

水量-水质-生态需水综合视角下黄河流域水稀缺评估

陆中桂^{1,2}, 康 哲^{1,2,3}, 李 巍^{1,2}, 黄明辉^{1,2}

(1. 北京师范大学环境学院, 北京 100875; 2. 水环境模拟国家重点实验室, 北京 100875;
3. 鄂尔多斯市环保投资有限公司, 内蒙古 鄂尔多斯 017010)

摘要: 基于水足迹方法从水量-水质-生态需水综合视角下对黄河流域的水稀缺进行评估。结果表明: 2021 年黄河流域的蓝水足迹和灰水足迹分别为 526.5 亿 m^3 和 3 056.2 亿 m^3 ; 仅考虑水量和生态需水时, 黄河流域的缺水压力较小, 其中 85.4% 的地级市为低缺水压力, 仅 10.1% 的地级市处于极端缺水压力; 纳入水质因素后, 仅 15.7% 的地级市为低缺水压力, 而 64.0% 的地级市处于极端缺水压力, 水质因素显著加剧了流域的缺水压力。建议协同推进水资源管理和保护, 推广节水技术和水资源循环利用, 重点提高农业水资源利用效率和强化农业污染治理, 以缓解黄河流域经济发展与水资源限制之间的矛盾。

关键词: 水量-水质-生态需水; 蓝水足迹; 灰水足迹; 水稀缺; 黄河流域

中图分类号: TV213.4

文献标志码: A

文章编号: 1004-6933(2024)04-0073-09

Water scarcity assessment in the Yellow River Basin from comprehensive perspective of water quantity-water quality-ecology water demand// LU Zhonggui^{1,2}, KANG Zhe^{1,2,3}, LI Wei^{1,2}, HUANG Minghui^{1,2} (1. School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. State Key Laboratory of Water Environmental Simulation, Beijing 100875, China; 3. Ordos Environmental Protection Investment Co., Ltd., Ordos 017010, China)

Abstract: Based on the water footprint method, the water scarcity in the Yellow River Basin is evaluated from a comprehensive perspective of water quantity-water quality-ecology water demand. The results showed that the blue water footprint and grey water footprint of the Yellow River Basin are 52.65 billion and 305.62 billion m^3 , respectively. When only considered water quantity and ecology water, the water scarcity pressure of the Yellow River Basin is low, of which 85.4% of the cities are under low water scarcity pressure and only 10.1% are under extreme water pressure. After incorporating water quality factors, only 15.7% of the cities are under low water scarcity pressure, and 64.0% are under extreme water pressure. Water quality has greatly exacerbated the water scarcity in the basin. It is suggested to jointly promote water resources management and protection, and to facilitate water-saving technologies and water recycling. Efforts should focus on improving agricultural water use efficiency and strengthening pollution control to alleviate the conflict between economic development and water constraints in the Yellow River Basin.

Key words: water quantity-water quality-ecology water demand; blue water footprint; grey water footprint; water scarcity; Yellow River Basin

水资源短缺是制约黄河流域高质量发展的最主要因素。黄河流域水资源供需矛盾突出, 流域 9 省区的人口数量占全国的 30.3%, GDP 占全国的 25%, 但水资源总量仅为全国的 2.6%^[1]。黄河流域水资源利用率已经达到 80%, 远超 40% 的生态警戒线, 属于水资源严重短缺的地区^[2]。黄河流域是我国重要的农产品产区, 粮食和肉类产量约占全国总产量的 1/3, 同时还是我国重要的能源、化工、原材

料和基础工业基地^[3], 因此黄河流域水资源短缺会影响国家的粮食安全与能源安全。2021 年 10 月, 国务院印发的《黄河流域生态保护与高质量发展规划纲要》明确提出坚持量水而行、节水优先。把水资源作为最大的刚性约束, 坚持“以水定城、以水定地、以水定人、以水定产”(“四水四定”)^[4]。2022 年, 生态环境部等十二部委联合发布《黄河生态保护治理攻坚战行动方案》, 明确要求合理控制

基金项目: 国家自然科学基金项目(72050001)

作者简介: 陆中桂(1992—), 女, 博士研究生, 主要从事水资源规划与管理研究。E-mail: zhongguilu1011@163.com

通信作者: 李巍(1969—), 男, 教授, 博士, 主要从事环境管理与可持续发展研究。E-mail: weili@bnu.edu.cn

水资源开发利用强度,优化用水结构,有效保障生态流量,保护水资源,改善水环境,恢复水生态。面对黄河流域“四水四定”“三水统筹”以及生态保护治理攻坚的政策要求,准确、全面地评估流域的水资源短缺是识别潜在缺水问题的前提,也是确保流域水资源可持续利用和制定有效解决方案的关键^[5]。

水资源短缺也称水稀缺,被定义为特定区域内水量或水质无法满足人类水资源需求(生产、生活和环境需求)的一种状态^[6]。自 20 世纪 80 年代以来,学者们构建了不同的指标来反映当地的水稀缺,但目前水稀缺评估仍仅局限于单一因素,主要以水量与可利用水资源量为基础^[7],应用最为广泛的指标为 Falkenmark 指数^[8]和水压力指数^[9-10],还有国际水管理协会(International Water Management Institute,IWMI)发布的 IWMI 指数^[11]和蓝-绿水稀缺指数^[12-13]。单因素评估忽略了经济活动和生态保护中对水质和生态用水的要求^[14],近年来相关研究逐渐从单因素向多因素拓展,水足迹概念的提出为改进水稀缺评估提供了新思路。Hoekstra 等^[15]将对地下水 and 地表水资源的消耗量规定为蓝水足迹,假设维持关键生态功能的需水量为水资源量的 80%,从而开发了基于水足迹的水稀缺评估方法。此外,学者也逐渐认识到水质因素在水稀缺评估中的重要性^[16-18],水质不达标可能导致无法满足生产和生活部门的用水需求,从而减少可用的水资源量^[19]。

