

▪ 区域农业水管理 ▪

文章编号: 1672-3317(2023)03-0128-08

区域水资源供需平衡指数分析方法

——以引沁灌区为例

赵维岭¹, 纪义虎², 左其亭^{2,3*}, 符运友¹

(1.河南省豫北水利工程管理局, 河南 新乡 453002; 2.郑州大学 水利科学与工程学院, 郑州 450001; 3.河南省水循环模拟与水环境保护国际联合实验室, 郑州 450001)

摘要:【目的】进行区域水资源供需平衡分析。【方法】通过分析引沁灌区水资源供需平衡问题, 采用定额法结合相关发展规划预测引沁灌区 2018 年及 2025 年不同情景下的供需水量, 提出区域水资源供需平衡指数 (RWRI), 将区域水资源供需情况划分为水资源盈余、水资源平衡、水资源短缺 3 种类型, 并进一步细化为 9 种状况, 对每种状况进行分析说明, 以此评价引沁灌区水资源供需平衡状况。【结果】在保证率 $P=50\%$ 的条件下, 2018 年及 2025 年引沁灌区 RWRI 分别为 1.06 和 0.92, 均达到水资源平衡状态, 能够维持正常的生产生活; 在保证率 $P=75\%$ 和 $P=90\%$ 的条件下, 2018 年引沁灌区 RWRI 分别为 1.71 和 2.56, 分别属于高度缺水与极度缺水状况, 2025 年情况有所好转, RWRI 分别为 1.29 和 1.45, 处于轻度缺水及高度缺水状态。【结论】未来引沁灌区水资源供需情况将优于现状, 但仍然无法满足枯水年各部门的用水需求。

关键词: 供需水平衡; 水资源短缺; 引沁灌区; 定额法; 区域水资源供需平衡指数 (RWRI)

中图分类号: TV213.9

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2021587

OSID:



赵维岭, 纪义虎, 左其亭, 等. 区域水资源供需平衡指数分析方法: 以引沁灌区为例[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(3): 128-135.

ZHAO Weiling, JI Yihu, ZUO Qiting, et al. Variation in Balance Between Water Supply and Water Demand in Yinqin Irrigation District[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(3): 128-135.

0 引言

【研究意义】水资源作为世界上最重要的自然资源之一, 对经济社会发展与生态环境保护都起着至关重要的作用^[1]。然而, 随着人类活动、气候变化的加剧, 以及经济社会的迅速发展, 区域水资源供需量呈现出明显的复杂性及不确定性^[2]。在此背景下, 分析不同情景下区域水资源供需平衡状况, 可为其分配及管理提供有力支撑, 以此促进经济社会的稳定发展。

【研究进展】水资源供需平衡分析, 是指对某一区域不同时间段供需水量的关系分析。对区域进行水资源供需平衡分析旨在找出区域水资源供需矛盾与规律, 分析其存在的供需平衡问题, 探讨解决问题的方案^[3]。目前, 国内外对水资源供需平衡分析的研究成果较多。贾宝杰等^[4]采用分项需水量预测法和人口综合需水量指标法, 对湖北省黄石市城区需水量进行了预测,

并对相关用水指标和日用水变化系数等参数进行了合理性分析; 刘鑫等^[5]从考虑工程与不考虑工程 2 个方面分析了袁河流域水资源供需平衡的时空变化, 并重点分析了流域重要城镇所在单元的水资源供需平衡情况; Xia 等^[6]利用建立的多水源多取水口的平原河网水资源供需平衡模型对荆江南岸河网水资源供需平衡进行了计算分析; 刘鑫等^[7]利用建立的区域农业水资源供需预测的 BP 神经网络模型预测了海河流域近期和中期的农业供需水量。【切入点】总体来看, 大多是针对某个流域或地区进行供需水量的计算并分析其特征, 其结果只能对某个地区的水资源供需情况进行说明, 而对不同区域、不同情况下水资源供需盈缺程度差异的量化研究尚不充分, 仍需进一步研究。

【拟解决的关键问题】引沁灌区是豫北地区极其重要的灌区, 在地理位置、农田灌溉条件及作物种植结构等各方面均具有典型代表性, 且灌区内水资源供需平衡问题复杂。为了探究区域水资源供需盈缺程度, 本文以引沁灌区为例, 分别计算灌区 2018 年及 2025 年不同情景下的供需水量, 通过构建并分析其区域水资源供需平衡指数, 揭示灌区水资源的盈缺程度, 以期对灌区不同情景下采取的水资源管理政策提供参

收稿日期: 2021-11-26

基金项目: 国家重点研发计划课题 (2021YFC3200201); 河南省重大公益性项目 (2020-36); 国家自然科学基金项目 (52279027)

作者简介: 赵维岭 (1964-), 男, 高级工程师, 主要从事水利工程管理工作。E-mail: ywzdsxd@126.com

通信作者: 左其亭 (1967-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事水文学及水资源研究。E-mail: zuoqt@zzu.edu.cn

考，为后续水资源供需盈缺程度的研究提供基础。

1 研究区概况及数据来源

1.1 研究区概况

引沁灌区位于河南省西北部，黄河北岸，北起太行山，西跨王屋山，南达北邙岭，北纬 $35^{\circ}15'$ — $34^{\circ}55'$ ，东经 $112^{\circ}25'$ — $112^{\circ}45'$ ，是黄河支流沁河自晋入豫的第一座大型山岭灌区。其位置处于中原城市群的紧密联系圈，位于新-焦-济（南太行）产业发展带上，是中原经济区的重点发展区域，其地理位置见图1。灌区包括15个乡镇、367个行政村（其中小浪底枢纽工程移民村30个），其范围涵盖济源市、孟州市和洛阳市吉利区，共计人口60余万。灌区总土地面积6.79万 hm^2 ，其中耕地面积3.36万 hm^2 ，设计灌溉面积2.67万 hm^2 ，主要农产品有小麦、玉米、果树和瓜菜等。



