

基于生态需水的黄河中游水平衡分析

刘 义, 史佩东, 刘 淼, 许凯然, 张 宁, 姜 鹏

Analysis of water balance in the middle reaches of the Yellow River based on ecological water demand: A case study on Qinhe River Basin

LIU Yi, SHI Peidong, LIU Miao, XU Kairan, ZHANG Ning, and JIANG Peng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202304043>

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

“水文地质与水资源调查计划”进展

Achievements of Investigation Program on Hydrogeology and Water Resources of CGS

李文鹏 水文地质工程地质. 2022, 49(2): 1-6

以色列依靠科技创新走出缺水困境的经验

Relying on science and technological innovation: Israel's experience of overcoming water shortage

秦同春 水文地质工程地质. 2022, 49(3): 192-197

基于GSFLOW的青土湖生态输水量-湖水面积关系研究

A study of the relationship between ecological water conveyance and water surface area of the Qingtu Lake based on GSFLOW

郭云彤, 周妍, 崔亚莉, 邵景力 水文地质工程地质. 2022, 49(5): 32-41

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



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202304043

刘义, 史佩东, 刘淼, 等. 基于生态需水的黄河中游水平衡分析——以沁河流域为例 [J]. 水文地质工程地质, 2024, 51(1): 30-40.
LIU Yi, SHI Peidong, LIU Miao, et al. Analysis of water balance in the middle reaches of the Yellow River based on ecological water demand: A case study on Qinhe River Basin [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(1): 30-40.

基于生态需水的黄河中游水平衡分析 ——以沁河流域为例

刘义^{1,2,3}, 史佩东^{1,2}, 刘淼^{1,2}, 许凯然^{1,2}, 张宁¹, 姜鹏⁴

(1. 中国地质调查局廊坊自然资源综合调查中心, 河北廊坊 065000; 2. 河北省高校生态环境地质应用技术研发中心, 河北石家庄 050031; 3. 中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京 100083; 4. 中国地质调查局自然资源综合调查指挥中心, 北京 100055)

摘要: 为推动黄河流域生态保护及高质量发展, 解决地表水资源供需矛盾, 亟需开展水平衡分析, 建立水平衡模型, 为水资源合理分配提供参考依据。作为黄河的重要支流, 沁河流域位于黄河中游末端, 由于近年来上游调水政策的施行以及流域内生活、生产用水的增加, 用水矛盾突出, 出现了河道断流、入黄水量偏枯等问题。为保障河流生态环境健康, 优化引沁入汾跨流域提水工程实施后的流域水资源供需平衡, 以 2021 年为现状年, 在“自然-人工”二元水循环研究理论的指导下, 运用水平衡分析理论与方法, 以河道内生态需水为保障基础, 对沁河流域水资源需求、供水能力与供需平衡进行了分析与讨论。结果表明: (1) 沁河流域水资源供给和需求在空间分布上具有分异性, 上游山西省境内各河段河道内均能够保障适宜的生态需水量, 下游河南省境内, 仅可满足最小生态需水量; (2) 沁河流域可供给水资源总量为 $10.04 \times 10^8 \text{ m}^3$, 河道外生产、生活及生态用水总量为 $8.89 \times 10^8 \text{ m}^3$, 剩余河道内水量仅为 $1.15 \times 10^8 \text{ m}^3$, 仅可满足河流最小生态需水; (3) 推算至 2030 年, 流域内工业生产及生活取用地表水量将达到 $6.98 \times 10^8 \text{ m}^3$, 河道外用水总量将达到 $9.81 \times 10^8 \text{ m}^3$, 剩余水量无法满足最小生态需水。建议采用降低工业用水量、提高农田灌溉用水利用率、推广使用高效节水技术, 进一步增强水资源的有效利用, 改善流域生态环境。研究结果可为合理规划沁河流域水资源调度提供参考, 也可为黄河中游水平衡分析提供范例。

关键词: 水资源; 生态需水; 供需平衡; 沁河; 需水预测; 黄河中游

中图分类号: P641.8

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2024)01-0030-11

Analysis of water balance in the middle reaches of the Yellow River based on ecological water demand: A case study on Qinhe River Basin

LIU Yi^{1,2,3}, SHI Peidong^{1,2}, LIU Miao^{1,2}, XU Kairan^{1,2}, ZHANG Ning¹, JIANG Peng⁴

(1. Langfang Center for General Survey of Natural Resources, China Geological Survey, Langfang, Hebei 065000, China; 2. Hebei Center for Ecological and Environmental Geology Research, Hebei GEO University, Shijiazhuang, Hebei 050031, China; 3. School of Engineering and Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 4. Natural Resources Comprehensive Survey Command Center, China Geological Survey, Beijing 100055, China)

收稿日期: 2023-04-01; 修订日期: 2023-06-17

投稿网址: www.swdzcgdz.com

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(DD20211573); 河北省高校生态环境地质应用技术研发中心开放研究基金项目(JSYF-202206)

第一作者: 刘义(1988—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事水工环地质综合调查及评价工作。E-mail: lyi@mail.cgs.gov.cn

通讯作者: 史佩东(1996—), 男, 本科, 工程师, 主要从事生态环境地质调查与评价工作。E-mail: shipeidong111@163.com

Abstract: Analysis of water balance in the middle reaches of the Yellow River is important for the effective water resources management, ecological protection, and high-quality development in the Yellow River Basin. The Qinhe River Basin, located at the end of the middle reaches of the Yellow River, has serious water problems, such as, river interruption and insufficient inflow into the Yellow River, due to the implementation of the upstream water diversion policy and the increase in domestic and industrial water use. To address the water problems, the water resource demand, water supply capacity, and supply-demand balance of the basin were analyzed based on the ecological water demand. The results show that (1) the spatial distribution of water supply and water demand in the Qinhe River basin is heterogeneous. All the upstream river reaches in the Shanxi Province are able to guarantee the ecological water demand in the river channel, while in the downstream Henan Province, only the minimum water demand can be met; (2) the total supplyable water resources in the Qinhe River basin is $10.04 \times 10^8 \text{ m}^3$, and the sum of industrial, domestic, and ecological water use outside the river channel is $8.89 \times 10^8 \text{ m}^3$. The remaining water in the river channel is only $1.15 \times 10^8 \text{ m}^3$, which can only meet the minimum ecological water demand; (3) the amount of surface water used by industrial production and life in the basin will be $6.98 \times 10^8 \text{ m}^3$ in 2030, and the total amount of water use will be $9.81 \times 10^8 \text{ m}^3$, resulting in that the remaining water cannot support the minimum ecological water demand. We pose five suggestions for the water problem in the Qinhe River Basin: Reducing the industrial water consumption, improving the water utilization rate of agricultural irrigation, promoting water conservation technologies with high effectiveness, and improving the ecological environment. This study can provide basic information for the effective water resources management in the Qinhe River basin.

