

面向生态健康的农业节水潜力评价框架

刘 宽^{1,2,3}, 翟家齐², 赵 勇², 董义阳^{2,4}, 张龙龙², 李 星²

- (1. 天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072;
2. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038;
3. 南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029;
4. 中国长江三峡集团有限公司科学技术研究院, 北京 100038)

摘要:提出了面向生态健康的农业节水潜力评价框架,并以宁夏引黄灌区为例评价了面向生态健康的农业节水潜力。以地下水水位作为生态水位刚性约束条件,确定宁夏引黄灌区地下水生态水位为 2.5 m;以生态水位为刚性约束,确定考虑生态健康的宁夏引黄灌区取水节水潜力为 5.40 亿 m³,耗水节水潜力仅为 1.40 亿 m³,耗水节水潜力中农田耗水节水量占 92%,自然生态耗水节水量占 8%;若灌区采取更高强度的节水措施,自然生态系统或将难以维持稳定,不利于灌区的可持续发展。

关键词:农业节水潜力;取水节水;尺度效应;水循环模型;生态健康阈值;宁夏引黄灌区

中图分类号:S274 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2025)06-0217-10

Assessment framework of agricultural water-saving potential for ecological health//LIU Kuan^{1,2,3}, ZHAI Jiaqi², ZHAO Yong², DONG Yiyang^{2,4}, ZHANG Longlong², LI Xing² (1. *State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China*; 2. *State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China*; 3. *State Key Laboratory of Hydrology, Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*; 4. *Science and Technology Research Institute, China Three Gorges Corporation Limited, Beijing 100038, China*)

Abstract: The study proposed an assessment framework for agricultural water-saving potential oriented toward ecological health, and evaluated the agricultural water-saving potential for ecological health in the Ningxia Yellow River Irrigation District as a case study. Taking groundwater level as a rigid constraint for ecological water level, we determined the ecological groundwater level of the study area to be 2.5 m. With this ecological water level as a rigid constraint, the water intake-saving potential considering ecological health in the irrigation district was identified as 540 million m³, while the water consumption-saving potential was only 140 million m³. Among the water consumption-saving potential, farmland water consumption savings accounted for 92%, and natural ecological water consumption savings accounted for 8%. If the irrigation district adopts higher-intensity water-saving measures, the natural ecosystem may struggle to maintain stability, which is not conducive to the sustainable development of the irrigation district.

Key words: agricultural water-saving potential; water extraction savings; scale effect; water cycle model; ecological health threshold; the Ningxia Yellow River Irrigation District

随着全球气候变化加剧与人口的持续增长,水资源短缺已成为全球性的问题,特别是在干旱和半干旱地区。我国西北干旱区作为典型的水资源匮乏区域,水资源总量仅占全国的 5%,人均水资源量仅为全国平均的 68%^[1-2],因此,合理利用有限的水资源对保障西北干旱区自然生态稳定及社会经济可持续发展具有重要意义。

农业是西北干旱区的支柱产业之一,然而该地

区农业用水量大且利用率低,大力发展农业节水、提高农业灌溉水利用率,已成为缓解当地水资源供需矛盾的重要方式之一。为明确灌区农业节水潜力,相关学者围绕灌区农业及社会经济可持续发展的需求,开展了一系列农业节水潜力评价研究,如可回收水量与不可回收水量^[3]、毛节水潜力与净节水潜力^[4]、有益灌溉效率^[5]以及工程型、效率型、结构型^[6]和理论节水潜力^[7]等。在模型与措施研究方

面,Zhang 等^[8]构建了集成农业水管理优化模型,通过耦合种植结构调整与地表水-地下水联合调度,提出主动节水与被动节水情景下的节水效应量化方法;Yan 等^[9]研究指出,综合应用工程与农艺节水措施可显著提升农业节水潜力;Gao 等^[10]则基于水足迹理论,在蓝水节水潜力的基础上,进一步提出了绿水节水潜力的概念。

农业节水措施的实施,将显著改变西北灌区水循环过程,导致地下水水位持续下降^[11]。例如内蒙古河套灌区^[12]、宁夏青铜峡灌区^[13]的地下水埋深正在逐年增加,直接影响了湖泊湿地的水量补给与植被生态的稳定生长发育。一方面,灌区农业适度节水有助于提升用水效率;另一方面,过度节水将引发灌区内天然生态退化及湖泊湿地消亡^[14],进而威胁灌区的可持续发展。地下水生态水位作为约束生态健康的关键阈值,学者们已对其提出了多种评价方法^[15]。由此可见,农业节水潜力评价中,除需考虑农作物自身需水外,还应纳入维持灌区生态稳定所需水量^[16]。