图1 引沁灌区地理位置

Fig.1 Geographical location map of Yinqin irrigation area

1.2 数据来源

本文所用数据均来自《河南统计年鉴》《河南水资源公报》《中国城乡建设统计年鉴》《灌溉与排水工程设计标准》《河南省国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要》《河南省水资源综合利用规划》及相关部门工作报告等。

2 水资源供需平衡分析及区域水资源供需平衡指数

2.1 区域水平衡分析及水资源供需平衡问题

区域水平衡分析，是对一个地区所有的水资源进行定量化分析计算，包括地表水、地下水、外调水、降水、蒸发等，其主要是对整个区域的水量进行分析计算，以达了解区域总水量及其组成成分的目的。区域水资源供需平衡分析，是更进一步地从各部门角度出发，分析区域的用水结构，是指对某一区域一定时间段内，某一发展水平年和某一保证率的各部门需水量及供水量平衡关系的分析，以理清区域水资源供需现状及存在的问题，以此预测未来区域水资源开发利用的方向及目标，为区域水资源规划的制定提供技术支持。引沁灌区目前的供需矛盾突出且特点鲜明，

急需进行水资源供需平衡分析，其主要问题包括：

1) 用水竞争激烈

引沁灌区是沁河自晋入豫的第一座大型山岭灌区，不仅担负着孟州市、济源市和洛阳市吉利区2.67万 hm^2 农田的灌溉和10余万人的安全饮水任务，还担负着抗旱防汛、工业供水、生态供水、养殖供水和水力发电等任务，灌区内用水竞争异常激烈，存在着严重的供需矛盾问题。

2) 水源工程与灌区发展不匹配

沁河是灌区的主要水源，其引沁渠首工程采用穿沁河倒虹吸利用拴驴泉水电站尾水向灌区供水。由于拴驴泉水电站来水与灌区灌溉时段不匹配，水量不稳，造成用水时水量不足，非用水季节水量下泄入沁河下游，上游来水大于引沁渠输水能力时也下泄入沁河下游，导致水资源供需情况难以预料，给区域水资源分配及管理造成较大影响。

3) 中间调蓄能力差

引沁灌区现状共有大小蓄水池200座，总容量536万 m^3 ，设计灌溉面积0.34万 hm^2 。由于水池未统一管理，缺乏管护，砼板脱落、砼底损坏等问题，目前仅有56座衬砌水池能蓄水灌溉，蓄水量153.34万 m^3 ，实灌面积0.16万 hm^2 ，其余水池因渗漏严重，不能蓄水灌溉，无法发挥效益，不能满足“长藤结瓜”式调蓄灌溉要求，导致部分地区的需水量无法得到满足或发生洪涝灾害。

4) 管理体系有待完善

灌区管理体系存在严重漏洞，无法解决存在的供需矛盾问题，具体包括：中、高级专业技术人员的数量不能满足灌区发展需要的人员结构问题；产权不清、边界不明使得用水管护困难，中间加价加重农民负担影响农民用水积极性，水费收取计量点及单价不精细等管理机制问题；灌区公益性职责大使补偿渠道匮乏，农业供水成本与现行水价相差大，农民承受能力有限、农业水费无法提升导致渠道维修养护困难等供水补偿问题。

2.2 供水量和需水量计算

2.2.1 供水量计算

供水量计算是基于水资源可利用量，在给定的来水条件下，考虑各用水对象的需水要求，通过相关水利工程可以提供的最大水量计算。水资源可利用量是指在可预见的时期内，在统筹考虑生活、生产和生态环境用水的基础上，通过经济合理、技术可行的措施，在流域水资源总量中可一次性利用的最大水量^[8]。其计算方法为当地地表水及地下水资源可利用量之和减去二者之间重复计算量（主要为平原区浅层地下水的渠系渗漏和田间入渗补给量的开采利用部分）。计

算式为^[9]:

$$W=W_1+W_2-W_3, \quad (1)$$

式中: W 为水资源可利用量 (万 m^3); W_1 为地表水资源可利用量 (万 m^3); W_2 为地下水资源可利用量 (万 m^3); W_3 为重复量 (万 m^3)。

地表水资源可利用量计算式为:

$$W_1=k \cdot W', \quad (2)$$

式中: k 为地表水利用系数; W' 为多年平均地表径流量 (万 m^3)。

根据地下水补给模数与灌区内土地面积, 可以确定灌区内地下水可开采量。

$$W_2=m \cdot F, \quad (3)$$

式中: m 为地下水补给模数 (m^3/km^2); F 为灌区内总面积 (km^2)。

2.2.2 需水量计算

本文计算的需水量主要包括农业灌溉需水量、农业其他需水量、工业需水量、城乡综合生活需水量、生态环境需水量 5 个部分^[10]。为了保证能够准确预测引沁灌区需水量, 本文通过预测各用水部门需水定额及其对应的经济社会指标, 采用分类需水定额法进行需水量计算^[11]。

农业灌溉需水量是指从水源经各种渠道向田间输送的灌溉水量, 其计算式为:

$$WA_t=\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^T \left(\frac{I_{j,k} \times F_{i,k}}{F_i} \right), \quad (4)$$

式中: WA_t 为第 t 年农业灌溉需水量 (m^3); $F_{i,k}$ 为第 i 分区第 k 种作物的有效灌溉面积 (km^2); F_i 为第 i 分区所有作物的有效灌溉面积 (km^2); $I_{j,k}$ 为第 j 月份第 k 种作物的灌溉定额 (m^3/km^2); M 为分区数; T 为作物的种类数; N 为 1 a 中的灌溉月数。