Keywords: water resources; ecological water demand; balance between supply and demand; Qinhe River; water demand forecast; the middle reaches of the Yellow River

流域水资源供需平衡是生态系统健康的体现,一旦出现失衡不仅影响区域自然环境,而且制约社会经济发展。在自然-社会的二元循环过程中,社会发展和生态保护均需要水资源作为支撑,其有限性决定了二者之间必然存在竞争关系。通过自然供水及社会需水2方面分析流域水资源平衡状态是评价区域生态系统健康的有效研究方法^[1]。近年来,流域水平衡分析已成为研究热点。关于水平衡问题,很多学者都开展了相关研究^[2-8],闫柏琨等^[2]、孙栋元等^[3]分别利用遥感观测与水量平衡的方法分析了黑河流域水平衡,得出流域地表水资源的空间分布状况,揭示水资源变化趋势与原因;Ghandhari等^[5]利用水平衡原理对伊朗五大流域进行了分析,针对流域气候变化对供水和需水系统的影响进行了探讨;Le Mesnil等^[7]选取法国喀斯特地貌区的12个流域,对划分的120个集水区年度水平衡状况进行了讨论。生态需水是指水生态系统保持健康状态所具备的基础流量或水位,研究对象涉及河流、湖泊、湿地等多种生态系统类型^[9-10]。近年来,水资源的过度开发以及不合理利用,导致世界各地水生态系统面临着不同程度的生态问题,为确保水资源的可持续利用,如何合理确定河流生态需水量已成为生态水文学的研究热点^[11-13]。

随着自然环境的变化以及社会经济的发展,黄河中游水资源、水生态问题日益突出,加之流域内各项调水政策的实施,近年来河流泥沙锐减、灌区用水紧张、河道生态破坏等生态环境问题频出。沁河是黄河左岸三门峡以下最大的支流,在黄河流域开发中占有重要地位。作为黄河中游重要的来水区,不仅是山西南部重要的经济、文化、生态走廊,同时也是河南北部重点粮油产区和生态保护区。近年来,流域内地表径流量持续减少,水域面积不断萎缩等生态环境问题日益突出^[14],虽然已有多位学者针对沁河流域开展过研究,但研究的内容多聚焦于流域内的重点地区,关注的重点多是流域内可供水总量与生活、生产用水之间的关系,对维持河流健康状态的生态环境需水量的研究较少,且研究时间较早,缺少2021年引沁入汾跨流域提水工程全线贯通后的流域内部水资源供需平衡资料,无法系统反映流域内部生态环境状况^[15-20]。

沁河流域所面临的生态环境问题在黄河中游地区比较典型,研究沁河流域水资源供需平衡可为黄河中游的水资源调配与水生态治理提供范例。因此将整个沁河流域作为研究对象,以2021年作为现状年,通过河流关键节点划分水文分区,将保障河流生态系统健康作为研究基础,按照实际状况修改完善水平衡

方程中的各项内容,计算维持河流生态系统健康所需的水量,探讨各区间以及全流域的水资源供需平衡状况,为流域内以及黄河中游水资源的科学分配和社会经济的发展提供重要的科学依据和借鉴指导。

1 研究区概况

沁河发源于山西省沁源县西北部的二郎神沟,从北到南沿沁潞高原横跨太行山,由济源市五龙口进入河南省,最终于武陟县南贾村汇入黄河。河道全长 485 km,流域位于太行山山脉西侧,以山区为主,平均海拔约 750 m。全流域现有 7 处大型水文测站,其中孔家坡、飞岭、润城、五龙口和武陟 5 处水文站从北到南分布于沁河干流,此外沁水县河上地区设有油房站,丹河作为沁河最大支流,在沁阳市境内设有山路平水文站。流域地处副热带季风区,流域多年平均气温为 10.4 °C,多年平均降水量为 606.09 mm,多年平均潜在蒸发量为 1 742.37 mm(图 1)。

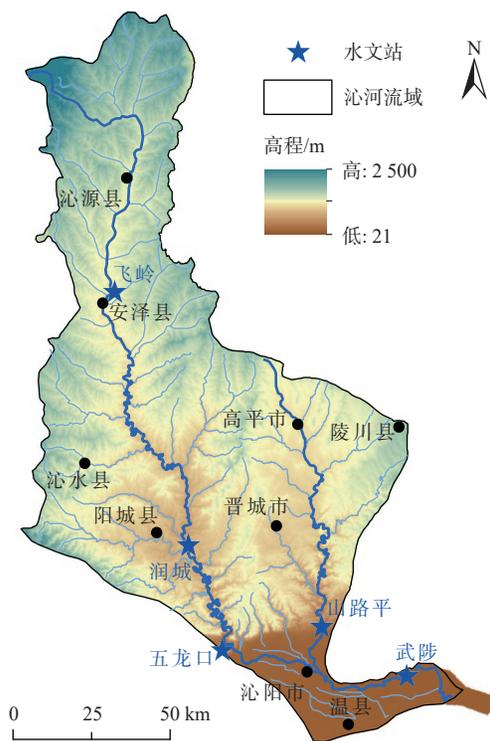


图 1 沁河流域范围
Fig. 1 Map of the Qinhe River Basin

沁河流域是晋东南重要的经济中心,流域内 2021 年末常住人口总数为 320 万,国民生产总值为 2 262.15 亿元。区域内资源丰富,煤、煤层气、白云岩、石灰岩、铝土矿等矿产资源储量丰富,同时流域内农业与畜牧业发达,在干流有广利、引沁灌区,在支流有丹

东、丹西灌区。流域内耕地总面积为 $29.47 \times 10^4 \text{ hm}^2$,其中有效灌溉面积达 $17.15 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。2021 年末沁河流域共有大、小牲畜总头数 2000 余万头(只)。

2 数据与方法

2.1 数据

本文使用的数据包含气候、植被、径流以及各地社会经济数据。

(1)研究区的降水量及温度数据(1990—2021 年)通过中国科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/>)获取,共收集流域周边 12 个气象站日气象资料。

(2)各地太阳顶层辐射数据来自美国太空总署气象数据库(<https://www.nasa.gov/>)。

(3)植被类型数据由中国科学院空天信息创新研究院的中国 30 m 精细地表覆盖产品(GLC_FCS30 1990—2020)中提取,用于进行降水及蒸发数据的估算。

(4)水文数据选用沁河流域 6 个水文站(2002—2021 年)径流资料,其中五龙口、武陟站资料来源于水利部黄河委员会(<http://www.yrcc.gov.cn/>),孔家坡、飞岭、润城及山路平水文站数据依托自然资源部中国地质调查局地质调查项目(DD20211573)向国家科技基础条件平台——国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn>)申请。