本文在传统灌区农业节水潜力计算方法的基础上,从灌区的水循环视角解析灌区农业节水机理与生态约束机理,进而提出面向生态健康的农业节水潜力评价框架。以宁夏引黄灌区为研究区,在综合考虑灌区水循环全过程及维持天然植被健康的前提下,对该灌区的农业节水潜力展开评价。

1 面向生态健康的农业节水潜力概念与评价框架

1.1 农业节水对生态的影响机制

灌区水循环系统是在长期人类活动影响下形成的稳定的自然-人工复合系统,并相应衍生出伴生的灌区生态系统。灌区农业节水措施类型多样,不同

节水措施的实施对灌区水循环系统产生了不同的影响机制。农业节水的实质目标是减少灌区水循环过程中的各类无效损耗,提高农作物水分利用效率。现有灌区节水措施和方法大多围绕作物节水灌溉展开,不同节水措施及其水循环影响机制如表 1 所示。

灌区引水过程主要包括取水输水、田间耗用水和农田排水 3 个主要环节,节水措施则主要集中在前两个环节。不同的节水措施通过对水循环中的入渗和蒸发过程进行人为干预,可以减少无效渗漏和蒸散发水量,从而实现节水的目的。然而,从灌区水循环全过程来看,农业节水措施不仅影响其各个环节,还将改变地下水的补给机制,如图 1 所示(图中黄色表示节水措施,黑色表示自然水循环过程,红色表示受人类活动影响的灌区水循环过程;实线表示灌区水分输入过程,虚线表示灌区水分输出过程)。例如,在输水环节,渠系衬砌节水技术减少了渠系渗漏对土壤水的补给,造成包气带水分补充不足,进而减少了对地下水的补给量,引起地下水水位下降;在田间用水环节,种植结构调整、高效节水灌溉等措施直接改变了作物耗用水的时空分布特征,降低了根土层土壤含水率,虽然提高了田间水利用效率,却减少了土壤水入渗量,使得灌区地下水水位逐渐下降。这些变化导致灌区水循环周期与结构发生了显著改变。

干旱区生态系统极其脆弱,植被与湖泊湿地是反映其生态状况的重要指标,地下水则是维持干旱区生态稳定的关键水源^[17]。灌区持续高强度的节水导致地下水补给量减少,水位持续下降,对于典型的地下水依赖型生态系统干旱区^[18],地下水水位下降将直接改变陆面生态系统功能,使节水措施对灌区植被生态造成威胁。适宜的地下水水位埋深是维持灌区植被生态稳定、避免退化与演替的关键指标,地下水水位过高时,植被会遭受盐分胁迫;地下水水

表 1 不同节水措施及其水循环影响机制

Table 1 Various water-saving measures and their water cycle impact mechanisms			
作用环节	节水措施	措施类型	影响机制
取水 输水	渠道衬砌	工程	减少渠道渗漏,缩短输水时间,减少蒸发损耗
	输水调度	管理	缩短输水时间或扩大供水范围,减少渠道渗漏、蒸发损耗
田间 耗用水	喷灌、微灌	工程	减少田间土壤蒸发、渗漏损失,减少排水
	地膜覆盖、秸秆覆盖	农艺	减少田间土壤蒸发
	激光平地、土地整理	工程	缩短田间灌水时间,减少土壤蒸发渗漏损失
	灌溉制度优化	管理	减少田间灌溉水量或蒸发渗漏水量,减少排水
	非充分灌溉	管理	减少田间灌溉水量,减少蒸发渗漏水量
	冬灌制度优化	管理	减少冬灌水量,减少蒸发渗漏水量及排水量
	种植结构	管理	结构上减少灌溉水量与耗水量
	休耕措施	管理	结构上减少灌溉水量与耗水量
	水价等管理措施	管理	刺激农民减少灌溉水量,从而减少蒸发渗漏水量及排水量
农田 排水	排水沟疏通	工程	主要目的是防治涝渍及盐碱化,及时排水,降低地下水水位,客观上起到减少区域潜水蒸发消耗作用
	排水再利用	工程	属于回归水再利用,提高水资源利用效率