农业其他需水量主要包括灌区内散养大小牲畜、集中养猪场、果园以及鱼塘等的需水量, 其计算式为:

$$W_{\text{牧}}=\sum n_i \cdot m_i \cdot 365, \quad (5)$$

$$W_{\text{果}}=\sum a_j \cdot b_j, \quad (6)$$

$$W_{\text{鱼}}=F_{\text{鱼}} \cdot \eta_{\text{鱼}}, \quad (7)$$

式中: $W_{\text{牧}}$ 为第 t 年牲畜需水量 (m^3); n_i 为第 i 种牲畜或家禽头数或只数 (头); m_i 为第 i 种牲畜或家禽需水定额 ($\text{m}^3/(\text{头} \cdot \text{d})$); $W_{\text{果}}$ 为第 t 年果园灌溉需水量 (m^3); a_j 为第 j 种作物的面积 (hm^2); b_j 为第 j 种作物的需水定额 (m^3/hm^2); $W_{\text{鱼}}$ 为第 t 年鱼塘需水量 (m^3); $F_{\text{鱼}}$ 为第 t 年鱼塘面积 (hm^2); $\eta_{\text{鱼}}$ 为鱼塘需水定额 (m^3/hm^2)。

采用万元产值定额法计算引沁灌区工业需水量, 即依据规划期内确定的工业增加值和万元工业增加值用水量, 进行工业需水量的推算预测, 其计算式为:

$$W_{\text{工}}=\lambda \cdot A_t, \quad (8)$$

式中: $W_{\text{工}}$ 为第 t 年工业需水量 (万 m^3); λ 为第 t 年万元工业增加值用水量 ($\text{m}^3/\text{万元}$); A_t 为第 t 年工业增加值 (亿元)。

城乡综合生活需水量计算式为:

$$W_{\text{城乡}}=\sum c_i \cdot d_i \cdot 365, \quad (9)$$

式中: $W_{\text{城乡}}$ 为第 t 年城乡综合生活需水量 (m^3); c_i 为第 i 区的人口; d_i 为第 i 区生活需水定额 ($\text{m}^3/(\text{人} \cdot \text{d})$)。

生态环境需水量主要包括河道生态补水和绿地及环卫公共用水, 河道生态补水采用水力学法, 其根据河流宽度、平均水深、平均流速以及湿周率等指标来评估河流栖息地的保护水平, 从而确定河流需补水量, 具体计算式参考文献[12-13]。绿地及环卫公共需水量计算式为:

$$W_{\text{绿}}=\varepsilon \cdot F_{\text{绿}} \cdot \eta_{\text{绿}} \cdot 365, \quad (10)$$

$$W_{\text{卫}}=\varepsilon \cdot F_{\text{道}} \cdot \eta_{\text{道}} \cdot 365, \quad (11)$$

式中: $W_{\text{绿}}$ 为城镇绿化需水量 (m^3); $W_{\text{卫}}$ 为城镇环境卫生需水量 (m^3); ε 为城镇人口总数; $F_{\text{绿}}$ 为城镇人均绿地面积 (m^2); $F_{\text{道}}$ 为城镇人均浇洒道路面积 (m^2); $\eta_{\text{绿}}$ 为绿化需水定额 ($\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$); $\eta_{\text{道}}$ 为浇洒道路面积需水定额 ($\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$)。

本文 2025 年的人口、工业增加值、设计灌溉面积、牲畜养殖业规模、果园鱼塘面积、作物种植比例等均根据“十三五”、“十四五”发展规划、农业发展规划、城乡发展规划等进行预测, 具体过程不再阐述。

2.3 区域水资源供需平衡指数计算及理论体系

在对引沁灌区水资源供给与需求状况进行评估的基础上, 借鉴生态承载力供需平衡指数^[14], 本文提出区域水资源供需平衡指数 (Regional Water Resources Supply and Demand Balance Index, $RWRI$) 的概念和计算式, $RWRI$ 是指区域需水量与区域供水量的比值, 反映了水资源供给与需求的关系, 其计算式为:

$$RWRI=\frac{WD}{WS}, \quad (12)$$

式中: WD 为区域水资源需求量 (m^3); WS 为区域水资源供给量 (m^3)。

当 $WD < WS$ 时, 区域对水资源的需求小于水资源供给, 区域表现为水资源盈余; 当 $WD > WS$ 时, 区域对水资源的需求大于水资源供给, 区域表现为水资源短缺; 当 $WD = WS$ 时, 区域对水资源的需求等于水资源供给, 区域表现为水资源供需平衡。因此, 根据 $RWRI$ 的大小关系, 可以将区域水资源供需平衡划分为水资源盈余、水资源平衡和水资源短缺 3 种状态类型。基于《旱情等级标准》(SL424—2008) 中区域综合旱情等级判断准则^[15], 以区域农牧业综合旱情等级划分标准为主, 结合历年区域水资源短缺实际情况, 根据各个旱情等级下的旱情指数, 求得对应旱情

等级取值范围下区域的 $RWRI$ 值取值范围，以此作为水资源短缺情况下的 $RWRI$ 值划分标准，水资源盈余状况时水资源的盈余程度则对应相应的水资源短缺状况下水资源短缺程度进行计算，最终将水资源供需平衡状况进一步细分为 9 个级别，基于 $RWRI$ 的区域水资源供需平衡分类（级）评价标准如表 1 所示。

表 1 基于 $RWRI$ 的区域水资源供需平衡分类（级）评价标准

Table 1 Regional water resources supply and demand balance classification (Grade) evaluation standard based on $RWRI$		
类型	水资源状况	$RWRI$
水资源盈余	高度盈余	(0, 0.6]
	中度盈余	(0.6, 0.8]
	轻度盈余	(0.8, 0.9]
水资源平衡	平衡有余	(0.9, 1.0)
	供需平衡	1
	临界短缺	(1.0, 1.2]
水资源短缺	轻度短缺	(1.2, 1.4]
	高度短缺	(1.4, 2.1]
	极度短缺	(2.1, ∞)