(5)流域内蒸散发数据取自河北省高校生态环境地质应用技术研发中心开放研究基金资助项目(JSYF-202206)中研究成果。

(6)社会经济数据来源于流域各县(市)统计年鉴与山西、河南省水资源公报。

(7)各行业用水定额参照《河南省地方标准-用水定额》(DB41 T385—2020)^[21]、《山西省用水定额》(DB14 T1049—2021)^[22]。

2.2 研究方法

本次研究首先对沁河流域进行水文分区,以保障河道内满足一定程度的生态需水为基础,然后结合河流可供水量、人类活动、自然环境需水进行水量平衡关系分析,最后开展流域水资源现状评价及预测。

(1)通过 ArcGIS 中 Hydrology 功能对流域内水系流向及各区域汇水区进行识别,以累计水量阈值为 1 000 时获得各汇水区界线^[23],根据汇水区界线、高程、水文站位置及行政界线进行水文分区划分。

(2)分析并计算沁河流域各水循环分区、流域总体可供水资源、需求水资源总量,其中可供水资源总量包括水文站实测的地表径流量加上来自当地

的再生回流水、本地供水,最后减去流向流域外的引、提水量。需求水资源总量主要由生活、生产和生态系统需水3部分构成^[24]。

(3)利用定额法以及Tenant法分别计算不同分区的生产、生活及生态需水总量。

(4)针对流域的现状,基于河流生态需水量建立流域水资源供需模型,分析各节点河流水资源供需平衡关系。

(5)探讨流域总体水量供需平衡现状,预测2030年的社会活动需水总量,分析其原因并提出解决方案。

2.3 各水平衡项的计算方法

2.3.1 生活、生产用水的计算

流域生产、生活用水通过定额法计算,各行业用水定额通过各地区颁布的用水政策确定(表1)。

表1 沁河流域各行业用水定额表

Table 1 Water quota table for various industries in the Qinhe River Basin

省份	地区	城镇生活/ (L·d ⁻¹)	农村居民/ (L·d ⁻¹)	工业增加值/ (m ³ ·万元 ⁻¹)	农田有效灌溉面积/ (m ² ·m ⁻²)	大型牲畜/ (L·d ⁻¹)	小型牲畜/ (L·d ⁻¹)
山西	沁河	134	77	25.1	0.24	25	1
	丹河	175	68	29.6	0.25	25	1
河南	济源	210	83	16.1	0.48	30	0.7
	焦作	158	71	19.1	0.32	30	0.7

2.3.2 生态环境需水量的计算

流域生态环境需水量的计算基于Budyko理论与水量平衡原理,涉及到天然径流的还原以及河道内、河道外及河滨带生态环境需水量的计算。

(1)天然径流量的还原

为使水文站数据能反映当年天然产流量,需将相邻水文站之间河段受人为影响而变化的水量进行还原计算^[25-26]。采用逐项还原计算方法:

$$W_{\text{还原}} = S_{\text{有效}} m_i f_i + \eta W_{\text{工业}} + \beta W_{\text{生活}} \pm W_{\text{引水}} \quad (1)$$

式中: $W_{\text{还原}}$ ——各项还原水量之和/m³;

$S_{\text{有效}}$ ——各水文站以上灌溉水利用系数,山西、河南境内分别取0.58,0.62;

m_i ——作物的净灌溉定额/(m³·m⁻²);

f_i ——实灌面积/m²;

$W_{\text{工业}}$ ——工业用水量/m³;

η ——工业耗水率,取0.2;

$W_{\text{生活}}$ ——城镇生活用水量/m³;

β ——城镇生活耗水率,取0.2;

$W_{\text{引水}}$ ——跨流域引水量/m³,引出为正,引入为负。

(2)河道内生态需水量计算

根据沁河流域的实际生态环境状况,建立河道内生态环境需水量模型^[9],主要包括河道生态基流、自净、输沙、水生生物栖息地以及河道景观需水,计算公式为:

$$W_{\text{河道内生态}} = \max(W_{\text{基流}} + W_{\text{输沙}} + W_{\text{自净}}) + W_{\text{蒸发}} + W_{\text{渗漏}} \quad (2)$$

式中: $W_{\text{河道内生态}}$ ——河道内年生态环境需水量/m³;

$W_{\text{基流}}$ ——河道年生态基流量/m³;

$W_{\text{输沙}}$ ——河道年输沙需水量/m³;

$W_{\text{自净}}$ ——河流年水质稀释自净需水量/m³;

$W_{\text{蒸发}}$ ——河道年水面蒸发需水量/m³;

$W_{\text{渗漏}}$ ——河床年渗漏需水量/m³。

(3)河道生态基流量

河道生态基流量指河道一年中各时间段内径流量达到某一水平,能够保障河道内生物达到某一生长状态,同时维持河流基本生态环境功能不受破坏的水量,基于Tennant法^[27-29],需水量计算公式为:

$$W_R = 24 \times 3600 \sum_{i=1}^{12} M_i Q_i P_i \quad (3)$$

式中: W_R ——多年平均状态下维持河道一定功能的需水量/m³;

M_i ——第*i*月天数/d;

Q_i ——原始状态下第*i*月多年平均流量/(m³·s⁻¹);

P_i ——第*i*月生态环境需水比例。

考虑流域实际情况,此次计算以保证河道不断流,河道内维持一定的流量为基础,在计算中将生物栖息地的需水量统一纳入生态基流量中,并在此基础上逐步修复河流的生态系统及其功能(表2)。

表2 Tennant法中不同流量比例及对应的河道内生态环境
Table 2 Different flow ratios in Tennant method and the corresponding ecological environment in river channels

流量值栖息地定性描述	基流标准(多年平均天然流量百分数)/%	
	一般用水期 (10月至次年3月)	鱼类产卵育幼期 (4—9月)
最佳	60~100	60~100
极好	40	60
适宜	20	50
最小	10	10
极差	0~10	0~10

(4)水面蒸发量

水面蒸发量作为河川径流的天然损耗项,是河流水平衡计算中的重要组成部分,计算公式为:

$$W_{\text{蒸发}} = 0.001 E_w A_w \quad (4)$$

式中: $W_{\text{蒸发}}$ ——水面蒸发消耗需水量/m³;

E_w ——实测水面蒸发能力/mm;

A_w ——水面面积/m。

(5)河床渗漏量

同河流上表面蒸发一样,河床渗漏也是河流水量自然损失的重要方式^[24]:

$$W_{\text{渗流}} = (Q_u - Q_d \pm Q_m)(1 - \lambda)L/L'' \quad (5)$$

式中: $W_{\text{渗流}}$ ——河床渗漏消耗需水/m³;

Q_u 、 Q_d ——上、下游水文站实测水量(扣除区间加入水量)/m³;

Q_m ——m 区间入流水量/m³;

L'' ——相邻测站间河道长度/m;

L ——计算河道或河段长/m;

λ ——修正系数,根据相邻测站间水面蒸发量及两岸浸润带蒸发量之和占($Q_u - Q_d \pm Q_m$)的比例确定^[24]。

(6)河道景观需水量

沁河河道上分布有湿地、风景名胜区和城市景观等多种类型的涉水景观,通过定额法计算河道内的湿地、沼泽需水量^[24]:

$$W_p = 0.001 E_p A_p \quad (6)$$

式中: W_p ——植物需水量/m³;

