等灾害的“灾变”转变,导致严重的生态环境问题(图 2)。同时绿洲扩张和灌溉改变了原有土壤盐分平衡,局部地区土壤次生盐碱化<sup>[11]</sup>。因此从生态水文视角以及水资源管理需求,GDTEs 研究涉及“大气-植被-土壤-地下水”的互馈关系以及 GDTEs 指标(如生态地下水水位)。

从整个流域尺度上,需要综合考虑上游产水和跨流域调水与中下游耗水之间的平衡,协调生态-水资源-社会经济之间的关系;受强烈人类活动影响的中下游 GDTEs 还涉及含水层采补平衡和地表水与地下水资源量调控方式(图 1)。21 世纪以来,西北内陆河流

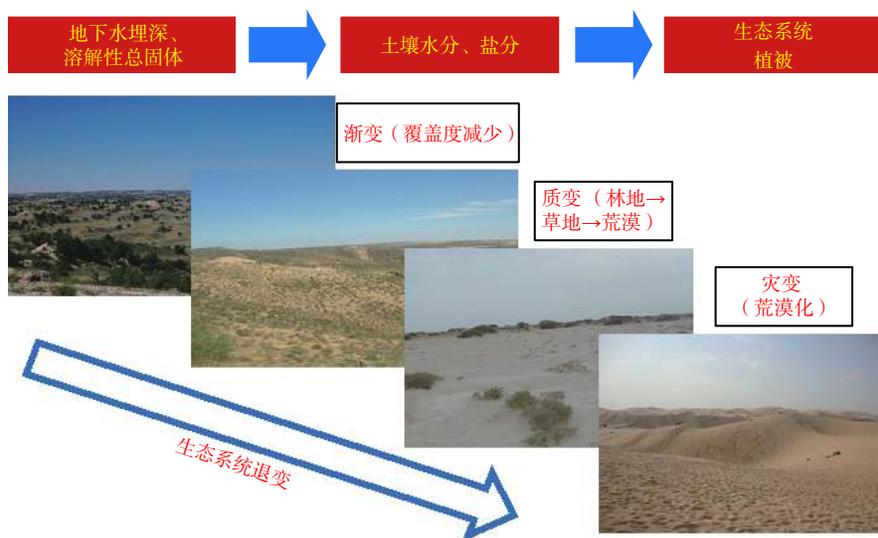


图 2 西北干旱区地下水水位下降导致的生态退变

Fig. 2 Ecological degradation caused by the decline in groundwater level in the arid region of northwest China

域水资源管理实践取得显著成效。生态调水工程、节水、地下水压采等水资源管理措施以及退耕还林的实施,水资源格局、地下水动态和生态环境状态发生新的变化,植被覆盖率增加显著,绿洲地下水水位下降趋势得以遏制,尾间湖水面增加<sup>[12-13]</sup>。但由于西北地区降水量稀少,水资源短缺,生产用水与生态用水之间矛盾长期存在,大范围恢复地下水水位难度极大,植被恢复的长期稳定性及演变趋势仍不明确。

为此,本文基于国家重点研发计划项目“我国西部特殊地貌区地下水开发利用与生态功能保护”课题1研究成果(2017YFC0406101),针对内陆河流域上、中、下游水循环与生态退化的历史演变以及新形势下面临的问题,从“大气-植被-土壤-地下水”的作用机理以及水资源与生态、社会相协调的机制和平衡分析,系统总结相关研究方法和成果,并以石羊河流域等为例加以剖析和定量分析,预测气候暖湿背景下上游植被和水文演变趋势,提出中下游维持绿洲植被的生态地下水水位埋深、生态需水量和生态输水方案,以及整个流域水均衡和生态功能保障措施。

## 1 西北内陆河流域水循环和生态演变

### 1.1 上游山区大气-植被-水文互馈机理及径流演变预测

流域内不同下垫面之间水分在土壤-植被-大气之间的循环过程机制及其在水文过程中作用的定量研究面临诸多挑战<sup>[14]</sup>。在干旱缺水的西北地区,其关注重点是上述要素演变对径流演变的影响。目前研究大多采用历史统计分析方法或水文模型分析气候和下垫面变化对径流的影响。如根据降水-径流关系,得出西北地区气候暖湿化背景下出山径流量与降水变化趋势较为一致<sup>[15]</sup>;基于观测资料和水平衡模型解析干旱区内陆河植被变化对产流影响<sup>[16-17]</sup>,总体来看,草地对山区径流的贡献较森林要大得多<sup>[14]</sup>。

以往气候-水文-植被动态研究大都孤立其中某些过程或要素进行分析。例如,采用水文模型量化气候和植被对径流影响,研究中植被参数设置为静态或根据遥感数据等得出历史植被动态指数作为模型输入或状态变量。但该研究方法不足以反映气候-水文-植被动态之间相互作用机制<sup>[18-20]</sup>。丁永建等<sup>[14]</sup>研究表明,植被的蒸散可增强山区不同水文单元内的循环及不同水文单元之间的水汽输送和交换。同时,气候干湿变化会通过土壤水分状态变化影响植被动态。