基于对区域水资源供需平衡指数的认识，构建区域水资源供需平衡理论体系（图 2）。区域水资源供需平衡是指，以人水和谐、可持续发展思想等为导向，遵循水量平衡、水循环等基本原理，通过节水、水污染治理等多种技术方法，协调多方利益，实现流域内的水量协同分配，使区域水资源状况由水资源盈余及水资源短缺不断向水资源平衡靠拢。其中，根据上文划分的区域水资源供需平衡的 3 种状态类型分别为水资源盈余、水资源平衡和水资源短缺。

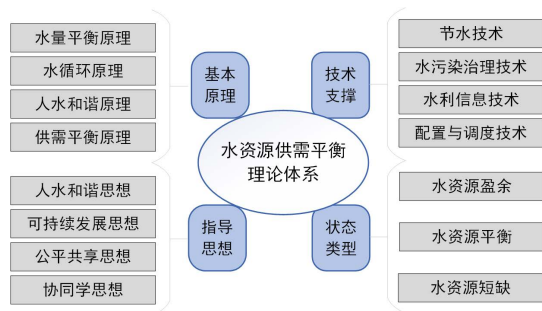


图 2 区域水资源供需平衡理论体系框架

Fig.2 Framework diagram of regional water resources supply and demand balance theory system

水资源盈余状态即区域水资源供给量 $>$ 需求量的状态。当区域处于轻度盈余状况时，区域内土壤含水率较高，可考虑种植用水量高、收益较大的作物，如水稻等，或将水资源储存于水库等调蓄工程中，以应对未来可能出现的旱灾，同时补充地下水；当区域处于中度盈余状况，即供水量超出需水量较多时，为达到防洪目的，调蓄工程中不能储存太多的水，应考虑将区域多余的可供水量外调至其他区域，在避免水资源流失的同时帮助解决其他区域水资源短缺的问题；当区域处于高度盈余状况时，说明可供水量已远大于

需水量，此时可以进一步利用好富裕的水资源，同时应注意洪涝灾害出现，加强防洪工程建设，预防城市内涝，在保证其他区域安全的情况下尽快将水转移。

水资源平衡状态即区域水资源供需关系处在一个相对平衡的状态。区域水资源既不匮乏也不富余，可通过适当调整达到水资源供需平衡。当区域处于平衡有余状况时，其可供水量稍多于需水量，人们的生产、生活皆可得到满足，此时应注意涵养水源，保持湖泊河流水分充足，提高生态环境质量；区域供水量等于区域需水量，供需平衡状况为理想状况，应努力向此状态靠拢；当区域处于临界短缺状况时，区域供水量低于需水量，此时区域内应采取相应的节水措施，提高水资源利用率，各部门共同节水即可满足区域的用水需求。

水资源短缺状态已普遍存在于我国多地区，即区域内水资源供不应求。当区域处于轻度短缺状况时，各部门用水竞争激烈，各部门水资源需求均达不到满足，此时应注意调整用水结构、调整农业种植结构等；当处于高度短缺状况时，区域或将迎来旱灾，此时区域在采取相应节水措施的同时应注意对环境的影响，防止过度开采地下水造成地面沉降、海水入侵等问题，应尽快从其他区域调水以解决水资源短缺问题；当区域处于极度缺水状况时，区域出现大旱，水资源严重匮乏，区域应及时采用紧急措施如“接力”调水，尽快从他处调水维持本区域的必要生产生活，防止河流断流现象频发等生态恶化事件的发生。

3 引沁灌区水资源供需平衡分析

3.1 供水量分析

引沁灌区供水水源主要包括外调水、当地地表水、地下水、非常规水等。

3.1.1 外调水

沁河水可利用量受沁河生态需水量、下游广利灌区取水量（引沁与广利灌区水量按 6:4 分水方案）、河口村水库供水等因素制约。因此，沁河可利用水资源量为根据以上约束条件，扣除不可引用部分，结合渠首无坝引水能力及渠道输水能力、干渠及末端可消纳或调蓄能力综合确定。2009—2018 年多年平均引沁总量为 36 485 万 m^3 ，其中灌区引沁水量为 11 090 万 m^3 。从历年引水情况来看，引沁灌区渠系工程有足够的引水能力满足灌区取用水指标。同时，广利灌区多年平均引沁水量为 10 343 万 m^3 ，与引沁灌区引沁水量（多年平均 15 297 万 m^3 ）基本符合 6:4 分水方案。可见，现状实际引水可以反映不同来水条件下可引沁水量。

因此，从引水量角度进行分析，结合引沁灌区渠

首引水情况,确定灌区多年平均引水量 15 297 万 m^3 ,平水年($P=50\%$)可引水量 14 836 万 m^3 ,枯水年($P=75\%$)可引水量 9 575 万 m^3 ,特枯年($P=90\%$)可引水量 7 855 万 m^3 。同时根据《孟州市产业集聚区自来水厂建设项目可行性研究报告》《河南省小浪底北岸灌区可行性研究报告》等相关成果,规划年灌区内孟州市产业集聚区拟从小浪底引水 10 万 m^3/d ,以配合沁河水、地下水、非常规水等保障产业区生产生活用水。

3.1.2 当地地表水

根据《河南省水资源》,灌区内多年平均径流深为 100 mm,多年平均地表径流量为 6 787 万 m^3 ,目前地表水利用率为 20%,多年平均可利用量为 1 357 万 m^3 。考虑规划年对灌区内小水库、水池进行除险加固、防渗处理等维护改造,地表水可利用量逐年增加,但为响应国家保障生态环境的号召,应控制地表水利用,保障河道生态环境,因此不宜增幅过多,预测至 2025 年,地表水利用率达 30%,多年平均地表水可利用量为 2 036 万 m^3 , $P=50\%$ 保证率下可利用量为 1 975 万 m^3 , $P=75\%$ 保证率下可利用量为 1 609 万 m^3 , $P=90\%$ 保证率下可利用量为 1 181 万 m^3 。