表 1 为水稀缺评估常用指标^[5,8-13,15,20-24]。由表 1 可见,已有研究大部分聚焦于国家、省级和流域等尺度^[25-28],地级行政区尺度的相关研究较少,且已有研究多围绕个别缺水的地级行政区。有研究表明,受数据和信息的限制,国家或省级等较大尺度的研究忽视了局部地区的水稀缺问题^[29],无法反映地区具体情况。

黄河全长约 5464 km,流域面积 79.5 万 km²,地

理范围广,各地区地理位置、资源禀赋、经济水平、基础设施和管理存在较大差异,且部分省区仅有个别地级市属于黄河流域范围(如四川)。因此,省级尺度研究无法提供具体的水稀缺信息,不能满足精细化、差异化的管理需求。另外,受限于污染物排放数据获取的难度,地级行政区尺度的水稀缺评估大多针对水量因素展开,考虑水质因素的研究较少。因此,本文拟计算 2021 年黄河流域 89 个地级行政区的蓝水足迹和灰水足迹,分别从“水量+生态需水”“水质+生态需水”“水量+水质+生态需水”3 方面评估流域的水稀缺,并提出黄河流域水资源可持续利用与管理的对策和建议。

1 研究区概况与数据来源

黄河流域自然地理范畴覆盖了青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南和山东 9 个省区。但四川境内黄河段流经的甘孜藏族和阿坝藏族羌族自治州的经济和人口总量仅占黄河流域的 1%,且《长江经济带发展规划》将四川纳入其中,故四川未被纳入本研究范围;《东北振兴“十三五”规划》将内蒙古东部地区划入,故这些地区也未被纳入^[30]。因此,本文基于黄河自然流域的范围,考虑行政区划的完整性以及各省区经济社会发展的关联性,将黄河流域的社会经济范围界定为除四川外的 8 个省区的 89 个地级行政区(表 2)。

地级市水资源量和耗水量均来自各省 2021 年水资源公报,其中有耗水量数据的选用耗水量数据,未提供耗水量数据的通过用水量与耗水率进行折算^[24],服务业耗水包含于城镇公共耗水中,通过 GDP 比例进行折算^[31]。各市的污染物排放数据来自各市 2021 年环境统计年鉴,缺乏的相关污染物数据通过省级环境统计数据、人口数、工业产值、氮肥施用量、畜禽养殖量等进行折算^[32-33]。

表 1 水稀缺评估常用指标

Table 1 Evaluation indicators of water scarcity

维度	指标	指标解释	考虑因素			应用尺度	参考文献
			水量	水质	生态		
单因素	Falkenmark 指标	人均可用水量	√			国家	[8]
	紧迫系数法(水压力指数)	用水量与可用水量之比	√			国家、地区	[9-10]
	IWMI 指数	供水占可用水量的比例与水利基础设施供水比例	√			国家	[11]
	蓝-绿水稀缺指数	包含于饮食中的人均蓝绿水需求	√			国家、地区	[12-13]
多因素	水贫穷指数	水资源量、取水能力、管理能力、不同用水需求、环境完整性的平均值	√		√	国家	[20-21]
	基于生命周期评价的水压力指数	基于生命周期评价的水足迹与可用水比例	√	√		流域	[22]
	基于水足迹的水稀缺指数	蓝水足迹与总用水量之比	√		√*	国家、区域、行业	[15]
	纳入水质因素的水稀缺指数	水量和水质	√	√		国家、区域	[23]
	水量-水质-生态需水三维水稀缺指标	水量、水质、生态因素	√	√	√	流域	[5,24]

注:√* 表示生态需水被假设为水资源量的 80%。

表 2 研究区范围
Table 2 Study area scope

省区	数量	地级行政区
青 海	8	西宁市、海东市、海北藏族自治州、海南藏族自治州、黄南藏族自治州、果洛藏族自治州、玉树藏族自治州、海西蒙古族藏族自治州
甘 肃	14	兰州市、嘉峪关市、金昌市、白银市、天水市、武威市、张掖市、平凉市、酒泉市、庆阳市、定西市、陇南市、临夏回族自治州、甘南藏族自治州
宁 夏	5	银川市、石嘴山市、吴忠市、固原市、中卫市
内蒙古	7	呼和浩特市、包头市、乌海市、鄂尔多斯市、巴彦淖尔市、乌兰察布市、阿拉善盟
陕 西	10	西安市、铜川市、宝鸡市、咸阳市、渭南市、延安市、榆林市、汉中市、安康市、商洛市
山 西	11	太原市、大同市、阳泉市、长治市、晋城市、朔州市、忻州市、吕梁市、晋中市、临汾市、运城市
河 南	18	郑州市、开封市、洛阳市、平顶山市、安阳市、鹤壁市、新乡市、焦作市、濮阳市、许昌市、漯河市、三门峡市、南阳市、商丘市、信阳市、周口市、驻马店市、济源市
山 东	16	济南市、青岛市、淄博市、枣庄市、东营市、烟台市、潍坊市、济宁市、泰安市、威海市、日照市、临沂市、德州市、聊城市、滨州市、菏泽市