近年来,耦合大气和陆表过程的地球系统模式研

究取得了长足进步<sup>[21]</sup>。在大气-植被-水文互馈机理模型方面,基于碳水耦合机理建立的动态植被模型(如Lund-Potsdam-Jena Dynamic Global Vegetation Model, LPJ),增强了水文过程与植被动态之间的反馈及其对气候变化的响应机制,可应用于综合模拟和预测气候变化(大气CO<sub>2</sub>、温度升高和降水变化)对植被动态(如植被覆盖率、叶面积指数等)、水文(蒸散发和径流等)影响,并已在全球气候变化对植被水分利用效率、植被耗水以及陆地植被碳源、碳汇等方面取得了一系列新的认识<sup>[22-25]</sup>。此外,通过增强LPJ模型中地形、水系、冻土等下垫面特征对水分、能量再分配功能,提高了该类模型对流域水文与植被动态的模拟能力<sup>[24,26-28]</sup>。

西北干旱区植被恢复和实际蒸散发量增加可能导致产水量和可利用水资源量减少,这是生态恢复措施实施十分关注的问题。以往研究大多忽略大气CO<sub>2</sub>浓度、气温升高促进植被光合作用的同时会提高植被水分利用效率,从而能够降低植被恢复增加的蒸腾消耗。在石羊河流域上游山区,通过优化LPJ模型中植被、水平衡参数,模拟和预测历史和未来气候变化下植被-水文演变,得出1979—2018年大气CO<sub>2</sub>浓度升高(从0.033 53%增加到0.039 55%)、气候暖湿趋势下净初级生产力(NPP)显著增加,由此实际蒸散发量*E*增加,但植被水分利用效率(*WUE*)增加更为显著,因此,植被恢复增加的水分消耗对径流量影响较小。在未来气候变化(CMIP6的3种情景:SSP1-26、SSP2-45和SSP5-85)条件下预测:2021—2040年气候变化下(CO<sub>2</sub>浓度增加17.8%~23.8%、气温升高1.9~2.2℃,降水增加-0.2%~1.6%),植被恢复(NPP增加14.4%~19.5%)增加的蒸散发量(4.4%~5.3%),小于*WUE*显著增大(9.9%~14.3%)降低的蒸散发量,因此径流量*R*还略有增加(0.5%~4.8%);但在2041—2060年随着大气CO<sub>2</sub>浓度、气温进一步升高(分别增加22.3%~50%、2.3~3.6℃),即便降水增加(2.4%~4.1%),植被进一步恢复(NPP增加32.2%~50.2%),增加的实际蒸散发量*E*(7%~9.0%)大于*WUE*增大(23.1%~38.5%)降低的蒸散发量,将可能导致径流量减小2.7%~11.0%;且气候变化导致上游山区NPP、*E*和*WUE*高值将随海拔上移<sup>[29]</sup>。

高寒山区气候-水文-植被的相互作用及其对产流量影响还受到冰川和积雪融化、冻土冻结和消融影响。如石羊河的西营河子流域,冰川融水径流补给较

大<sup>[30]</sup>, 模拟时不考虑冰川消融补给和冻土的影响, 径流相对误差可以达到-21%。冰川和冻土冻融还影响植被根系层水量, 进而影响植被生长和蒸散发量; 同时, 覆被状态变化也通过改变陆表水热条件影响冰川和冻土冻融过程以及产水量。因此, 在更大尺度上将气候、土壤(冻融)、水文、植被动态耦合是提高多要素相互作用机理认识以及降低模型模拟和预测结果不确定性的途径。

## 1.2 中下游大气-植被-土壤-地下水作用机理及 GDTEs 控制阈值

解析中下游人类活动影响下大气-植被-土壤-地下水协同演变的效应, 是认识生态环境演变机理的途径。在荒漠植被区、人工绿洲和湖泊区又可分别表述为“大气-(荒漠)植被-土壤-地下水”、“灌溉-作物-土壤-地下水”系统和“湖泊-(水生、旱生)植被-地下水”系统。无论哪个类型系统, 地下水都对陆表植被、作物和湖泊具有重要控制作用。为此, 水资源管理部门提出了地下水水位、水量“双控”指标。