E_p ——植被蒸散量/mm;

A_p ——河流湿地植被分布面积/m²。

(7)河滨带生态环境需水量

河滨带生态环境需水量包含河滨带景观及植被需水量,河滨带景观需水量采用定额法计算,河滨带植被需水量计算采用水量平衡法,只考虑降水后蒸发以及植被截留的水量^[24],计算公式为:

$$Q = \sum_{i=1}^j (P_{ij} - R_{ij} - E_i) A_i \times 10^{-3} \quad (7)$$

式中: Q ——植被带需水总量/m³;

P_{ij} ——年均降水量/mm;

R_{ij} ——年均地表径流汇入河道量/mm;

E_i ——年均实际蒸散发量/mm,实际蒸散发是在气候、土壤和植被综合作用下的实际水汽通量,即非理想水面条件下,从地表回到大气的水汽通量;

A_i —— i 类生态系统面积/m²;

i ——研究区第 i 类生态系统类型;

j ——研究区生态系统类型。

地表径流量(R)可由降雨量与地表径流系数的乘积得到。计算公式如下:

$$R_{ij} = P_{ij} a \quad (8)$$

式中: R_{ij} ——地表径流量/mm;

P_{ij} ——多年平均降雨量/mm;

a ——地表径流系数/%,见表 3^[30]。

表 3 平均地表径流系数

Table 3 Average coefficients of surface runoff

生态系统类型	植被类型	平均地表径流系数/%
森林	常绿针叶林	4.52
	落叶阔叶林	2.70
灌丛	常绿阔叶灌丛	4.26
	落叶阔叶灌丛	4.17
草原	温带草原	3.94
	高山草甸	4.17
耕地	旱地	16.27
	灌溉农田	18.27
湿地	沼泽和水库	0

3 结果

3.1 水文分区

本次水文分区的研究以流域汇水区为基础,结合各乡镇行政界限进行划分。通过对沁河流域的 DEM 影像进行分析处理,并结合各地行政区边界以及各支流分布与走向,最后得到流域水文分区(图 2)。

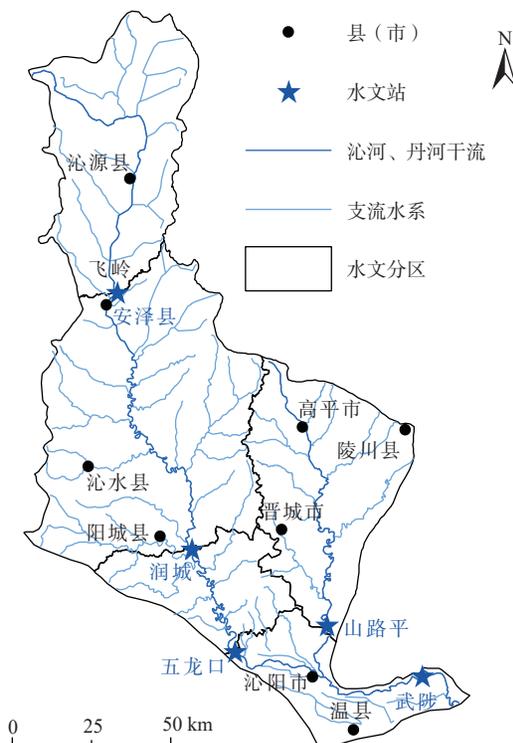


图 2 沁河流域地表水文分区

Fig. 2 Hydrological division of the Qinhe River Basin

按照水文分区结果统计各分区内基础水文信息具体见表4。

3.2 流域生产、生活用水总额

以2021为现状年,整理沁河流域各县市人口及社会经济状况(表5),计算水资源用量,依据水资源开发利用现状,在保证居民生活用水和经济发展的前提下,统计流域内各行业用水量,分析用水需求状况。

利用定额法计算流域内生活、生产用水量,其中城镇生活用水包含城镇居民日常生活用水及城镇服务用水,各用水量总额见表6。

表4 沁河流域各水文分区基础数据

Table 4 Basic information of each hydrological division in the Qinhe River Basin

控制断面起点	控制断面终点	流域水面面积 /km ²	河道长度 (含支流) /km	多年平均降水量 /mm	多年平均实际蒸发量 /mm	多年平均水面蒸发量 /mm
沁河源	飞岭	15.34	552.36	533.34	396.93	1 601.21
飞岭	润城	29.90	978.03	613.08	384.39	1 732.94
润城	五龙口	9.71	279.29	659.12	393.97	1 658.21
丹河源	山路平	8.13	307.98	701.31	340.27	2 006.32
五龙口	武陟	12.65	479.64	598.07	381.08	1 827.81
沁河源	入黄口	75.73	2 597.30	606.09	382.48	1 742.37

表5 沁河流域2021年人口、经济发展状况

Table 5 Population and economic development in the Qinhe River Basin in 2021

断面起点	断面终点	总人口/万人	城镇人口/万人	农村人口/万人	工业产值/万亿	有效灌溉耕地面积/(10 ⁴ hm ²)	大型牲畜/万头	小型牲畜/万头
沁河源	飞岭	18.04	8.44	9.67	135.65	132.02	30.32	4.38
飞岭	润城	56.83	27.56	29.27	537.16	249.53	34.59	112.57
润城	五龙口	23.03	11.11	11.93	174.16	154.03	21.92	43.98
丹河源	山路平	138.98	98.81	40.17	585.45	390.01	46.04	176.79
五龙口	武陟	89.12	50.16	38.96	829.74	359.87	124.41	95.67
沁河源	入黄口	326.01	196.08	130.01	2 262.15	1 285.45	257.27	433.39

表6 沁河流域2021年生活、生产需水量

Table 6 Water demands for life and production in the Qinhe River Basin in 2021 / (10⁸ m³)

断面起点	断面终点	居民生活用水量	工业用水量	耕地用水量	牲畜用水量	总需水量
沁河源	飞岭	0.05	0.23	0.41	0.01	0.70
飞岭	润城	0.14	0.53	0.57	0.12	1.36
润城	五龙口	0.06	0.47	0.34	0.05	0.92
五龙口	武陟	0.22	0.69	2.69	0.12	3.72
丹河源	山路平	0.26	1.29	0.76	0.18	2.49
沁河源	入黄口	0.73	3.21	4.77	0.47	9.19

3.3 生态环境需水总额

3.3.1 河道内生态需水量

(1) 河流天然径流量

还原水量的统计按水文分区后的河流分段进行,各项还原后水量之和即为河流总的还原水量,累积计算得到全流域的还原量,同时按照 Tennant 法对不同比例天然径流量的要求即可得到不同状态下的河道生态需水量(表7)。

(2) 河流自净、输沙需水量

河流自净需水是指通过河流自身流转稀释径流中含有的各种污染物,随着水体流速和流量的增加,河流的自净能力也会得到提升,从而实现河流自净水功能。因此,河流自净需水量可定义为当水体达到该地区水质规划要求时所需的额外水量。根据山西省