3.1.3 地下水

参照《河南省水资源综合规划》《河南省水资源》《河南省水资源配置》等规划,并结合灌区内地下水开发利用情况,至规划年 2025 年,地下水可开采模数为 9.76 万 m^3/km^2 ,根据式(3)可得, $P=50\%$ 保证率下引沁灌区地下水可开采量为 6 625 万 m^3 , $P=75\%$ 保证率下为 7 288 万 m^3 , $P=90\%$ 保证率下为 8 281 万 m^3 。

3.1.4 非常规水

非常规水主要包括再生水、降水、矿井水等,本文主要考虑再生水资源利用。参照《河南省水资源综合规划》,结合河南省和地方再生水回收利用率,预测 2025 年灌区内再生水利用率为 30%,灌区内再生水可利用量为 703 万 m^3 。

综合以上分析,规划年 2025 年灌区内各来水年可供水总量见表 2。

表 2 引沁灌区可供水量

水平年	保证率 $P/\%$	引沁水/ 万 m^3	黄河水/ 万 m^3	地表水/ 万 m^3	地下水/ 万 m^3	再生水/ 万 m^3	合计/ 万 m^3
2018 年	50	14 836	-	1 317	5 300	-	21 453
	75	9 575	-	1 072	4 081	-	14 728
	90	7 855	-	787	3 021	-	11 663
2025 年	50	14 836	1 440	1 975	6 625	703	25 579
	75	9 575	929	1 609	7 288	703	20 103
	90	7 855	762	1 181	8 281	703	18 782

3.2 需水量分析

3.2.1 农业灌溉需水量

根据灌区农业生产作物种植结构调整情况和作

物的设计灌溉定额,计算引沁灌区农业灌溉净需水量见表 3。由表 3 可知,由于灌溉面积的增加,2025 年平水年和枯水年作物需水量均大于 2018 年,但 2025 年特枯年需水量相对较小,主要由于瓜类灌溉面积的减少使得其特枯年需水量较小。

表 3 灌区农业灌溉需水量

Table 3 Water demand for agricultural irrigation in irrigated areas

水平年	作物	灌溉面积/万 hm^2	平水年/万 m^3	枯水年/万 m^3	特枯年/万 m^3
2018 年	小麦	1.73	3 095	3 657	4 483
	玉米	1.73	2 142	2 506	3 229
	瓜类	0.93	602	625	1 205
	合计	4.40	5 839	6 789	8 917
2025 年	小麦	2.27	3 256	3 943	4 315
	玉米	2.27	2 252	2 733	2 994
	瓜类	0.40	633	783	864
	合计	4.93	6 141	7 458	8 172

3.2.2 农业其他需水量

农业其他用水户主要包括灌区内散养大小牲畜、集中养猪场、果园以及鱼塘等。其中,灌区内牲畜用水主要为散养大、小牲畜,以及集中圈养的养猪场用水,果园、鱼塘分别计算不同保证率下的需水量,计算结果见表 4、表 5。由于牲畜、果园、鱼塘需水定额均不变,2025 年因牲畜数量增多牲畜需水量稍大于 2018 年,而果园、鱼塘需水量均维持不变。

表 4 灌区牲畜需水量

Table 4 Water demand for livestock in irrigated areas

项目	数量/万头		需水定额/ ($\text{L} \cdot \text{头}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)		需水量/万 m^3	
	2018 年	2025 年	2018 年	2025 年	2018 年	2025 年
大牲畜	0.26	0.30	45	45	4.3	5.0
小牲畜	8.94	10.99	15	15	48.9	60.2
集中养猪	16.29	20.03	30	30	178.3	219.3
合计	25.49	31.32	-	-	231.6	284.5

表 5 灌区果园、鱼塘需水量

Table 5 Water demand of orchard and fish pond in irrigated area

水平年	作物	面积/ 万 hm^2	需水定额/ ($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)	需水量/万 m^3		
				平水年	枯水年	特枯年
2018 年	果园	0.184	9.33	386	465	508
	鱼塘	0.073	51.67	853	1 028	1 122
	合计	0.257	-	1 239	1 493	1 630
2025 年	果园	0.184	9.33	386	465	508
	鱼塘	0.073	51.67	853	1 028	1 122
	合计	0.257	-	1 239	1 493	1 630

3.2.3 工业需水量

引沁灌区内工业主要为玉川产业集聚区、孟州产业集聚区及其他工业片区,主要集中在济源和焦作孟州。规划年工业增加值用水量拟结合现状灌区内工业用水指标,并参照《河南省水中长期供求规划》和《河南省水资源综合规划》2 个规划 2030 年指标平均值,综合分析确定 2025 年用水指标,结果如表 6。随着技术水平的提升,灌区内万元工业增加值用水量减少,

但是由于工业增加值的增多，2025 年灌区工业需水量仍大于 2018 年。

3.2.4 城乡综合生活需水量

根据《室外给水设计标准》(GB50013—2018)《城市给水工程规划规范》(GB50282—2016)以及《河南省地方标准-工业与城镇生活用水定额》(DB41/T385—2020),结合现状用水水平,预测 2025 年城乡综合生活需水量,结果如表 7。2025 年人口及需水定额都有所提升,使得 2025 年需水量大于 2018 年,其中,农村需水定额提升较小,且小于城镇需水定额,但由于农村人口较多,农村需水量仍大于城镇需水量。