从 GDTEs 角度, 由于降水稀少, 荒漠植被区“双控”指标取决于根系层土壤(质地、水分和含盐量)、植被(类型和年龄、根系伸展深度)以及地下水动态(埋深、溶解性总固体)之间的关系, 是确定维持植被生长和防止土壤盐渍化的生态地下水水位埋深的依据<sup>[31]</sup>。在人工绿洲区, 由于长期超采地下水形成的大范围降落漏斗, 大部分地区已失去 GDTEs 功能, 推进“灌溉-作物-土壤-地下水”系统向“(地表水、地下水)灌溉-作物/植物-土壤”系统演化, 这就需要确定其生态耗水量和需水量。在尾间湖区, “湖泊-(水生、旱生)植被-地下水”系统从自然河流输水演变为人工生态输水下入渗水形成的湖泊周边 GDTEs 功能, 由此需要确定最优的生态输水过程(输水量和输水时间)和调控方式。

西北干旱区荒漠植被的生态地下水水位埋深研究较多, 主要研究方法有: 直接测定法<sup>[32]</sup>、遥感解译法<sup>[33]</sup>、同位素分析法<sup>[34]</sup>、水文模型法<sup>[35]</sup>。笔者<sup>[36]</sup>通过系统收集我国西北干旱、半干旱荒漠区近 30 年不同荒漠植被类型的地下水水位埋深、根系土壤特征和含水率以及气象资料, 采用“元分析”方法得出西北地区荒漠植被适宜和极限生态地下水水位埋深的平均值分别为 2.9 m 和 5.5 m, 维持生态丰富度和多样性其控制范围分别为 2.3 ~ 3.9 m 和 4.0 ~ 7.2 m。当地下水水位埋深逐渐增大时, 浅根系的草本植物生长首先受到胁迫, 其次为深根系的灌木和乔木; 且植被生长状况

与地下水水位埋深变化速率有依存关系。通过分析石羊河尾间青土湖生态输水渠系、湖水、土壤水和地下水水化学和同位素, 得出维持水生(芦苇)和荒漠典型植被(如白刺)生长的土壤含水量分别不低于 20%、10%, 且表土含盐量分别不超过 2 g/kg 和 6 g/kg 临界指标; 青土湖周边适宜地下水水位埋深: 水生植物为 1.15 ~ 1.40 m, 远离湖边的荒漠植被区为 2.37 ~ 4.55 m, 在中间盐碱化严重地区控制潜水蒸发的极限埋深为 1.60 ~ 1.85 m<sup>[37-38]</sup>。

在荒漠植被生态耗水量和需水量方面, 干旱区单株荒漠植物蒸腾耗水量和植物群落耗水量观测和计算方法较多<sup>[39-40]</sup>。其中, 单株植物蒸腾耗水量分析方法主要有: 整容器法、快速称重法、液流法(热脉冲、热扩散、热平衡)。植物群落耗水量是特定流域内的植物在一定时间内蒸腾耗水总量, 其主要计算方法有: 水量平衡法、微气象法、红外遥感法<sup>[40]</sup>。近年来, 通过研究植物生理特征参数(如气孔导度)与土壤水分及其受地下水水位(毛细上升带)和气象条件影响机理, 发展了植物蒸腾耗水量模型, 包括经验模型(如 Jarvis 模型)和半经验模型(如 Ball-Woodrow-Berry BWB 模型)<sup>[41]</sup>。笔者<sup>[42]</sup>采用气孔导度模型(Tardieu-Davies 模型)<sup>[43]</sup>估算出西北干旱区 8 种荒漠植物(梭梭、盐节木、罗布麻、白刺、芦苇、柽柳、胡杨和红砂)生长季(4—9 月)在适宜和极限生态地下水水位埋深下, 平均蒸腾耗水量分别为 793 mm 和 611 mm。其中, 芦苇生长季的蒸腾量最大, 梭梭的最小。由适宜生态地下水水位埋深增大为极限埋深时, 随着供水条件的下降, 植物生长季耗水量平均减少 27%。耐旱性强的梭梭、白刺蒸腾量减幅大(51%、35%), 耐旱性弱的芦苇、柽柳蒸腾量减幅小(18%、13%)。虽然在 GDTEs(适宜—极限地下水水位埋深)功能支撑下单株植被蒸腾耗水量大, 但当 GDTEs 功能下降或消失时, 植被覆盖率将显著下降, 区域植物耗水量随之减小。例如根据遥感数据估算, 黑河流域 2019 年 5—9 月荒漠植被覆盖率仅为 0.17, 由此得出黑河流域荒漠植被区(面积为  $14.2 \times 10^4 \text{ km}^2$ ) 在 2 种生态地下水水位埋深下总耗水量为  $106 \times 10^8 \sim 128 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 转换为单位面积荒漠植被生长季蒸腾耗水量为  $0.08 \sim 0.10 \text{ m}^3/\text{m}^2$ , 其中白刺、柽柳和梭梭耗水量依次为  $3.6 \times 10^8 \sim 5.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $11.0 \times 10^8 \sim 12.6 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $0.7 \times 10^8 \sim 1.4 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。该值略大于遥感数据(PML\_V2 模型)估算的黑河流域荒漠植被同期蒸腾耗水量( $0.07 \text{ m}^3/\text{m}^2$ )以及荒漠区生长期降水量(81 mm), 说明地下水对荒漠植被作用较弱, 区域植被生长可能