生态环境厅2019年8月—2022年5月的地表水水质月报以及河南省生态环境厅2021年1—12月的“十四五”国考断面水质状况,可知沁河整体水质良好,除丹河的牛村断面在2020年5月—2021年6月期间存在超标,其余各断面各月水质能够保持在Ⅲ类以上,得益于牛庄断面以下水库的缓冲净化作用,水库以下河段达标稳定。总体来看沁河流域水质情况近年来较好,排污较少,因此河流自净需水量可忽略不计。

沁河流域地处黄河中游末端,黄土高原东翼,植被生长茂密,水土流失较少,年内泥沙主要产生于汛期。同时根据收集到的黄河干支流主要水库进出水沙过程(1960—2019年)(五龙口—饮马道)数据显示,沁河年入黄沙量较少,属水清沙少型河流。由于沁河流域水土流失强度较小,故河道输沙需水量也相对较少,可忽略不计。

表7 沁河流域2021年生态环境需水量

Table 7 Calculated water demand for ecological environment in the Qinhe River Basin in 2021 / (10⁸ m³)

断面起点	断面终点	实测径流量	天然径流量	还原径流量	最小生态需水量	适宜生态需水量	最佳生态需水量 (60%)
沁河源	飞岭	0.91	1.20	0.29	0.11	0.41	0.64
飞岭	润城	2.15	2.99	0.84	0.25	1.01	1.55
润城	五龙口	3.95	4.69	0.74	0.43	1.64	2.59
五龙口	武陟	3.88	6.52	2.64	0.52	1.95	3.12
丹河源	山路平	1.16	2.06	0.89	0.16	0.65	0.89

(3) 水面蒸发、河床渗漏及河道景观需水量

按照划分的水文分区,依据遥感影像确定各河段长度以及宽度,选取流域周边的气象站获取区域蒸发及降水数值及河流水文地质参数、河流水文参数、河床岩性等,得到流域水面蒸发、渗漏及河道景观需水量,具体见表 8。

表 8 沁河流域 2021 年水面蒸发、渗漏及景观需水量

Table 8 Water demands for water surface evaporation, seepage and river landscape in the Qinhe River Basin in 2021 / (10^4 m^3)

断面起点	断面终点	水面蒸发量	河床渗漏量	河道景观需水量
沁河源	飞岭	1 310.54	182.91	471.15
飞岭	润城	2 678.91	209.94	615.74
润城	五龙口	970.03	305.26	481.01
五龙口	武陟	848.75	85.65	612.09
丹河源	山路平	1 244.79	208.33	605.07
沁河源	入黄口	7 053.02	992.09	2 785.06

3.3.2 河滨带生态环境需水量

(1) 河滨景观湿地需水量

沁河流域湿地面积不大,类型简单,主要有河流湿地、沼泽湿地 2 种类型。通过遥感解译,沁河流域湿地总面积约为 $0.41 \times 10^8 \text{ m}^2$,以河流湿地为主,沼泽湿地面积仅有 $1.86 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。在河道生态需水中已考虑湿地景观需水量,且沼泽湿地主要依靠流域上游来水进行维持,无需单独计算。

(2) 河滨植被带需水量

沁河干流长度约 485 km,河道曲折率为 1.95。流域面积约 $1.35 \times 10^4 \text{ km}^2$,落差 194 m,平均比降 1.55%,属于山区性河流,在此河滨带宽度以 100 m 估算^[24]。

因河滨带距离河道较近,其降水后扣除湿地、植被需水后直接补给河道内,故可计算为河滨带补水量(表 9)。

表 9 沁河流域 2021 年河滨带生态环境需水量

Table 9 Ecological environment water demand in the riverside zone of the Qinhe River Basin in 2021 / (10^4 m^3)

断面起点	断面终点	河滨带降水量	河滨带蒸发量	河滨带植被需水量	河滨带补充水量
沁河源	飞岭	2 899.08	2 192.51	585.68	120.89
飞岭	润城	5 394.64	3 759.47	1 410.22	224.96
润城	五龙口	1 637.76	1 100.31	469.16	68.29
五龙口	武陟	1 829.83	1 047.96	705.56	76.30
丹河源	山路平	2 928.61	1 827.79	978.69	122.12
沁河源	入黄口	14 689.92	9 928.04	4 149.31	612.56

3.3.3 河道外生态环境需水量

河道外生态需水主要包括城镇生态用水与河湖湿地生态用水。城镇生态用水包含城镇绿化及环境

卫生用水,城镇绿化和环境卫生均属城镇服务产业,已包含在城镇居民生活用水定额中,在生产、生活用水中已做计算,此处不做赘述。沁河流域内无大型湖泊且城市湿地多为河道景观公园,已在河道景观用水中进行说明,此处不重复计算。

4 讨论

4.1 沁河流域节点水量平衡

根据划分的流域水文分区,各区段水量平衡计算考虑河段上游流入、下游流出、支流汇入、再生水利用、河道与河滨带降水等补给项,以及水体和河滨带水分蒸发量、河道提水量、河道地表水入渗地下等消耗项,建立节点水量平衡模型:

$$Q_{N+1} = Q_N + Q_M + Q_{Sr} + P - Q_W - S - ET + W_R \quad (9)$$

式中: Q_{N+1} ——河道断面 $N+1$ 的出流量/ m^3 ;

Q_N ——河道断面 N 的出流量/ m^3 ;

Q_M ——支流汇入河道水量/ m^3 ;

Q_{Sr} ——再生水回流河道量/ m^3 ;

P ——河道与河滨带降水量/ m^3 ;

Q_W ——河道外引提水量/ m^3 ;

S ——河道入渗消耗量/ m^3 ;

ET ——水体和河滨带水分蒸发量/ m^3 ;

W_R ——可供河道内生态用水量/ m^3 。

2021 年,山西省内沁河流域对外调水工程以引沁入汾提水工程为主,总提水量约 $0.69 \times 10^8 \text{ m}^3$,本地供水包含阳城电厂取延河泉 $0.95 \times 10^8 \text{ m}^3$,经处理后可回流沁河 $0.75 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[14],河南省境内引水工程共有 2 处,分别为引沁灌区、广利灌区,其中广利灌区位于流域之内,引水使用后回流沁河,包含在农业生产用水回流中,无需重复计算,引沁灌区年提水量为 $0.53 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[15],退水去向为经蟒河汇入黄河干流,丹河流域主要包含 2 处灌区,分别为丹东灌区、丹西灌区,年提水量为 $0.51 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[31-32],退水去向为卫河、大沙河。依据流域内水文分区,汇总计算结果,得到 2021 年沁河流域各节点供、需水量统计,结果见表 10。