2 研究方法

2.1 蓝水足迹核算

蓝水足迹是指个体、区域或国家在生产、消费或服务过程中消耗的水资源量,包括地表水和地下水^[15],计算公式为

$$B = B_a + B_i + B_s + B_r \tag{1}$$

式中: B 为地级市的蓝水足迹,即耗水量; B_a 、 B_i 、 B_s 、 B_r 分别为农业、工业、服务业、居民生活消耗的水资源量。

2.2 灰水足迹核算

灰水足迹被定义为以自然本底浓度和现有的水质环境标准为基准,将一定的污染物负荷吸收同化所需的假想淡水量^[17-18]。与根据水体中污染物浓度来评估水质的传统方法相比,灰水足迹则把所有污染物换算为统一单位,即稀释水量,这使得灰水足迹能够和其他指标(如蓝水足迹)结合,从而更全面地反映区域的综合水资源状况。农业、服务业与居民生活考虑了 COD、NH₃-N、总氮、总磷 4 种污染物。工业则考虑了 COD、NH₃-N、石油类、挥发酚 4 种污染物。计算方法如下:

$$G = L_p / (\rho_m - \rho_n) \tag{2}$$

式中: G 为地级市的灰水足迹,由灰水足迹最大的污染物决定; L_p 为污染物的污染负荷,即排放量; ρ_m 为污染物在水质环境标准下的最大质量浓度,根据 GB3838—2002《地表水环境质量标准》,农业、工业、服务业与居民生活等分别按 V、IV、Ⅲ类水标准计算; ρ_n 为自然条件下水体中污染物的本底质量浓度,通常假定为 0^[19]。

2.3 生态需水计算

生态需水又被称为生态流量,是指保证水生生态系统处于健康水平所需的水量^[34]。已有水稀缺评估大多数根据 Hoekstra 提出的假设,将生态流量

按总水资源量的 80% 计算^[24,35]。然而,这一假设过于简单和笼统,Liu 等^[25] 研究结果发现我国各省生态需水的比例在 21%~43% 之间,因此将该值定为 80% 可能会高估黄河流域的水稀缺。本文首先获取了黄河流域重要水文站点的生态流量,根据式(3) 计算出各水文站生态流量的比例(表 3)^[36-40]。由表 3 可见,计算的结果为 27%~39%,低于 Hoekstra 的假设,与 Liu 等^[24,41] 基于模型模拟得到的结果相近。因此,将该比例作为水文站点所在省所有地级市的生态需水比例,根据式(4) 得到各地级市的生态需水量。

$$e_i = \sum_{j=1}^{12} 86\,400 n_j Q_i / Q_n \tag{3}$$

$$E = eQ \tag{4}$$

式中: e_i 为水文站 i 的生态需水比例; n_j 为第 j 月的天数; Q_i 为水文站 i 的生态流量; Q_n 为水文站的全年径流量; E 为生态需水量; e 为生态需水比例; Q 为地级市的水资源量。

表 3 黄河干流各省区重点水文站的生态需水比例
Table 3 Ecological water demand ratios of major stations in each province of the Yellow River Basin

省区	站点	生态需水比例/%
青 海	唐乃亥	27.8
甘 肃	兰 州	35.0
宁 夏	下河沿	37.0
内蒙古	头道拐	27.0
陕 西	潼 关	37.5
山 西	龙 门	37.5
河 南	花园口	32.5
山 东	利 津	38.8

2.4 水稀缺评估

参考刘俊国等^[6] 的研究,将水量、水质与生态需水按不同因素构建相应的水稀缺指数。其中,蓝水足迹表征耗水量,灰水足迹表征稀释污染物所需的水量,水资源总量与生态需水量的差值表征可用

水资源量。基于“水量+水质+生态”的综合水稀缺指数计算公式为

Wc = Wqu + Wqa (5)

其中 Wqu = B/(Q - E) Wqa = G/(Q - E)
式中:Wc 为基于“水量+水质+生态”的综合水稀缺指数;Wqu 为基于“水量+生态”的水稀缺指数;Wqa 为基于“水质+生态”的水稀缺指数。参考 Ma 等^[17]的研究,并根据黄河流域的实际情况,设置以下水压等级:低缺水压力(Wc<1)、中等缺水压力(1≤Wc<1.5)、高缺水压力(1.5≤Wc<2)、极端缺水压力(Wc≥2)。

3 结果与分析

3.1 蓝水足迹评估

表 4 为黄河流域 2021 年蓝水足迹和灰水足迹。由表 4 可见,黄河流域 2021 年的总蓝水足迹为 526.5 亿 m³。黄河流域作为我国重要的粮食生产基地,农业耗水占比达 74.6%,是黄河流域耗水量最大的部门^[42]。工业耗水与居民生活耗水分别占流域蓝水足迹的 10.6%和 11.2%。由于流域上游地区的降水量少,农业依赖引水灌溉,使得上游地区的农业耗水量偏高,占上游总蓝水足迹的 87.0%。下游地区则因人口众多,经济发展水平相对较高,各部门的蓝水足迹均高于上游和中游。

图 1 为 2021 年黄河流域地级市蓝水足迹。由图 1 可见,黄河流域蓝水足迹在整体上呈现北高南低、东高西低的分布趋势。蓝水足迹较高的地级市分布比较分散,主要位于内蒙古北部、甘肃西北部和山东西部。蓝水足迹较低的地级市则主要分布于流域西南部,包括青海南部、甘肃南部和山西中南部的地级市。具体来说,蓝水足迹最大是巴彦淖尔市(34.3 亿 m³),其中农业耗水(33.4 亿 m³)占全市蓝水足迹的 97.6%。巴彦淖尔市地处我国三大灌区之一河套灌区的核心位置,是我国重要的粮食生产基地,粮食产量突破每年 50 亿 kg,同时还是全球最大的有机原奶生产基地,农业用水量极大。蓝水足迹前三的其余两个市分别是酒泉市(15.0 亿 m³)与南阳市(15.0 亿 m³),其中农业耗水分别占 94.9%和 73.9%。从工业耗水来看,排名前三的依次为鄂

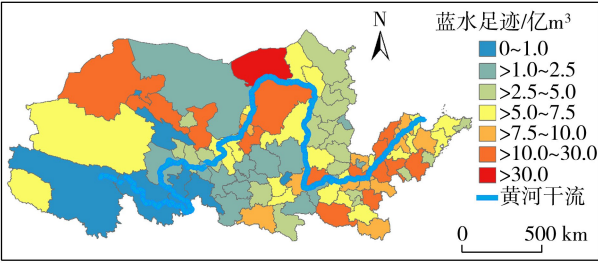


图 1 2021 年黄河流域地级行政区蓝水足迹

Fig. 1 Blue water footprint of prefecture level administrative regions in the Yellow River Basin in 2021