已转化为主要依赖稀少的降水。

在内陆河尾间湖区,“湖泊-(水生、旱生)植被-地下水”系统涉及到生态输水量和输水时间对湖泊水体、湖周边入渗水以及地下水水位和水质影响,并由此确定 GDTEs 指标或目标。一种研究途径是基于历史生态输水量、陆表覆被遥感解译、湖泊面积、地下水水位和溶解性总固体等信息拟合外推,得出恢复 GDTEs 及实现规划的生态恢复目标的生态输水量。另一种研究途径是建立生态输水影响区内湖泊、地下水、荒漠植被单元水量平衡模型或数值计算模型以及 GDTEs 功能函数,以单位输水量的水资源利用效率、生态效益最大作为目标进行优化。针对石羊河尾间湖一青土湖绿洲生态恢复目标,笔者<sup>[12]</sup>构建了基于途径二的生态水文模型,设置 2010 年以来 24 种生态输水情境,计算未来 20 年绿洲恢复达到稳定状态下的地下水水位埋深、绿洲面积、绿洲归一化植被指数 (NDVI),优化得出最理想的生态输水情形(以最小的绿洲蒸散损耗产生最大的生态用水效益),地下水水位埋深可恢复至 2.34 m、绿洲面积恢复至 29.16 km<sup>2</sup>、绿洲 NDVI 恢复至 0.41,相应地,青土湖生态输水量应提高至 0.45×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>/a。

大气-植被-土壤-地下水作用机理十分复杂且空间异质性高,目前已有荒漠植物生理特征参数、耗水量以及影响要素(土壤、地下水、大气等)的观测和分析还缺乏代表性,需要加强对不同类型植物多要素的观测和机理研究。目前,在区域尺度上建立的植被耗水、土壤水、地表水与地下水耦合模型并应用于实际,其模拟和预测结果仍存在较大不确定性。

## 2 流域水资源时空调控及生态功能保障

西北地区生态环境极为脆弱,生境条件相对恶劣,但在国家生态安全屏障方面承担着关键使命<sup>[44]</sup>。绿洲农业开发具有悠久历史,在保障我国西北地区政治、经济和军事安全方面具有重要作用。农业绿洲开发起到防风固沙、防治土壤盐碱化等作用,但绿洲水资源承载力较低,河流拦蓄、地下水超采导致下游河湖干枯,自然绿洲面积减少,土地沙化,进而又制约农业绿洲的发展。因此,需要研究水资源约束下人工和自然绿洲面积合理比例,形成功能不同的生态圈<sup>[45]</sup>,实现维护生态安全、促进地区经济发展的目标。

从水资源系统层面上,保障上游产水量满足中下游经济、社会发展用水和生态用水需求,涉及来水(地表水和地下水)动态模拟和预测,生态与社会经济需

水计算,以及工程措施调控和非工程措施(节水等)。需要采用大系统、多目标优化方法,在宏观层面优化水资源-经济-社会-生态之间配置方案;在精细化调控层面,根据供需动态变化,以实现地下水采补平衡、河湖生态恢复和促进经济的可持续发展目标,优化具体调水方案<sup>[46]</sup>。

笔者首先通过分析石羊河流域近 20 年水资源供、用、耗水空间格局及变化趋势,核定了农作物、牲畜、居民生活、工业生产、生态环境的用水定额及规模。然后,基于“干旱半干旱区地下水功能评价与区划理论方法”<sup>[47]</sup>确定的地下水生态功能保护区,以“生态-经济-社会”协同发展为目标,构建了水资源优化配置模型,分析不同供需情景,提出基于自然与人工调蓄于一体的林-地-水配置方案。得出实施《石羊河流域重点治理规划》以来,水资源利用效率提高显著、地下水超采状态得以遏制,民勤盆地已实现地下水采补平衡,但武威盆地地下水仍处于超采状态,基本生态面积占比距离规划目标仍有较大差距。对此需要进一步减少农业灌溉用水和调整农业、植被面积。一是采取“保田增林”,维持现状作物灌溉面积不变,降低灌溉定额(武威和民勤分别为 5 700 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> 和 5 370 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>);二是采取“以田换林”,压缩农业灌溉面积,减少灌溉用水量,节约的农业灌溉水量可满足增加耗水量低的荒漠植被面积。为实现石羊河流域地下水功能区划方案,宜在武威盆地东侧和腾格里沙漠交接带以及西北部荒漠过渡带增加林草面积,以增加武威盆地地下水适宜规模开采区、地下水适宜限量开采区林草面积。民勤盆地可在地下水控制开采区增加林草面积,以实现控制地下水超采、提升生态对地下水涵养功能的目的。