4.2 各节点水量平衡现状与原因探讨

依据计算出的结果并结合前文河道内生态需水量分级可知,山西省境内的沁河河段均能够满足适宜的生态需水量。其中沁河源—飞岭、润城—五龙口 2 段可满足最佳生态需水量,其原因为沁河源—飞岭段处于流域上游,来水丰富;润城—五龙口段位于太行山区,山高林密,人烟稀少,这 2 处河段自然原始程度较高,开发利用程度低,无大型工程向流域外供水,保持

表 10 沁河流域 2021 年各节点供、需水量

Table 10 Water supply and water demand at each node in the Qinhe River Basin in 2021 / (10⁸ m³)

断面起点	断面终点	实测径流量	补给水量		消耗水量			可供生态需水量
			生产用水回流量	河滨带补水量	河道蒸发渗流量	河道外生态需水量	引、提、调水量	
沁河源	飞岭	0.91	0.40	0.01	0.15	0.05		1.11
	飞岭	2.15	0.87	0.02	0.29	0.06	0.69	1.26
	润城	3.95	0.60	0.01	0.13	0.05		1.85
	五龙口	3.88	1.85	0.01	0.10	0.06	0.53	0.81
	丹河源	1.16	1.63	0.01	0.15	0.06	0.51	1.51

了自然状态下的供需水平衡状态,因此可满足最佳的河道生态需水。飞岭—润城段自 2021 年引沁入汾二期浮山供水工程通水后,向流域外年引水量激增至 0.69×10⁸ m³,河道内可供生态环境水量开始迅速退化,但尚可满足适宜的生态需水量。沁河进入河南省境内后,可供给河道内生态环境水量急剧下降,五龙口—武陟段仅可满足最小的河道生态需水,主要原因为河流两侧引水灌区面积较大,除广利灌区外,退水去向均为流域外河流,山西省境内河流上游跨流域调水后进入下游水量减少,同时下游灌区灌溉水有效利用率较低,导致取水量大,导致沁河下游水资源供给严重不足。沁河下游河床下切严重,主河槽距离闸口较远,多处涵闸和提灌站无法引水,需要进行二级提灌,河道内生态可供水量仅为 0.81×10⁸ m³,可满足最小生态需水量。

根据水文资料显示,自 2019 年初以来,沁河武陟水文站过境水量常年处于偏少状态,局部河段出现断流。丹河作为沁河最大支流,在山路平水文站之上有丹东、丹西 2 处灌区,二者是沁河流域主要的生产、生活区域。近年来由于节水政策的施行和对区域内灌区改造,河道内生态可供水量已能满足河流最佳生态需水量。总体来看,目前沁河流域存在的水资源问题主要集中在河流下游,表现为来水量持续偏少,各行业生产用水量大,河道断流干涸、河床暴露等,对下游

河流两岸的生活、生产造成严重影响,同时也对两岸的生态环境产生威胁。

4.3 流域总水量平衡分析

通过对流域生产、生活、生态需水量及水资源供给状况的研究,分析流域总体水资源供需平衡,进一步确定河流生态需水的供需情况。水资源供需平衡以确定水资源供给方式和供给对象为基础,若可供水量等于需水量,则水资源处于供需平衡状态,流域水资源供需平衡模型为:

$$W_{\text{河滨带补水}} + W_{\text{再生}} + W_{\text{上游来水}} + W_{\text{本地供水}} = W_{\text{生活、生产}} + W_{\text{生态}} + W_{\text{引调水}} \quad (10)$$

式中: $W_{\text{河滨带补水}}$ ——河滨带向河道补充水量/m³;

$W_{\text{再生}}$ ——处理后回流河道水量/m³;

$W_{\text{上游来水}}$ ——上游进入河流水量/m³;

$W_{\text{本地供水}}$ ——本地社会向河流供给水量/m³;

$W_{\text{生活、生产}}$ ——生活、生产用水量/m³;

$W_{\text{生态}}$ ——生态环境用水量/m³;

$W_{\text{引调水}}$ ——向流域外引出水量/m³。

通过计算得出,流域内可供给水资源总量为 10.04×10⁸ m³,河道外生产、生活、生态用水总量为 8.89×10⁸ m³,剩余可用于河道内水资源量为 1.15×10⁸ m³,仅可满足最小生态需水量,距离适宜的生态需水量还差 0.8×10⁸ m³ 的水量缺口(表 11)。

表 11 沁河 2021 年流域供、需水量

Table 11 Water supply and water demand in the Qinhe River basin in 2021 / (10⁸ m³)

断面起点	断面终点	地表水取用比	地表水取用量	河道外生态需水量	再生水量	河滨带补水量	河道蒸发渗流量	引提调水量	实测径流量
沁河源	飞岭	0.59	0.41	0.05	0.40	0.01	0.15		0.91
	飞岭	0.52	0.71	0.06	0.87	0.02	0.29	0.69	2.15
	润城	0.51	0.47	0.05	1.35	0.01	0.13		3.95
	五龙口	0.51	3.20	0.06	1.85	0.01	0.10	0.53	3.88
	丹河源	0.52	1.28	0.06	1.63	0.01	0.15	0.51	1.16
沁河源	入黄口	0.53	6.07	0.28	6.10	0.06	0.81	1.73	3.88

4.4 预测至 2030 年水平衡情况

在假设流域内各引、提水及水库水量保持不变的

前提下,依据沁河流域 2010—2020 年的社会人口、经济增长速度并结合社会发展现状对流域 2030 年人口

及社会经济情况进行预测,计算 2030 年流域内生产、生活需水量。因 2021 年沁河流域粮食总产量均已超过全省平均产粮水平,认为粮食生产可完全满足全流域范围内所需,故未考虑农业生产增加的灌溉面积。假设地表水取用比例维持现状不变,计算得出至 2030 年流域内生产、生活取用地表水量将由 2021 年

的 $6.07 \times 10^8 \text{ m}^3$ 提升到 $6.98 \times 10^8 \text{ m}^3$,取用地表水总量将达到 $9.81 \times 10^8 \text{ m}^3$,虽然部分地表水会回流入河道,但仍会压减河道内可用于维护生态环境的水量,届时河道内流量将无法满足最小生态流量,从而造成河道内生态环境的进一步破坏(表 12)。

表 12 沁河流域 2030 年社会经济及生产、生活需水量

Table 12 Socio-economic, industrial, and domestic water demand in the Qinhe River Basin in 2030

断面起点	断面终点	总人口 /万人	工业产值 /亿元	生活用水量 /(10^8 m^3)	工业用水量 /(10^8 m^3)	耕地用水量 /(10^8 m^3)	牲畜用水量 /(10^8 m^3)	地表水取用量 /(10^8 m^3)
沁河源	飞岭	27.03	212.62	0.04	0.37	0.33	0.01	0.44
	飞岭	86.11	420.47	0.12	0.89	0.57	0.12	0.89
	润城	34.84	259.55	0.05	0.79	0.35	0.05	0.63
	五龙口	241.43	687.33	0.22	0.82	2.69	0.12	3.26
	武陟	141.35	427.41	0.20	2.28	0.76	0.18	1.76
	山路平	530.76	2 007.39	0.64	5.14	4.68	0.48	6.98
	入黄口							