尔多斯市(2.4 亿 m³)、太原市(2.0 亿 m³)和包头市(1.9 亿 m³)。3 市的共同特点均是工业总产值占 GDP 的比例大,且高耗能高耗水产业较多。以鄂尔多斯市为例,煤炭采选业作为高耗水行业,其产值占鄂尔多斯市工业总产值的 25%,使得鄂尔多斯市的工业耗水量高。从居民生活耗水来看,排名前三的依次是郑州市(3.4 亿 m³)、济南市(2.3 亿 m³)和青岛市(2.3 亿 m³),3 市均为区域经济中心城市,人口集聚情况明显,因而居民耗水量较高。

3.2 灰水足迹评估

由表 4 可见,黄河流域 2021 年灰水足迹共 3056.2 亿 m³,其中农业为流域灰水足迹最大的部门,占 49.0%,其次是服务业,占流域灰水足迹的 46.5%。黄河流域上、中、下游的灰水足迹与经济发展水平一致,呈现明显的阶梯型分布。上游地区农业蓝水足迹虽然远高于中游,但中游的灰水足迹却更大,说明中游地区在农业面源污染控制方面还有很大潜力。同时,下游地区灰水足迹占全流域的 55.2%,是黄河流域水污染物排放量最大的地区^[43]。

图 2 为 2021 年黄河流域地级市灰水足迹。由图 2 可见,黄河流域灰水足迹呈现明显的东高西低的特征。灰水足迹高的地区呈现明显的集聚性,尤其是河南与山东,两省的灰水足迹之和占流域的 59.6%。低灰水足迹的地区集中在黄河流域西部,包括青海、甘肃南部、宁夏南部等经济欠发达地区。具体来说,灰水足迹最大是西安市(146.5 亿 m³),其次是临沂市(113.6 亿 m³)和南阳市(113.6 亿 m³),其中南阳市的农业灰水足迹在所有市中最大,为 61.8 亿 m³,占南阳市总灰水足迹的

表 4 2021 年黄河流域蓝水和灰水足迹

Table 4 Blue water footprint and gray water footprint in the Yellow River Basin in 2021

类别	蓝水足迹/亿 m ³				灰水足迹/亿 m ³			
	上游	中游	下游	黄河流域	上游	中游	下游	黄河流域
农业	52.0	83.6	157.1	392.7	240.9	374.6	882.2	1497.7
工业	2.1	19.1	24.6	55.7	4.2	5.3	18.2	27.7
服务业	2.2	4.1	8.4	14.7	16.1	36.9	58.2	111.2
居民生活	7.8	18.2	33.0	59.0	165.4	524.6	729.7	1419.6

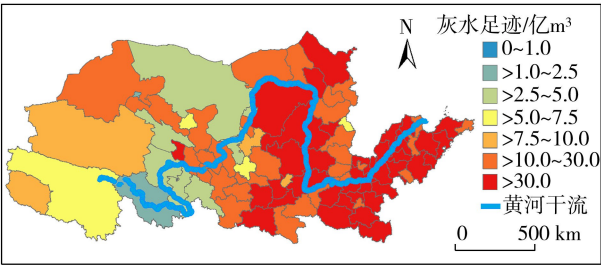


图 2 2021 年黄河流域地级行政区灰水足迹

Fig. 2 Gray water footprint of prefecture level administrative regions in the Yellow River Basin in 2021

61.1%。这是由于南阳市的种植业和养殖业均居河南省前列,被誉为“中州粮仓”。种植业和畜禽养殖业发展的同时也导致了水污染。农业灰水足迹前三的其余两个市为临沂市(71.9 亿 m³)、潍坊市(61.8 亿 m³)。服务业灰水足迹最大的是西安市(7.4 亿 m³),其次是郑州市(5.7 亿 m³),这与西安和郑州作为西部和中原地区国际性综合交通枢纽城市有关。从居民生活耗水来看,排名前三的均为省会城市,分别为西安市(132.3 亿 m³)、郑州市(73.5 亿 m³)和济南市(52.5 亿 m³),人口集聚情况明显,居民生活用水量较大,同时产生的污染物较多。

3.3 水稀缺评估

表 5 和表 6 分别为黄河流域上、中、下游和各省的水稀缺指数。从基于“水量+生态”的水稀缺指数来看,流域整体以及上中下游均处于低缺水压力状态。从各省来看,除宁夏(4.7)和内蒙古(1.3)分别处于极端缺水压力和中等缺水压力之外,其余 6 省处于低缺水压力状态。然而,从基于“水质+生态”的水稀缺指数来看,流域整体和中游处于中等缺水压力,而下游则处于极端缺水压力。从各省区来看,只有青海和陕西处于低缺水压力状态,甘肃处于中等缺水压力状态,山西和河南处于高缺水压力状态,山东、宁夏和内蒙古则处于极端缺水压力状态。

表 5 黄河流域水稀缺指数

Table 5 Water scarcity index in the Yellow River Basin

位置	Wqu	Wqa	Wc
黄河流域	0.2	1.3	1.5
上游	0.2	0.6	0.8
中游	0.1	1.1	1.2
下游	0.3	2.1	2.4

表 7 为黄河流域 89 个市的水稀缺指数。从基于“水量+生态”的水稀缺指数来看,85.4%的市(76 个)处于低缺水压力状态,仅 10.1%的市(9 个)处于极端缺水压力状态,其中除巴彦淖尔市和乌海市外,其余 7 市均分别属于甘肃(嘉峪关市、金昌