该研究现在还处于现状水资源宏观均衡分析和优化配置阶段,将整个流域上中游多模型模拟与多目标实时优化调控相结合,满足上游产水量预测预报、中下游水利工程调度和地下水“双控”管理实施需求,仍面临系统复杂性、预测预报不确定性以及调控指标动态性等一系列问题。

## 3 结论

针对我国西北内陆河流域上、中、下游水资源和生态环境演变,系统分析了大气-植被-土壤-水文(地下水)作用机理、GDTEs 控制阈值以及水资源优化调控,并在石羊河流域等加以应用和系统阐述,得出以下认识和结论:

(1)上游山区历经 20 世纪 80 年代以来气候暖湿化,植被恢复显著,蒸腾消耗水量增加,但由于降水增加和植被水分利用效率的提升,历史及未来 20 年对上游山区产水量影响较小,但远期持续升温 and 植被持续恢复,可能导致产水量下降。由于气候变化的不确定性以及大气-植被-水文互馈效应,需要在更长历史资料和大尺度上进一步研究降水、气温等周期性变化,覆被恢复增加的蒸腾水分对区域水循环的影响,以及气候、植被变化对冻土、入渗水调蓄等的影响。研究大气-植被-土壤-水文作用机理并进一步发展耦合模型,是提高上游山区水循环研究认识以及提高出山口径流模拟和预测精度的有效途径。

(2)中下游地区地下水下降趋势总体得到有效遏制,但由于水资源短缺,地下水水位难以短时段大规模恢复至生态地下水水位。通过生态输水、加大渠系和尾间湖周边入渗,并结合人工灌溉,局部地区荒漠植被及湖泊湿地恢复显著。但由于西北地区人工和自然植被、河湖等组成的生态系统极为复杂且脆弱,历史上长期生态退化导致一系列环境要素已发生改变(如土壤沙化),目前生态恢复措施能在多大程度上改善植被生态赖以生存的条件,维持其长期演变的稳定性还存在较大不确定性。因此,需要针对不同地区、不同生态类型系统研究大气-(荒漠)植被-土壤-地下水系统相互作用机理,及其受气候和人类活动影响下的演变趋势,并在此基础上确定水量、水位动态管控指标。

(3)内陆河地区水资源在抑制需求、增加供给、改善生态环境方面取得了显著成效。但应该认识到水资源-社会经济-生态环境之间矛盾依然突出,且长期共存。在有限的水资源支撑能力下,确定农业绿洲和自然绿洲面积合理比例,拓展绿洲生态圈功能,维护生态安全、促进地区经济社会可持续发展仍然是未来需要探索的问题。在加强对气候、生态、流域水循环自然演变规律认识的同时,系统分析不同历史阶段水资源调控决策、管理实践中取得的成效和存在的问题,提出科学管理指标、调控措施和应对策略,以实现区域水资源供给能力增强、生态环境逐步改善、社会经济可持续发展的目标。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] 耿雷华,黄永基,郦建强,等.西北内陆河流域水资源特点初析[J]. *水科学进展*, 2002, 13(4): 496 - 501. [ GENG Leihua, HUANG Yongji, LI Jianqiang, et al. Analysis on water resources characters of endorheic drainage in Northwest China[J]. *Advances in Water Science*, 2002, 13(4): 496 - 501. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 2 ] 高前兆, 仵彦卿. 河西内陆河流域的水循环分析[J]. *水科学进展*, 2004, 15(3): 391 - 396. [ GAO Qianzhao, WU Yanqing. Analysis of water cycle in inland river basins in Hexi Region[J]. *Advances in Water Science*, 2004, 15(3): 391 - 396. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 3 ] 祁晓凡, 李文鹏, 崔虎群, 等. 黑河流域中游盆地地表水与地下水转化机制研究[J]. *水文地质工程地质*, 2022, 49(3): 29 - 43. [ QI Xiaofan, LI Wenpeng, CUI Huqun, et al. Study on the conversion mechanism of surface water and groundwater in the middle reaches of the Heihe River Basin[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(3): 29 - 43. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 4 ] 李文鹏, 邵新民, 祁晓凡, 等. 黑河中游盆地南部山区地下水对平原区侧向径流补给量的估算[J]. *水文地质工程地质*, 2022, 49(3): 1 - 10. [ LI Wenpeng, SHAO Xinmin, QI Xiaofan, et al. Estimation of groundwater lateral flow in the southern mountainous area of the middle Heihe River Basin[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(3): 1 - 10. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 5 ] 程国栋, 肖洪浪, 徐中民, 等. 中国西北内陆河水问题及其应对策略——以黑河流域为例[J]. *冰川冻土*, 2012, 28(3): 406 - 413. [ CHENG Guodong, XIAO Hongliang, XU Zhongmin, et al. Water issue and its countermeasure in the inland river basins of Northwest China: A case study in Heihe River Basin[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, 28(3): 406 - 413. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 6 ] GAO X, YE B S, ZHANG S Q, et al. Glacier runoff variation and its influence on river runoff during 1961—2006 in the Tarim River Basin, China[J]. *Science China Earth Sciences*, 2010, 53(6): 880 - 891.
- [ 7 ] QIN J, LIU Y X, CHANG Y P, et al. Regional runoff variation and its response to climate change and human activities in Northwest China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(20): 1 - 14.
- [ 8 ] 贾文雄, 赵珍, 俎佳星, 等. 祁连山不同植被类型的物候变化及其对气候的响应[J]. *生态学报*, 2016, 36(23): 7826 - 7840. [ JIA Wenxiong, ZHAO Zhen, ZU Jiaying, et al. Phenological variation in different vegetation types