近年来为提高流域内水资源使用效率,各地政府发布了一系列用水政策,但目前流域内依旧存在水资源供需紧张,可供生态环境用水贫乏等问题。因此沁河流域水资源管理的关键是如何科学调度和合理使用现有水资源。根据各节点水资源平衡探讨可知,在受人类活动影响较弱的河段内,河道内水资源可保持最佳状态,发生水平衡变化区段的主控因素是人为影响,在山西省境内体现为向外流域调水,减少了自身河道健康流量;在下游河南省境内导致河道内可供生态流量较少的主因为两岸灌区引水,对比丹河流域内丹东、丹西灌区,沁河下游灌区设备多老旧,未经改造,导致灌溉水利用率较低,取用数量较大。

根据流域各节点用水面临的突出问题,结合水资源供给现状提出以下建议:

(1)应适当减少各引、提水工程规划的引水量,尤其是向流域外汾河流域临汾市以及流域内丹河流域晋城市的年供水量。通过在跨流域调水的受益区域实施有力的节水措施,转变居民用水观念,采用对工业用水进行有效净化、循环利用等方式提升工业水资源节约利用水平,提高水资源使用效率。

(2)通过科学合理分配确定流域内各水库的调节系数,适当对下游放水,满足下游流域在极端气候条件下的生态环境基本需求,减少河道断流情况。

(3)在下游各引水灌区,开展科学灌溉,针对灌溉渠道渗漏问题进行维修改造,降低农业用水额度,提高灌溉水利用效率。

5 结论

(1)流域内水资源供需矛盾具有明显的空间差异

性。流域中上游水资源较丰富,可满足河流最佳生态需水量,仅飞岭—润城段因为跨流域调水河流生态开始出现退化,但仍可满足适宜的生态需水量。下游河段进入河南省境内后可供水资源量明显不足,仅可满足河流最小生态需水量;主要原因为上游调水政策施行后,进入下游水资源量减少,加之河南省境内存在多处大型农耕灌区,取水设施老旧,对河道径流的压力较大,导致部分河段近年来频繁出现断流现象。

(2)总体来看,现阶段沁河流域内水资源供需矛盾尚不明显。2021 年,流域内可供给地表水资源总量为 $10.04 \times 10^8 \text{ m}^3$,流域内社会活动需水总量为 $8.89 \times 10^8 \text{ m}^3$,主要需水方向为工业生产及农业灌溉,2021 年剩余可利用的河道内生态用水量为 $1.15 \times 10^8 \text{ m}^3$,仅可满足最小的生态需水量,但距离适宜的生态需水需水量仍有 $0.81 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的水量缺口。

(3)根据社会经济发展推算,至 2030 年沁河流域取用地表水量达到 $9.81 \times 10^8 \text{ m}^3$,剩余供给水量将无法满足河道内最小生态需水。

全流域仍需继续执行水资源高效利用的用水政策,缩减流域内社会经济用水,同时在制定流域用水规划时应充分考虑水资源供需的空间差异,注重协调山西、河南两省上下游供水关系。加强各行业水资源利用效率,提高流域水资源可持续利用程度,做到全流域生态环境的快速恢复。

参考文献 (References):

- [1] 左其亭,吴青松,金君良,等.区域水平衡基本原理及理论体系[J].水科学进展,2022,33(2):165-173.
[ZUO Qiting, WU Qingsong, JIN Junliang, et al. The

- basic principle and theoretical system of regional water balance[J]. *Advances in Water Science*, 2022, 33(2): 165 – 173. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 闫柏琨,李文鹏,甘甫平,等. 基于地表水循环遥感观测的黑河流域水平衡分析[J]. *水文地质工程地质*, 2022, 49(3): 44 – 56. [YAN Bokun, LI Wenpeng, GAN Fuping, et al. Water balance analysis based on remote sensing observation of surface water cycle in the Heihe River watershed[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(3): 44 – 56. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 孙栋元,李元红,胡想全,等. 黑河流域水资源供需平衡与配置研究[J]. *水土保持研究*, 2014, 21(3): 217 – 221. [SUN Dongyuan, LI Yuanhong, HU Xiangquan, et al. Study on balance and configuration of water resources supply and demand in Heihe River Basin[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2014, 21(3): 217 – 221. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 刘鑫,温天福,曾新民,等. 袁河流域水资源供需平衡与空间差异[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2020, 18(5): 94 – 101. [LIU Xin, WEN Tianfu, ZENG Xinmin, et al. Analysis and spatial differences of water supply and demand balance in Yuanhe River Basin[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2020, 18(5): 94 – 101. (in Chinese with English abstract)]
- [5] GHANDHARI A, MOGHADDAM S M R A. Water balance principles: A review of studies on five watersheds in Iran[J]. *Journal of Environmental Science and Technology*, 2011, 4(5): 465 – 479.
- [6] ZHANG Xiaoyu, XU Duanyang, WANG Ziyu, et al. Balance of water supply and consumption during ecological restoration in arid regions of Inner Mongolia, China[J]. *Journal of Arid Environments*, 2021, 186: 104406.
- [7] LE MESNIL M, CHARLIER J B, MOUSSA R, et al. Interbasin groundwater flow: Characterization, role of karst areas, impact on annual water balance and flood processes[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 585: 124583.
- [8] BRITO C, DINIS L T, FERREIRA H, et al. The role of nighttime water balance on *Olea europaea* plants subjected to contrasting water regimes[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2018, 226: 56 – 63.
- [9] 李金燕,包淑萍. 河道内生态需水及取水断面可调水量研究[J]. *人民黄河*, 2019, 41(11): 36 – 42. [LI Jinyan, BAO Shuping. Available water resource base on eco-environmental water demand study in water transfer region of urban and rural drinking water source engineering of Guyuan, Ningxia[J]. *Yellow River*, 2019, 41(11): 36 – 42. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 郑超磊,刘苏峡,舒畅,等. 基于生态需水的水资源供需平衡分析[J]. *人民黄河*, 2010, 32(1): 48 – 49. [ZHENG Chaolei, LIU Suxia, SHU Chang, et al. Analysis on the balance between supply and demand of water resources based on ecological water demand[J]. *Yellow River*, 2010, 32(1): 48 – 49. (in Chinese)]
- [11] 占焱,于洋,吴秀芹. 湟水流域生态系统服务供需匹配关系[J]. *生态学报*, 2021, 41(18): 7260 – 7272. [ZHAN Tian, YU Yang, WU Xiuqin. Supply-demand spatial matching of ecosystem services in the Huangshui River Basin[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(18): 7260 – 7272. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 郭亚男,韩亚萍,宋文超. 灌河流域生态需水确定及保障措施分析[J]. *人民黄河*, 2020, 42(2): 63 – 66. [GUO Yanan, HAN Yaping, SONG Wenchao. Analysis on determination of ecological water demand and analysis of safeguard measures in the guanhe river basin[J]. *Yellow River*, 2020, 42(2): 63 – 66. (in Chinese with English abstract)]
- [13] SONG Ge, HUANG Jinting, NING Bohan, et al. Effects of groundwater level on vegetation in the arid area of western China[J]. *China Geology*, 2021, 4(3): 527 – 535.
- [14] 任世芳,韩佳. 沁河流域水资源安全利用分析[J]. *地理科学研究*, 2018, 7(2): 129 – 133. [REN Shifang, HAN Jia. Research on the water resources utilization in Qinhe River[J]. *Geographical Science Research*, 2018, 7(2): 129 – 133. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 李杲. 沁河下游水生态保护和水资源有序利用研究[C]//中国水利学会 2020 学术年会. 北京, 2020. [LI Qi. Research on water ecological protection and orderly utilization of water resources in the lower reaches of the Qin River[C]//2020 Academic Annual Meeting of China Water Conservancy Society. Beijing, 2020. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 王会肖,薛明娇,覃龙华. 黄河中游河道生态环境需水量研究[J]. *中国生态农业学报*, 2009, 17(2): 369 – 374. [WANG Huixiao, XUE Mingjiao, QIN Longhua. Ecological and environmental water requirement in the middle Yellow River[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2009, 17(2): 369 – 374. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 黄锦辉,王瑞玲,葛雷. 黄河干支流重要河段功能性不断流指标研究[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2016. [HUANG Jinhui, WANG Ruiling, GE Lei. Study on functional continuous flow index of important sections of the main tributaries of the Yellow River[M]. Zhengzhou: Yellow River Water Conservancy Press, 2016. (in Chinese)]