表 6 各省区水稀缺指数

Table 6 Water scarcity index in provinces of the Yellow River Basin

省区	Wqu	Wqa	Wc
青海	0.0	0.1	0.1
甘肃	0.4	1.1	1.5
宁夏	4.7	5.3	10.0
内蒙古	0.3	3.7	5.0
陕西	0.1	0.9	1.0
山西	0.3	1.9	2.3
河南	0.2	1.8	2.0
山东	0.3	2.2	2.6

市、白银市)和宁夏(银川市、石嘴山市、吴忠市、中卫市)。巴彦淖尔市因为农业耗水量较大(33.4 亿 m³),因此面临较严重的缺水问题。其余 8 市则是由于水资源总量较少(均低于 2 亿 m³),有限的水资源无法满足当地生产和生活的用水需求。从基于“水质+生态”的水稀缺指数来看,水质大大加剧了流域的水稀缺,仅有 19.1%的市(17 个)处于低缺水压力状态,27.0%的市(24 个)处于中等或高缺水压力状态,而 53.9%的市(48 个)处于极端缺水压力状态。

从基于“水量+水质+生态”的综合水稀缺指数来看,黄河流域的缺水程度已十分严峻。84.3%的市(75 个)面临中等及以上程度的缺水压力,其中 64.0%的市(57 个)处于极端缺水压力状态,且分布十分集中,主要位于山东、河南、甘肃、宁夏,4 省区合计 37 个市。具体到市,嘉峪关市(51.9)的缺水压力远超其他市,其次是银川市(29.6)、吴忠市(24.4),这 3 个市可用的水资源总量,分别为 0.09 亿、0.96 亿、1.06 亿 m³。这些区域需要采取多种措施来合理利用和保护水资源,包括合理配置水资源、提高用水效率、推广节水技术和措施、加强水污染治理等。此外,还需要加强与周边地区的合作,共同开发利用水资源。此外,甘肃除陇南市、甘南州外,其余市均处于极端缺水压力之下。青海西宁市(4.0)和海东市(1.2)分别处于极端缺水压力和中等缺水压力。宁夏其他 3 个市也均处于极端缺水压力状态,这是由于宁夏的水资源量极少,除固原市外均低于 2 亿 m³。内蒙古除阿拉善盟处于中等缺水压力(1.0)状态外,其余市也均面临极端缺水压力的影响。陕西西安市(3.9)、铜川市(2.3)、咸阳市(5.3)、渭南市(3.3)、延安市(2.8)、榆林市(2.8)均处于极端缺水压力,而宝鸡市、汉中市、安康市和商洛市则处于较低缺水压力状态,这是因为陕南各市的水资源量相对较为丰富,其中汉中和安康两市的水资源最为集中,占全省总量的 60.1%。

表 7 黄河流域地级行政区水稀缺指数

Table 7 Water scarcity index of prefecture level administrative regions in the Yellow River Basin

省区	地级行政区	W _{qu}	W _{qa}	W _c	省区	地级行政区	W _{qu}	W _{qa}	W _c
青海	西宁市	0.2	3.7	4.0	山西	太原市	0.7	4.1	4.8
	海东市	0.2	1.0	1.2		大同市	0.6	3.4	4.0
	海北藏族自治州	0.0	0.1	0.1		阳泉市	0.4	2.1	2.5
	海南藏族自治州	0.1	0.1	0.2		长治市	0.2	1.6	1.8
	黄南藏族自治州	0.0	0.2	0.2		晋城市	0.1	0.9	1.1
	果洛藏族自治州	0.0	0.0	0.0		朔州市	0.7	3.3	3.9
	玉树藏族自治州	0.0	0.0	0.0		晋中市	0.2	1.6	1.8
	海西蒙古族藏族自治州	0.0	0.1	0.1		运城市	0.6	1.9	2.4
宁夏	银川市	2.6	17.0	29.6		忻州市	0.3	1.5	1.8
	石嘴山市	6.3	3.9	10.2		临汾市	0.3	1.9	2.2
	吴忠市	3.8	10.6	24.4		吕梁市	0.3	2.7	3.0
	中卫市	5.4	4.3	9.7		郑州市	0.4	4.6	5.0
	固原市	0.4	1.6	2.0		开封市	0.5	3.8	4.4
甘肃	兰州市	0.9	5.8	7.7	河南	洛阳市	0.2	1.8	1.9
	嘉峪关市	4.2	37.7	51.9		平顶山市	0.2	1.6	1.8
	金昌市	4.5	6.4	10.9		安阳市	0.2	1.3	1.5
	白银市	6.1	10.4	16.4		鹤壁市	0.2	1.4	1.6
	天水市	0.2	1.9	2.0		新乡市	0.4	2.1	2.5
	武威市	0.3	2.4	3.7		焦作市	0.4	1.6	2.0
	张掖市	0.8	1.5	2.3		濮阳市	0.5	2.5	3.0
	平凉市	0.2	2.5	2.7		漯河市	0.3	2.8	3.1
	酒泉市	0.7	1.4	3.1		三门峡市	0.1	0.9	1.0
	庆阳市	0.3	2.3	2.6		南阳市	0.2	1.2	1.4
	定西市	0.2	2.1	2.3		商丘市	0.4	3.5	3.9
	陇南市	0.0	0.3	0.3		信阳市	0.1	0.8	0.9
	临夏回族自治区	0.5	3.2	3.7		驻马店市	0.1	1.8	1.9
	甘南藏族自治州	0.0	0.0	0.1		济源市	0.2	1.7	1.9
内蒙古	呼和浩特市	0.9	8.1	8.9		许昌市	0.4	3.3	3.7
	包头市	0.4	5.4	6.8		周口市	0.4	2.6	3.0
	乌兰察布市	0.4	3.9	4.3		济南市	0.3	1.8	2.2
	鄂尔多斯市	0.5	1.6	2.2		青岛市	0.4	4.2	4.6
	巴彦淖尔市	8.9	7.1	16.0		淄博市	0.3	1.3	1.6
	乌海市	3.1	10.7	13.8		枣庄市	0.2	1.2	1.4
	阿拉善盟	0.4	0.6	1.0		东营市	0.7	3.3	4.0
陕西	西安市	0.2	3.7	3.9	山东	烟台市	0.2	2.7	2.9
	铜川市	0.1	2.2	2.3		济宁市	0.4	2.7	3.1
	宝鸡市	0.1	0.8	0.9		泰安市	0.3	2.0	2.3
	咸阳市	0.5	4.8	5.3		威海市	0.2	1.6	1.8
	渭南市	0.4	2.8	3.2		日照市	0.3	3.1	3.4
	延安市	0.1	2.7	2.8		临沂市	0.2	2.2	2.4
	汉中市	0.1	0.2	0.3		德州市	0.4	3.2	3.6
	榆林市	0.4	2.4	2.8		滨州市	0.5	4.1	4.6
	安康市	0.0	0.2	0.2		菏泽市	0.3	1.5	1.8
	商洛市	0.0	0.2	0.3		潍坊市	0.4	3.6	4.0
						聊城市	0.4	2.1	2.5