- and their response to climate change in the Qilian Mountains, China, 1982—2014[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(23): 7826 – 7840. (in Chinese with English abstract)
- [9] 李娟, 龚纯伟. 祁连山国家公园植被覆盖变化地形分异效应[J]. *水土保持通报*, 2021, 41(3): 228 – 237. [LI Juan, GONG Chunwei. Effects of terrain factors on vegetation cover change in National Park of Qilian mountains[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2021, 41(3): 228 – 237. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 孙自永, 王俊友, 葛孟琰, 等. 基于水稳定同位素的地下水型陆地植被识别: 研究进展、面临挑战及未来研究展望[J]. *地质科技通报*, 2020, 39(1): 11 – 20. [SUN Ziyong, WANG Junyou, GE Mengyan, et al. Isotopic approaches to identify groundwater dependent terrestrial vegetation: Progress, challenges, and prospects for future research[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2020, 39(1): 11 – 20. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 刘恒, 钟华平, 顾颖. 西北干旱内陆河区水资源利用与绿洲演变规律研究——以石羊河流域下游民勤盆地为例[J]. *水科学进展*, 2001, 12(3): 378 – 384. [LIU Heng, ZHONG Huaping, GU Ying. Water resources development and oasis evolution in inland river basin of arid zone of northwest China: A case study in Minqin basin of Shiyang river[J]. *Advances in Water Science*, 2001, 12(3): 378 – 384. (in Chinese with English abstract)]
- [12] HUANG F, OCHOA C G, CHEN X, et al. Modeling oasis dynamics driven by ecological water diversion and implications for oasis restoration in arid endorheic basins[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 593: 125774.
- [13] ZHANG Q, YANG J H, WANG W, et al. Climatic warming and humidification in the arid region of Northwest China: multi-scale characteristics and impacts on ecological vegetation[J]. *Journal of Meteorological Research*, 2021, 35(1): 113 – 127.
- [14] 丁永建, 张世强. 西北内陆河山区流域内循环过程与机理研究: 现状与挑战[J]. *地球科学进展*, 2018, 33(7): 719 – 727. [DING Yongjian, ZHANG Shiqiang. Study on water internal recycle process and mechanism in typical mountain areas of inland basins, northwest China: progress and challenge[J]. *Advances in Earth Science*, 2018, 33(7): 719 – 727. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 王玉洁, 秦大河. 气候变化及人类活动对西北干旱区水资源影响研究综述[J]. *气候变化研究进展*, 2017, 13(5): 483 – 493. [WANG Yujie, QIN Dahe. Influence of climate change and human activity on water resources in arid region of northwest China: An overview[J]. *Climate Change Research*, 2017, 13(5): 483 – 493. (in Chinese with English abstract)]
- [16] HE Z B, ZHAO W Z, HU L H, et al. Effect of forest on annual water yield in the mountains of an arid inland river basin: A case study in the Pailugou catchment on northwestern China's Qilian Mountains[J]. *Hydrological Processes*, 2012, 26(4): 613 – 621.
- [17] 何志斌, 杜军, 陈龙飞, 等. 干旱区山地森林生态水文研究进展[J]. *地球科学进展*, 2016, 31(10): 1078 – 1089. [HE Zhibin, DU Jun, CHEN Longfei, et al. Review on montane forest eco-hydrology in arid area[J]. *Advances in Earth Science*, 2016, 31(10): 1078 – 1089. (in Chinese with English abstract)]
- [18] GAO B, YANG D W, QIN Y, et al. Change in frozen soils and its effect on regional hydrology in the upper Heihe Basin, the northeast Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *The Cryosphere Discussions*, 2017: 1 – 55.
- [19] 陈腊娇, 朱阿兴, 秦承志, 等. 流域生态水文模型研究进展[J]. *地理科学进展*, 2011, 30(5): 535 – 544. [CHEN Lajiao, ZHU Axing, QIN Chengzhi, et al. Review of eco-hydrological models of watershed scale[J]. *Progress in Geography*, 2011, 30(5): 535 – 544. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 冯起, 尹振良, 席海洋. 流域生态水文模型研究和问题[J]. *第四纪研究*, 2014, 34(5): 1082 – 1093. [FENG Qi, YIN Zhenliang, XI Haiyang. Review and issues of eco-hydrological models of watershed scale[J]. *Quaternary Sciences*, 2014, 34(5): 1082 – 1093. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 周天军, 邹立维, 陈晓龙. 第六次国际耦合模式比较计划(CMIP6)评述[J]. *气候变化研究进展*, 2019, 15(5): 445 – 456. [ZHOU Tianjun, ZOU Liwei, CHEN Xiaolong. Commentary on the coupled model intercomparison project phase 6(CMIP<sub>6</sub>) [J]. *Climate Change Research*, 2019, 15(5): 445 – 456. (in Chinese with English abstract)]
- [22] GERTEN D, SCHAPHOFF S, HABERLANDT U, et al. Terrestrial vegetation and water balance—hydrological evaluation of a dynamic global vegetation model[J]. *Journal of Hydrology*, 2004, 286(1/2/3/4): 249 – 270.
- [23] PRENTICE I C, COWLING S A. Dynamic global