- [18] 赵小涛, 赵小鑫, 杜泳. 焦作黄沁河水资源可持续利用研究 [J]. 河南科技, 2019(35): 84 - 86. [ZHAO Xiaotao, ZHAO Xiaoxin, DU Yong. Research on sustainable utilization of water resources in Jiaozuo Yellow River and Qin River[J]. Henan Science and Technology, 2019(35): 84 - 86. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 孙妍. 沁河流域需水预测水平年用水需求分析 [C]//2015 中阿博览会中国(宁夏)国际水资源高效利用论坛. 银川, 2015. [SUN Yan. Analysis of annual water demand at the forecast level of water demand in the Qin River Basin[C]//2015 China Arab Expo China (Ningxia) International Water Resources Efficient Utilization Forum. Yinchuan, 2015. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 胡庆芳, 陈秀敏, 高娟, 等. 水平衡与国土空间协调发展策略研究 [J]. 中国工程科学, 2022, 24(5): 63 - 74. [HU Qingfang, CHEN Xiumin, GAO Juan, et al. Coordinated development between water balance and territory space[J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(5): 63 - 74. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 河南省水利厅. 河南省地方标准-用水定额: DB41 T385—2020[S]. 郑州: 黄河水利出版社, 2020. [Henan Provincial Department of Water Resources. Henan provincial local standard - water consumption quota: DB41 T385—2020[S]. Zhengzhou: Yellow River Water Conservancy Publishing House, 2020. (in Chinese)]
- [22] 山西省水利厅. 山西省用水定额: DB14 T1049—2021 [S]. 太原: 山西省市场监督管理局, 2021. [Shanxi Provincial Department of Water Resources. Water consumption quota of Shanxi Province: DB14 T1049—2021[S]. Taiyuan: Shanxi Provincial Administration for Market Regulation, 2021. (in Chinese)]
- [23] 俞丽燕, 王雅黎, 邢晓彬. 基于 ArcGIS 的水文分析阈值研究 [J]. 测绘科学与工程, 2021, 41(3): 75 - 80. [YU Liyan, WANG Yali, XING Xiaobin. ArcGIS-based hydrological analysis threshold study[J]. Geomatics Science and Engineering, 2021, 41(3): 75 - 80. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 刘家宏, 王浩, 秦大庸. 山西省水生态系统保护与修复关键技术研究及示范 [M]. 北京: 科学出版社, 2014. [LIU Jiahong, WANG Hao, QIN Dayong. Research and demonstration of key technologies for the protection and restoration of water ecosystems in Shanxi Province[M]. Beijing: Science Press, 2014. (in Chinese)]
- [25] 张航, 冯民权, 王莉, 等. 基于生态调水清渭河水环境效应研究 [J]. 西安理工大学学报, 2015, 31(1): 83 - 90. [ZHANG Hang, FENG Minquan, WANG Li, et al. Research on water environmental effects of Qingyi River based on ecological water diversion[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2015, 31(1): 83 - 90. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 窦明, 石亚欣, 于璐, 等. 基于图论的城市河网水系连通方案优选——以清渭河许昌段为例 [J]. 水利学报, 2020, 51(6): 664 - 674. [DOU Ming, SHI Yaxin, YU Lu, et al. Optimization of connecting schemes for urban river networks based on graph theory: A case study of Xuchang section of Qingying River[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(6): 664 - 674. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 田沉, 付兴涛. 基于改进 Tennant 法的汾河生态基流研究 [J]. 水电能源科学, 2022, 40(9): 44 - 47. [TIAN Chen, FU Xingtao. Study on ecological base flow of Fenhe River based on improved tennant method[J]. Water Resources and Power, 2022, 40(9): 44 - 47. (in Chinese with English abstract)]
- [28] 徐志侠, 陈敏建, 董增. 河流生态需水计算方法评述 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2004, 32(1): 5 - 8. [XU Zhixia, CHEN Minjian, DONG Zeng. A review of the calculation method of river ecological water demand[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2004, 32(1): 5 - 8. (in Chinese with English abstract)]
- [29] ORTH D J, LEONARD P M. Comparison of discharge methods and habitat optimization for recommending instream flows to protect fish habitat[J]. Regulated Rivers: Research & Management, 1990, 5(2): 129 - 138.
- [30] 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 with English abstract)]
- [31] 杜娟, 肖艳霞, 刘春雷, 等. 丹东灌区现状与节水改造措施 [J]. 河南水利与南水北调, 2017(6): 42 - 46. [DU Juan, XIAO Yanxia, LIU Chunlei, et al. Current situation and water-saving transformation measures in Dandong irrigation area[J]. Henan Water Resources & South-to-North Water Diversion, 2017(6): 42 - 46. (in Chinese)]
- [32] 薛建军, 刘小燕, 崔淑君, 等. 丹西灌区现状及节水配套改造效益分析 [J]. 河南水利与南水北调, 2010(9): 40 - 41. [XUE Jianjun, LIU Xiaoyan, CHUI Shujun, et al. Analysis of the current situation of Danxi irrigation area and the benefits of water-saving supporting renovation[J]. Henan Water Resources & South-to-North Water Diversion, 2010(9): 40 - 41. (in Chinese)]