表 6 灌区内工业需水量

Table 6 Industrial water demand in irrigated area					
水平年	工业增加值/	万元工业增加值用水量/(m ³ ·万元 ⁻¹)			需水量/ 万 m ³
	亿元	济源	孟州	吉利	
2018 年	242.4	17.9	22.9	22	4 984
2025 年	389.2	15	18	18	6 469

3.2.5 生态环境需水量

生态环境需水量包括河道生态补水和绿地及环卫公共用水。引沁灌区内主要河道为北潞河、五指河、泥沟河、大柴河等 14 条主要河道,其河道生态补水

量为 260 万 m³,拟每年在枯水期补水 4 次,河道生态净需水总量为 1 040 万 m³。根据《城市用地分类与规划建设用地标准》(GB50137—2011),规划人均绿地面积不应小于 10 m²,规划人均交通设施面积不应小于 12 m²。结合灌区内城乡发展综合规划及实际情况,预测 2025 年人均绿地面积为 10 m²,浇洒道路面积 11.5 m²,经计算,2018 年灌区内绿地及环卫公共需水量为 202 万 m³,2025 年灌区内绿地及环卫公共净需水量为 305.2 万 m³。

表 7 灌区城乡综合生活需水量

Table 7 Comprehensive water demand for urban and rural living in irrigated areas						
项目	人口数量/万人		需水定额/ (L·人 ⁻¹ ·d ⁻¹)		需水量/万 m ³	
	2018 年	2025 年	2018 年	2025 年	2018 年	2025 年
城镇	18.45	19.45	84/80	100	554	710
农村	43.05	45.38	67/60	70	1 007	1 159
合计	61.5	64.83			1 561	1 869

注“84/80”表示济源城镇需水定额为 84 L/(人·d),孟州、吉利城镇需水定额为 80 L/(人·d);“67/60”表示济源农村需水定额为 67 L/(人·d),孟州、吉利农村需水定额为 60 L/(人·d)。

综合以上需水量分析成果,汇总计算得 2025 年引沁灌区各保证率下的净需水总量,见表 8。

表 8 灌区净需水总量

Table 8 Total net water demand in irrigated areas									
水平年	保证率 P/%	生产需水量/万 m ³			城乡综合生活 需水量/万 m ³	生态需水量/万 m ³			合计/万 m ³
		农业灌溉 需水量	工业 需水量	小计		河道生态 补水需水量	绿地及环卫 公共需水量	小计	
2018 年	50	7 311	4 984	12 295	1 561	850	202	1 052	14 907
	75	8 514	4 984	13 498	1 561	850	202	1 052	16 111
	90	10 779	4 984	15 763	1 561	850	202	1 052	18 376
2025 年	50	7 665	6 469	14 134	1 869	1 040	305.2	1 345.2	17 349
	75	9 235	6 469	15 704	1 869	1 040	305.2	1 345.2	18 918
	90	10 086	6 469	16 555	1 869	1 040	305.2	1 345.2	19 769

根据区域水资源供需水量的计算,参照典型输水线路,逐级考虑输水损失,通过计算的净需水量及水资源利用系数计算灌区毛需水量^[16]。其中,灌溉水利用系数均为 0.8;引沁水供生活、工业及生态水资源利用系数为 0.8;地下水供农业灌溉水利用系数为 0.85,地下水供工业水资源利用系数为 0.9;地表水供农业灌溉水利用系数 0.68;再生水供工业和生态水资源利用系数 0.8;黄河水供孟州产业集聚区水资源利用系数为 0.8。

3.3 区域水资源供需平衡指数计算结果及分析

图 3 为引沁灌区不同水平年不同保证率下的供水量和需水量。根据图 3 可知,2025 年引沁灌区供水量与需水量较 2018 年均有所上升,2018 年 3 种保证率下灌区皆处于缺水状态,其缺水量分别为 1 185 万、10 428 万、18 232 万 m³。而 2025 年 P=50%保证率下供水量可满足灌区需水量,P=75%及 P=90%保证率下也属于缺水状态,其缺水量分别为 5 837 万、8 469

万 m³。由此可知,2025 年灌区整体情况优于 2018 年,水平年 2025 年可满足灌区用水而 2018 年无法满足,枯水年与特枯年灌区的用水均无法得到满足。

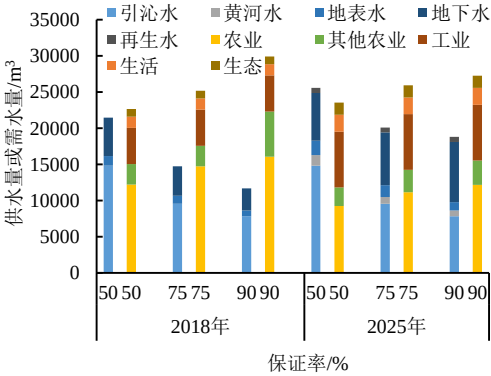


图 3 2018、2025 年不同情景下引沁灌区供(需)水量

Fig.3 Water supply (demand) of the Yinquin irrigation area under different scenarios in 2018 and 2025
分别计算 2018 年及 2025 年不同保证率下引沁灌区区域水资源供需平衡指数,如图 4 所示。从图 4 中

可以看出, 2018 年引沁灌区在各种情况下均处于水资源短缺的状况, 主要原因是农业灌溉水利用效率较低, 且 2018 年由于部分蓄水池不能参与调节作用, 使得地表水可利用量也较低。2018 年 $P=50\%$ 保证率下, 灌区区域水资源供需平衡指数为 1.06, 属于水资源平衡类型, 尽管无法完全满足灌区水资源需求, 但对灌区正常的生产生活几乎不造成影响。而在 $P=75\%$ 及 $P=90\%$ 的保证率下, 灌区已进入水资源短缺状态, 尤其是 $P=90\%$ 的保证率下, 此时灌区区域水资源供需平衡指数高达 2.56, 已经达到水资源极度短缺状态, 此时灌区内无论是生产生活还是生态环境用水都面临极大的挑战, 已无法维持人们的正常活动。