- vegetation models[C]//Encyclopedia of Biodiversity. Amsterdam: Elsevier, 2013: 670-689.
- [24] SCHAPHOFF S, VON BLOH W, RAMMIG A, et al. LPJmL4—a dynamic global vegetation model with managed land—Part 1: Model description[J]. *Geoscientific Model Development*, 2018, 11(4): 1343 – 1375.
- [25] SITCH S, SMITH B, PRENTICE I C, et al. Evaluation of ecosystem dynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ dynamic global vegetation model[J]. *Global Change Biology*, 2003, 9(2): 161 – 185.
- [26] LI Q L, ISHIDAIRA H. Development of a biosphere hydrological model considering vegetation dynamics and its evaluation at basin scale under climate change[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 412/413: 3 – 13.
- [27] PAPPAS C, FATICHI S, RIMKUS S, et al. The role of local-scale heterogeneities in terrestrial ecosystem modeling[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2015, 120(2): 341 – 360.
- [28] WANIA R, ROSS I, PRENTICE I C. Implementation and evaluation of a new methane model within a dynamic global vegetation model: LPJ-WHyMe v1.3. 1[J]. *Geoscientific Model Development*, 2010, 3(2): 565 – 584.
- [29] 黄日超. 内陆河流域上游植被-水文动态对气候变化的响应-以石羊河流域为例[D]. 南京: 河海大学, 2021. [HUANG Richao. Response of vegetation and hydrological dynamics to climate change in the upper of inland river basin: A case study of Shiyang River Basin[D]. Nanjing: Hohai University, 2021. (in Chinese with English abstract)]
- [30] 李佳芳. 石羊河上游—祁连山冷龙岭西营河流域同位素径流分割研究[D]. 兰州: 西北师范大学, 2017. [LI Jiafang. Isotope runoff segmentation of the xiyin river basin in the Lenglongling of the Qilian mountains[D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2017. (in Chinese with English abstract)]
- [31] 党学亚, 卢娜, 顾小凡, 等. 柴达木盆地生态植被的地下水阈值[J]. *水文地质工程地*, 2019, 46(3): 1 – 8. [DANG Xueya, LU Na, GU Xiaofan, et al. Groundwater threshold of ecological vegetation in Qaidam Basin[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2019, 46(3): 1 – 8. (in Chinese with English abstract)]
- [32] COOPER D J, SANDERSON J S, STANNARD D I, et al. Effects of long-term water table drawdown on evapotranspiration and vegetation in an arid region phreatophyte community[J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 325(1/2/3/4): 21 – 34.
- [33] 李小明, 宋冬梅, 肖笃宁. 石羊河下游民勤绿洲地下水矿化度的时空变异[J]. *地理学报*, 2005, 60(2): 319 – 327. [LI Xiaoyu, SONG Dongmei, XIAO Duning. The variability of groundwater mineralization in Minqin oasis[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2005, 60(2): 319 – 327. (in Chinese with English abstract)]
- [34] SONG L, ZHU J, LI M, et al. Sources of water used by *Pinus sylvestris* var. *mongolica* trees based on stable isotope measurements in a semiarid sandy region of Northeast China[J]. *Agricultural Water Management*, 2016, 164: 281 – 290.
- [35] LAIO F, TAMEA S, RIDOLFI L, et al. Ecohydrology of groundwater-dependent ecosystems: 1. Stochastic water table dynamics[J]. *Water Resources Research*, 2009, 45(5): W05419.
- [36] 张阳阳, 陈喜, 高满, 等. 基于元数据分析的西北干旱区生态地下水位埋深及其影响因素[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2020, 18(5): 57 – 65. [ZHANG Yangyang, CHEN Xi, GAO Man, et al. Meta-analysis of ecological depth to groundwater table and its influencing factors in arid region of northwest China[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2020, 18(5): 57 – 65. (in Chinese with English abstract)]
- [37] 刘秀强, 陈喜, 刘琴, 等. 西北干旱区尾间湖过渡带地面蒸发和潜水对土壤水影响的同位素分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2021, 35(6): 52 – 59. [LIU Xiuqiang, CHEN Xi, LIU Qin, et al. Variation of hydrogen and oxygen isotopes in soil water and soil water evaporation depth around Terminal Lake in arid region of Northwest China[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2021, 35(6): 52 – 59. (in Chinese with English abstract)]
- [38] 刘秀强, 陈喜, 张阳阳, 等. 青土湖土壤剖面盐分特征及其定量表述研究[J]. *干旱区研究*, 2020, 37(5): 1174 – 1182. [LIU Xiuqiang, CHEN Xi, ZHANG Yangyang, et al. Study on salt distribution characteristics and mathematical expression of the soil profile in Qingtu Lake[J]. *Arid Zone Research*, 2020, 37(5): 1174 – 1182. (in Chinese with English abstract)]
- [39] 陈永金, 陈亚宁, 薛燕. 干旱区植物耗水量的研究与进展[J]. *干旱区资源与环境*, 2004, 18(6): 152 – 158. [CHEN Yongjin, CHEN Yaning, XUE Yan. The progress and perspective of study on water consumption of vegetation in arid region[J]. *Journal of Arid Land Resources & Environment*, 2004, 18(6): 152 – 158. (in