4 结 论

a. 黄河流域 2021 年蓝水足迹为 526.5 亿 m³，其中农业蓝水足迹占比高达 74.6%。蓝水足迹较高的地区分布比较分散,主要位于内蒙古北部、甘肃西北部和山东西部。黄河流域 2021 年灰水足迹为 3 056.2 亿 m³，其中农业占比达 49.0%。灰水足迹值较高的地区呈现明显的集聚性,主要分布在河南

与山东,合计占流域的 59.6%。对此,农业部门需大力推行节水灌溉,实施节水改造,同时推动种植结构优化,发展旱作农业,强化农业污染治理,采取建设生态沟道、污水净塘等氮、磷高效生态拦截净化设施等措施。

b. 在考虑“水量+生态”时,流域的水稀缺压力较小,其中 85.4%的地级市为低缺水压力,且仅 10.1%的市(9 个)处于极端缺水压力状态。然而纳

入水质因素后,流域的水稀缺压力大幅增加,低缺水压力的市比例降低为 15.7%,而处于极端缺水压力的市增加到 64.0%(57 个)。可见,相较于水量,水污染引发的水质型缺水是制约流域经济发展的主要因素。研究结果强调了从节水控水、水质改善、生态用水保障等方面协同推进水资源节约集约高效利用,强化污水收集处理及再生利用设施建设等措施。

c. 对比流域、省区和地级行政区 3 个尺度的综合水稀缺结果发现,研究尺度的不同会对结果造成一定程度的影响。具体而言,在流域尺度,流域整体处于中等缺水压力状态(1.5),且上游地区处于低缺水压力(0.78)。但从地级行政区来看,许多市如兰州市(7.7)、嘉峪关市(51.9)、银川市(29.6)、石嘴山市(10.2)等均处于极端缺水压力状态。在省级尺度,本研究以及已有的水资源评估中,青海均被认为没有或较低缺水压力。但从地级行政区来看,西宁市(4.1)和海东市(1.2)分别面临极端缺水压力和中等缺水压力。鉴于黄河流域地理范围广,水资源地理空间分布不均且区域间经济发展水平差异较大,大尺度的研究可能会忽略部分受缺水影响的地区,因此在黄河流域内基于地级行政区尺度评估水稀缺有利于准确反映流域的水稀缺状况并进行区域间的比较,从而制定针对性的管理措施。

参考文献:

[1] HE Zhihao,GONG Kaiyuan,ZHANG Zhiliang,et al. What is the past,present,and future of scientific research on the Yellow River Basin?: a bibliometric analysis [J]. Agricultural Water Management,2022,262:107404.

[2] 薛联青,肖颖,刘远洪,等. 黄河流域植被水分利用效率对干旱的时空累积响应[J]. 水资源保护,2023,39(4):32-41. (XUE Lianqing,XIAO Ying,LIU Yuanhong,et al. Spatiotemporal accumulation response of vegetation water use efficiency to drought in the Yellow River Basin [J]. Water Resources Protection,2023,39(4):32-41. (in Chinese))

[3] 赵子萌,曹永强,常志冬,等. 黄河沿线 9 省区水土资源生态承载力耦合协调分析[J]. 水资源保护,2023,39(6):121-129. (ZHAO Zimeng,CAO Yongqiang,CHANG Zhidong,et al. Coupling coordination analysis of ecological carrying capacity of water and land resources in nine provinces along the Yellow River [J]. Water Resources Protection,2023,39(6):121-129. (in Chinese))

[4] 王若禹,赵志轩,黄昌硕,等. “四水四定”水资源管控理论研究进展[J]. 水资源保护,2023,39(4):111-117. (WANG Ruoyu,ZHAO Zhixuan,HUANG Changshuo,et al. Research progress on water resources management

theory of “basing four aspects on water resources” [J]. Water Resources Protection,2023,39(4):111-117. (in Chinese))

[5] 牛玉国,张金鹏. 构建黄河大水网促进黄河流域生态保护和高质量发展[J]. 水利经济,2023,41(2):1-4. (NIU Yuguo,ZHANG Jinpeng. Research on building the Yellow River’s large water network and promoting the ecological protection and high-quality development of the Yellow River Basin [J]. Journal of Economics of Water Resources,2023,41(2):1-4. (in Chinese))

[6] 刘俊国,赵丹丹. “量-质-生”三维水资源短缺评价:评述及展望[J]. 科学通报,2020,65(36):4251-4261. (LIU Junguo,ZHAO Dandan. Three-dimensional water scarcity assessment by considering water quantity, water quality,and environmental flow requirements: review and prospect [J]. Chinese Science Bulletin,2020,65(36):4251-4261. (in Chinese))

[7] LIU Junguo,YANG Hong,GOSLING S N,et al. Water scarcity assessments in the past,present,and future [J]. Earth’s Future,2017,5(6):545-559.