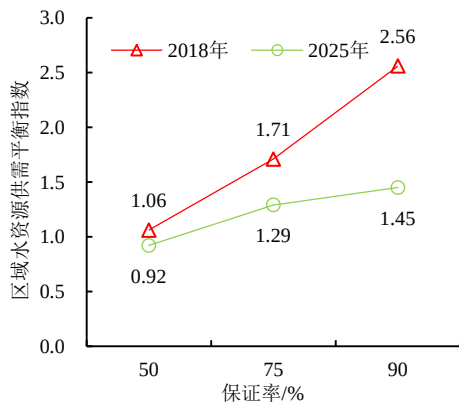


图 4 2018、2025 年不同保证率下
引沁灌区区域水资源供需平衡指数

Fig.4 Water resources supply and demand balance index in
2018 and 2025 at different frequencies
in the Yinquin Irrigation area

2025 年可以保证 $P=50\%$ 保证率下的用水需求, 其区域水资源供需平衡指数为 0.92, 在满足灌区用水需求后尚有盈余, 灌区内水资源配置优先考虑配置引沁水、黄河水、当地地表水、再生水后, 地下水尚有开发利用空间, 对于涵养地下水, 保护地下水环境具有一定的积极作用, 可将地下水作为战略储备水源。但是在 $P=75\%$ 、 $P=90\%$ 保证率下, 灌区仍有不同程度的缺水, 尽管如此, 2025 年 $P=75\%$ 、 $P=90\%$ 保证率下灌区只属于轻度、高度缺水状态, 离水资源极度短缺状态相距较远。

4 讨论

传统的水资源供需平衡分析多数为计算一个地区水资源的供给量与需求量, 以此得出具体的缺水数值或缺水率^[17-18], 如杨阳等^[3]以庆阳市城市水资源现状为研究对象, 对水资源进行了供需平衡分析, 最终得出结论如“在 $P=50\%$ 的情况下, 2020 年除环县外, 其余各县区均达到需水量要求, 并且均有余水量, 不存在缺水现象”等, 这种分析可以得出地区是否缺水

以及缺水多少, 但无法得知地区盈余及缺水程度如何, 各地区相对差距有多大等问题。

本文通过计算区域水资源供需平衡指数, 得出平水年引沁灌区 2018 年及 2025 年均处于水资源平衡状态, 而枯水年与特枯年尽管 2 a 都处于水资源短缺状态, 但 2025 年处于轻度缺水与高度缺水状况, 而 2018 年则处于高度缺水和极度缺水状况, 由此得出水资源短缺(盈余)程度的结果, 如文献[3]若通过计算区域水资源供需平衡指数, 可以得到相关结论如: 在 $P=50\%$ 的情况下, 2020 年华池县余水量为 16.37 万 m^3 , 供需平衡指数为 0.93, 处于平衡有余状态, 此时应注意涵养水源, 提高生态环境质量等。由此可见, 通过计算区域水资源供需平衡指数, 不仅可以明确不同情况下区域水资源的供需水盈亏状况, 还可以得知区域水资源盈余(短缺)的程度, 以此来确定水资源分配情况并及时采取不同措施应对不同程度的水资源盈余(短缺)。同时, 在进行多个地区水资源供需平衡分析时, 还可以通过计算区域水资源供需平衡指数, 对比不同年份不同地区的水资源供需平衡状况。

本文仅提出了区域水资源供需平衡指数的概念及计算方法, 并划定了评价标准和解释其含义, 然而, 其标准的划分较为粗糙, 未来应进一步完善。同时, 文章只计算了引沁灌区 1 个区域 2 a 的不同情景下的 $RWRI$, 研究区较少, 时间尺度较短, 需进一步对不同流域或省区等的长系列供需水情况进行分析, 以进一步完善区域水资源供需平衡指数体系。

5 结论

1) 2018 年 $P=50\%$ 保证率下, 灌区 $RWRI$ 为 1.06, 达到水资源平衡状态, 可维持正常生产生活; $P=75\%$ 及 $P=90\%$ 保证率下灌区 $RWRI$ 为 1.71 和 2.56, 水资源短缺极其严重。

2) 2025 年 $P=50\%$ 保证率下, 灌区 $RWRI$ 为 0.92, 达到平衡有余状态, 可适当涵养地下水资源; $P=75\%$ 及 $P=90\%$ 保证率下灌区 $RWRI$ 分别为 1.29 和 1.45, 属于轻度缺水状态, 可适当调整灌区用水结构以满足灌区用水需求。

参考文献:

- [1] 穆瑾, 赵翠薇. 变化环境下 2000—2015 年贵阳市水资源脆弱性评价[J]. 长江科学院院报, 2019, 36(9): 12-17, 28.
MU Jin, ZHAO Cuiwei. Assessment of water resources vulnerability in Guiyang City from 2000 to 2015 under changing environment[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, 36(9): 12-17, 28.
- [2] 左其亭, 吴泽宁. 基于风险的黄河流域水资源可再生性评价指标[J]. 人民黄河, 2003, 25(1): 38-40.
ZUO Qiting, WU Zening. Evaluation index of water resource renewability based on risk in Yellow River Basin[J]. Yellow River, 2003, 25(1): 38-40.
- [3] 杨阳, 胡爱萍. 庆阳市水资源现状及供需平衡分析[J]. 灌溉排水学