- Chinese with English abstract ]
- [40] 石磊, 盛后财, 满秀玲, 等. 不同尺度林木蒸腾耗水测算方法述评[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2016, 40(4): 149 - 156. [ SHI Lei, SHENG Houcai, MAN Xiuling, et al. A review of the calculation method of water consumption by tree transpiration in different scales[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2016, 40(4): 149 - 156. (in Chinese with English abstract) ]
- [41] 高冠龙, 冯起, 刘贤德, 等. 三种经验模型模拟荒漠河岸柽柳叶片气孔导度[J]. 生态学报, 2020, 40(10): 3486 - 3494. [ GAO Guanlong, FENG Qi, LIU Xiande, et al. Simulating the leaf stomatal conductance of the desert riparian *Tamarix ramosissima* Ledeb based on three empirical models[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(10): 3486 - 3494. (in Chinese with English abstract) ]
- [42] 张阳阳, 陈喜, 高满, 等. 内陆干旱区典型旱生植物蒸腾耗水量模拟研究[J]. 生态学报, 2021, 41(19): 7751 - 7762. [ ZHANG Yangyang, CHEN Xi, GAO Man, et al. Simulation of transpiration for typical xeromorphic plants in inland arid region of Northwestern China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(19): 7751 - 7762. (in Chinese with English abstract) ]
- [43] TARDIEU F, SIMONNEAU T, PARENT B. Modelling the coordination of the controls of stomatal aperture, transpiration, leaf growth, and abscisic acid: update and extension of the Tardieu-Davies model[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2015, 66(8): 2227 - 2237.
- [44] 许静, 吴鑫悦, 李文龙. 区域尺度生态保护红线分区研究: 以我国西北地区为例[J]. 草业科学, 2021, 38(7): 1218 - 1230. [ XU Jing, WU Xinyue, LI Wenlong. Ecological conservation redline zoning at the regional scale: A case study of northwest China[J]. *Pratacultural Science*, 2021, 38(7): 1218 - 1230. (in Chinese with English abstract) ]
- [45] 陈怀顺, 赵晓英. 西北地区不同类型区生态恢复的途径与措施[J]. 草业科学, 2000, 17(5): 65 - 68. [ CHEN Huaishun, ZHAO Xiaoying. The approach and measures for ecological restoration in northwest China[J]. *Pratacultural Science*, 2000, 17(5): 65 - 68. (in Chinese with English abstract) ]
- [46] 陈乐. 石羊河流域面向生态的水资源优化配置研究[D]. 兰州: 西北师范大学, 2014. [ CHEN Le. Research on water resources optimal allocation of Shiyang River Basin in ecological[D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2014. (in Chinese with English abstract) ]
- [47] 王金哲, 张光辉, 崔浩浩, 等. 适宜西北内陆区地下水功能区划的体系指标属性与应用[J]. 水利学报, 2020, 51(7): 796 - 804. [ WANG Jinzhe, ZHANG Guanghui, CUI Haohao, et al. System index attribute and application of groundwater function zoning in northwest inland area of China[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2020, 51(7): 796 - 804. (in Chinese with English abstract) ]

编辑: 张若琳