[8] FALKENMARK M,LUNDQVIST J,WIDSTRAND C. Macro-scale water scarcity requires micro-scale approaches [J]. Natural Resources Forum,1989,13(4):258-267.

[9] FALKENMARK M. Meeting water requirements of an expanding world population [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B:Biological Sciences,1997,352(1356):929-936.

[10] OKI T,KANAE S. Global hydrological cycles and world water resources [J]. Science,2006,313(5790):1068-1072.

[11] SECKLER D,AMARASINGHE U,DAVID M,et al. World water demand and supply,1990 to 2025: scenarios and issues [R]. Colombo:IWMI,1998.

[12] GERTEN D,HEINKE J,HOFF H,et al. Global water availability and requirements for future food production [J]. Journal of Hydrometeorology,2011,12(5):885-899.

[13] ROCKSTRÖM J,FALKENMARK M,KARLBERG L,et al. Future water availability for global food production;the potential of green water for increasing resilience to global change [J]. Water Resources Research,2009,45(7):W00A12.

[14] HUSSAIN Z,WANG Zongmin,WANG Jiaxue,et al. A comparative appraisal of classical and holistic water scarcity indicators [J]. Water Resources Management,2022,36(3):931-950.

[15] HOEKSTRA A Y,MEKONNEN M M,CHAPAGAIN A K,et al. Global monthly water scarcity:blue water footprints versus blue water availability [J]. PLoS One,2012,7(2):e32688.

- [16] LI Hui, LIANG Yuhan, CHEN Qionghong, et al. Pollution exacerbates interregional flows of virtual scarce water driven by energy demand in China[J]. *Water Research*, 2022, 223: 118980.
- [17] MA Ting, SUN Siao, FU Guangtao, et al. Pollution exacerbates China's water scarcity and its regional inequality[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 650.
- [18] VAN VLIET M T H, FLÖRKE M, WADA Y. Quality matters for water scarcity[J]. *Nature Geoscience*, 2017, 10(11): 800-802.
- [19] CAI Beiming, JIANG Ling, LIU Yu, et al. The impact of interregional trade on both quantity- and quality-related water scarcity of Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration in China [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2023, 88: 104270.
- [20] SULLIVAN C. Calculating a water poverty index [J]. *World Development*, 2002, 30(7): 1195-1210.
- [21] 张晓岚, 刘昌明, 高媛媛, 等. 水资源安全若干问题研究 [J]. *中国农村水利水电*, 2011(1): 9-13. (ZHANG Xiaolan, LIU Changming, GAO Yuanyuan, et al. A study of several issues concerning water resources security [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2011(1): 9-13. (in Chinese))
- [22] FRISCHKNECHT R, BÜSSER S, KREWITT W. Environmental assessment of future technologies: how to trim LCA to fit this goal? [J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2009, 14(6): 584-588.
- [23] ZENG Zhao, LIU Junguo, SAVENIJE H H G. A simple approach to assess water scarcity integrating water quantity and quality[J]. *Ecological Indicators*, 2013, 34: 441-449.
- [24] LIU Junguo, LIU Qingying, YANG Hong. Assessing water scarcity by simultaneously considering environmental flow requirements, water quantity, and water quality [J]. *Ecological Indicators*, 2016, 60: 434-441.
- [25] LIU Kewei, CAO Wenfang, ZHAO Dandan, et al. Assessment of ecological water scarcity in China [J]. *Environmental Research Letters*, 2022, 17(10): 104056.
- [26] SUN Siao, ZHOU Xian, LIU Haixing, et al. Unraveling the effect of inter-basin water transfer on reducing water scarcity and its inequality in China[J]. *Water Research*, 2021, 194: 116931.
- [27] 白芳芳, 齐学斌, 乔冬梅, 等. 黄河流域九省区农业水资源利用效率评价和障碍因子分析[J]. *水土保持学报*, 2022, 36(3): 146-152. (BAI Fangfang, QI Xuebin, QIAO Dongmei, et al. Evaluation of agricultural water resource utilization efficiency and obstacle factor diagnoses in nine provinces of the Yellow River Basin [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(3): 146-152. (in Chinese))
- [28] 陈莉, 张安安. 黄河流域水资源与社会经济协同评价及影响因素分析 [J]. *水资源保护*, 2023, 39(2): 1-8. (CHEN Li, ZHANG An'an. Synergistic evaluation of water resources and social economy in the Yellow River Basin and analysis of influencing factors [J]. *Water Resources Protection*, 2023, 39(2): 1-8. (in Chinese))
- [29] BRUNNER M I, ZAPPA M, STÄHLI M. Scale matters: effects of temporal and spatial data resolution on water scarcity assessments [J]. *Advances in Water Resources*, 2019, 123: 134-144.
- [30] 李江苏, 孟琳琳, 李韦华, 等. 黄河流域生产性服务业综合发展水平时空演变及影响因素分析 [J]. *人文地理*, 2023, 38(2): 116-125. (LI Jiangsu, MENG Linlin, LI Weihua, et al. Spatial-temporal pattern and influencing factors of comprehensive development level of producer services in the Yellow River Basin [J]. *Human Geography*, 2023, 38(2): 116-125. (in Chinese))
- [31] HOEKSTRA A Y, CHAPAGAIN A K, ALDAYA M M, et al. The water footprint assessment manual: setting the global standard [M]. London: Earthscan, 2011.
- [32] CAI Beiming, WANG Chencheng, ZHANG Bing. Worse than imagined: unidentified virtual water flows in China [J]. *Journal of Environmental Management*, 2017, 196: 681-691.
- [33] LI Hui, LIANG Sai, LIANG Yuhan, et al. Multi-pollutant based grey water footprint of Chinese regions [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2021, 164: 105202.
- [34] ARTHINGTON A H, BHADURI A, BUNN S E, et al. The Brisbane declaration and global action agenda on environmental flows (2018) [J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2018, 6: 45.
- [35] RICHTER B D, DAVIS M M, APSE C, et al. A presumptive standard for environmental flow protection [J]. *River Research and Applications*, 2012, 28(8): 1312-1321.
- [36] 贾绍凤, 梁媛, 张士锋. 黄河流域天然径流量评价探讨 [J]. *水资源保护*, 2022, 38(4): 33-38. (JIA Shaofeng, LIANG Yuan, ZHANG Shifeng. Discussion on evaluation of natural runoff in the Yellow River Basin [J]. *Water Resources Protection*, 2022, 38(4): 33-38. (in Chinese))
- [37] 易雨君, 徐嘉欣, 宋劼, 等. 黄河河口区生态需水量及流量过程核算 [J]. *水资源保护*, 2022, 38(1): 133-140. (YI Yujun, XU Jiabin, SONG Jie, et al. Ecological water demand and discharge process calculation in the Yellow River Estuary [J]. *Water Resources Protection*, 2022, 38(1): 133-140. (in Chinese))
- [38] 王高旭, 陈敏建, 丰华丽, 等. 黄河中下游河道生态需水