- 报, 2018, 37(S1): 100-103.
- YANG Yang, HU Aiping. Supply-requirement analysis and regional status water resource of Qingyang[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(S1): 100-103.
- [4] 贾宝杰, 何淑芳, 黄苗, 等. 城市水资源供需平衡与用水合理性分析: 以湖北省黄石市城区为例[J]. 人民长江, 2021, 52(S1): 81-84.
- JIA Baojie, HE Shufang, HUANG Zhuo, et al. Analysis of water supply and demand balance and water utilization rationality of urban water resources: Case of Huangshi City, Hubei Province[J]. Yangtze River, 2021, 52(S1): 81-84.
- [5] 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.
- [6] XIA W, LIU L G, ZHANG Z L, et al. Study on calculation method of water resources supply and demand balance in plain river network area[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018, 153: 062 057.
- [7] 刘鑫, 王素芬, 康健, 等. 区域农业水资源供需平衡分析[J]. 灌溉排水学报, 2014, 33(S1): 320-324.
- LIU Xin, WANG Sufen, KANG Jian, et al. Analysis of supply-demand balance of regional agricultural water resources[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2014, 33(S1): 320-324.
- [8] 全国水资源综合规划编制工作领导小组办公室. 全国水资源综合规划编制工作文件[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.
- [9] 王健生, 钟华平, 耿雷华, 等. 水资源可利用量计算[J]. 水科学进展, 2006, 17(4): 549-553.
- WANG Jiansheng, ZHONG Huaping, GENG Leihua, et al. Available water resources in China[J]. Advances in Water Science, 2006, 17(4): 549-553.
- [10] 张礼兵, 喻海閔, 金菊良, 等. 基于联系数的大型灌区水资源空间均衡评价与优化调控[J]. 水利学报, 2021, 52(9): 1 011-1 023.
- ZHANG Libing, YU Haiguan, JIN Juliang, et al. Evaluation and optimal regulation of spatial equilibrium of water resources in large irrigation area based on connection number[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(9): 1 011-1 023.
- [11] 巩琳琳, 黄强, 王光社, 等. 陕西省 2020 年需水预测研究[J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(5): 169-173.
- GONG Linlin, HUANG Qiang, WANG Guangshe, et al. Forecast of water requirement of Shaanxi Province in 2020[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2008, 22(5): 169-173.
- [12] LAMB B L. Quantifying instream flows: matching policy and technology[M]. Covelo, California: Island Press, 1989.
- [13] MOSLEY M P. Analysis of the effect of changing discharge on channel morphology and instream uses in a Braided River, Ohau River, New Zealand[J]. Water Resources Research, 1982, 18(4): 800-812.
- [14] 刘东, 封志明, 杨艳昭. 基于生态足迹的中国生态承载力供需平衡分析[J]. 自然资源学报, 2012, 27(4): 614-624.
- LIU Dong, FENG Zhiming, YANG Yanzhao. Ecological balance between supply and demand in China using ecological footprint method[J]. Journal of Natural Resources, 2012, 27(4): 614-624.
- [15] 中国水利水电科学研究院. 旱情等级标准 SL424—2008[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
- [16] 崔远来, 谭芳, 王建漳. 不同尺度首尾法及动水法测算灌溉水利系数对比研究[J]. 灌溉排水学报, 2010, 29(1): 5-10.
- CUI Yuanlai, TAN Fang, WANG Jianzhang. Comparison of irrigation efficiency under different scales[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2010, 29(1): 5-10.
- [17] 赵晓涛. 惠惠渠灌区水资源供需预测及供水风险评价[J]. 水电能源科学, 2022, 40(8): 54-57, 197.
- ZHAO Xiaotao. Water resources supply and demand prediction and water supply risk assessment in Jinghui Canal Irrigation area[J]. Water Resources and Power, 2022, 40(8): 54-57, 197.
- [18] 王旻, 尹少华, 卢丽帆. 缺水型城市水资源供需匹配的模拟和预测: 以甘肃省兰州市为例[J]. 经济地理, 2020, 40(2): 89-96.
- WANG Min, YIN Shaohua, LU Lifan. Simulation and prediction of water supply and demand matching in water-deficient cities: A case study of Lanzhou City of Gansu Province[J]. Economic Geography, 2020, 40(2): 89-96.

Variation in Balance Between Water Supply and Water Demand in Yinqin Irrigation District

ZHAO Weiling¹, JI Yihu², ZUO Qiting^{2, 3*}, FU Yunyu¹

(1. Henan Yubei Water Conservancy Engineering Administration Bureau, Xinxiang 453002, China;

2. School of Water Conservancy Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;

3. Henan International Joint Laboratory of Water Cycle Simulation and Environmental Protection, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: 【Objective】Understanding water demand and water availability in a region is fundamental to securing its sustainable development. Taking Yinqin irrigation district as an example, this paper analyzes the balance between water supply and water demand in attempts to help improve regional water resources management. 【Objective】The quota method and the related development planning forecast were first used to evaluate the variation in water supply and demand from 2018 to 2025 under different conditions. We then introduced a supply-demand water balance index (*RWRI*) and classified the balance into three types: water surplus, in balance, and water shortage. The *RWRI* was further divided into nine conditions. All these were used to evaluate the balance between water supply and demand in the district under different conditions. 【Result】When the required water guarantee is 50%, *RWRI* in the district in 2018 and 2025 is 1.06 and 0.92, respectively, indicating that water supply and demand are in balance and water can support normal activities. When the required guarantee is increased to 75% and 90%, however, *RWRI* in the district is 1.71 and 2.56, representing high and extreme water shortage, respectively. These will be improved in 2025, with the associated *RWRI* being 1.29 (75% guarantee rate) and 1.45 (90% guarantee rate), indicating mild and high water shortage, respectively. 【Conclusion】Water supply and demand in Yinqin irrigation area is expected to improve in the future, though it is unlikely to meet the demand of all sectors for water, especially in dry years.

Key words: water balance between supply and demand; shortage of water resources; Yinqin irrigation area; quota method; regional water resources supply and demand balance index (*RWRI*)

责任编辑: 白芳芳