研究[J]. 中山大学学报(自然科学版),2009,48(5): 125-130. (WANG Gaoxu, CHEN Mnjian, FENG Huali, et al. Ecological flow regime in middle and lower reaches of the Yellow River [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2009, 48 (5): 125-130. (in Chinese))

[39] 赵芬, 庞爱萍, 李春晖, 等. 黄河干流与河口湿地生态需水研究进展[J]. 生态学报, 2021, 41 (15): 6289-6301. (ZHAO Fen, PANG Aiping, LI Chunhui, et al. Progress in ecological water requirements in the mainstream and estuary ecosystem of the Yellow River Basin [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41 (15): 6289-6301. (in Chinese))

[40] LU Shibao, CAI Wenting, SHAO Wei, et al. Ecological water requirement in upper and middle reaches of the Yellow River based on flow components and hydraulic index[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021, 18(20): 10956.

+++++

(上接第 35 页)

[58] LUO Zujiang, WANG Yan. 3-D variable parameter numerical model for evaluation of the planned exploitable groundwater resource in regional unconsolidated sediments [J]. Journal of Hydrodynamics, 2012, 24(6): 959-968.

[59] WANG He, WANG Fugang, SUN Jingwei, et al. New strategy for evaluating the spatiotemporal distribution of groundwater resource quantity under seasonal freeze/thaw in mountainous areas [J]. Journal of Hydrology, 2023, 616: 128850.

[60] NOORDUIJN S L, COOK P G, SIMMONS C T, et al. Protecting groundwater levels and ecosystems with simple management approaches[J]. Hydrogeology Journal, 2019, 27(1): 225-237.

[61] LI Shuoyang, YANG Guiyu, WANG Hao, et al. A spatial-temporal optimal allocation method of irrigation water resources considering groundwater level[J]. Agricultural Water Management, 2023, 275: 108021.

[62] 殷玉忠, 刘佩贵. 阜阳市现状地下水水位水量适宜性分析[J]. 安徽地质, 2017, 27 (4): 289-293. (YIN Yuzhong, LIU Peigui. Analysis of suitability of groundwater level and withdrawal in current situation in Fuyang City [J]. Geology of Anhui, 2017, 27 (4): 289-293. (in Chinese))

[63] 谢新民, 李丽琴, 周翔南, 等. 基于地下水“双控”的水资源配置模型与实例应用[J]. 水资源保护, 2019, 35 (5): 6-12. (XIE Xinmin, LI Liqin, ZHOU Xiangnan, et al. Water resources allocation model based on “double control” of groundwater and its application [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(5): 6-12. (in Chinese))

[41] SMAKHTIN V, REVENGA C, DÖLL P. A pilot global assessment of environmental water requirements and scarcity [J]. Water International, 2004, 29(3): 307-317.

[42] 赵勇, 黄可静, 高学睿, 等. 黄河流域粮食生产水足迹及虚拟水流动影响评价[J]. 水资源保护, 2022, 38(4): 39-47. (ZHAO Yong, HUANG Kejing, GAO Xuerui, et al. Evaluation of grain production water footprint and influence of grain virtual water flow in the Yellow River Basin [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(4): 39-47. (in Chinese))

[43] 张永凯, 孙雪梅. 黄河流域水资源利用效率测度与评价[J]. 水资源保护, 2021, 37 (4): 37-43. (ZHANG Yongkai, SUN Xuemei. Measurement and evaluation of water resources utilization efficiency in the Yellow River Basin [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(4): 37-43. (in Chinese))

(收稿日期: 2023 - 11 - 30 编辑: 王芳)

+++++

[64] 闫学军, 周亚萍, 张伟, 等. 地下水开发利用水位-水量“二元”指标管理模式研究[J]. 河北工业大学学报, 2012, 41 (2): 65-68. (YAN Xuejun, ZHOU Yaping, ZHANG Wei, et al. Study on the management modes of groundwater level-quality two indicators in exploitation [J]. Journal of Hebei University of Technology, 2012, 41 (2): 65-68. (in Chinese))

[65] 许一川. 地下水总量控制和水位控制管理模式研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2013.

[66] 姚梅. 顶底板固结排水条件下的地下水数值模拟[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2018.

[67] 王建磊. 吉林市区地下水位、水量双控管理系统设计[D]. 长春: 吉林大学, 2018.

(收稿日期: 2023 - 12 - 07 编辑: 王芳)