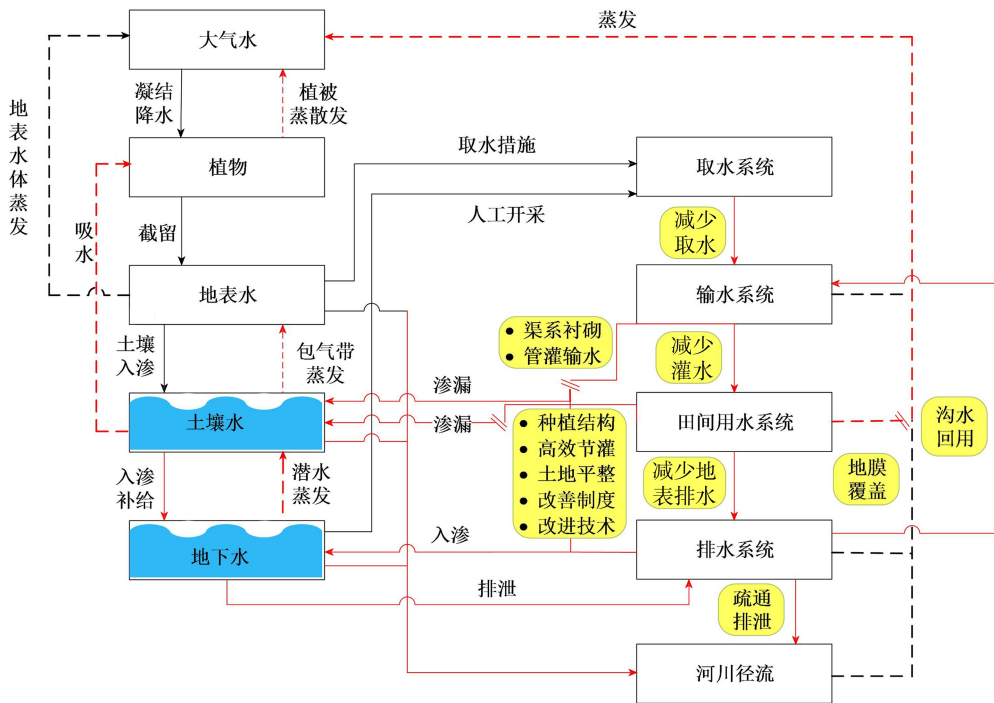


图 1 灌区节水措施对水循环过程影响

Fig. 1 Impact of water-saving measures in irrigation districts on water cycle processes

位过低时,植被易受水分胁迫而枯萎死亡。生态水位为维持植被正常生长的地下水水位(图 2),是干旱灌区水资源可持续利用、维持生态环境健康及地下水稳定的重要阈值,更是保障灌区生态稳定、实现经济社会可持续发展的关键约束条件。

1.2 面向生态健康的农业节水潜力概念与指标

传统农业节水潜力往往仅关注取水与作物耗水的节约空间,未统筹水循环全过程中天然植被的需水,将灌区内全部渠系渗漏及田间渗漏水量视为可节约水量,但这部分渗漏水以地下水为流通方式输送至灌区及周边天然生态区域,是天然生态的唯一稳定水源^[19]。

基于此,本文提出的面向生态健康的农业节水潜力的概念为:以灌区为研究尺度,在保障灌区农作物用水需求及生态稳定的前提下,灌区采取可行的综合节水方案,相较于现状所能减少的最大节水量,其评价指标包括取水节水量和耗水节水量两类,分别对应灌区面向生态健康的农业取水节水潜力与耗水节水潜力。

1.3 面向生态健康的农业节水潜力评价框架

本文提出的面向生态健康的灌区农业节水潜力评价框架如图 3 所示,包括 4 个方面的内容:①水循环模型。采用自主开发的分布式水循环模型——水资源分配与循环模型(water allocation and cycle model, WACM)构建灌区水循环模型,模拟灌区水循环全过程。②生态水位约束。通过文献调研及野外实地调查,确定灌区内陆面典型植被维持生态稳定所需的生态水位。③农业节水情景方案设置。设置灌区基准情景与不同农业节水方案(渠系衬砌/种植结构调整以及高效节水灌溉等),制定灌区未来可行的节水组合方案集。④生态约束下的潜力评

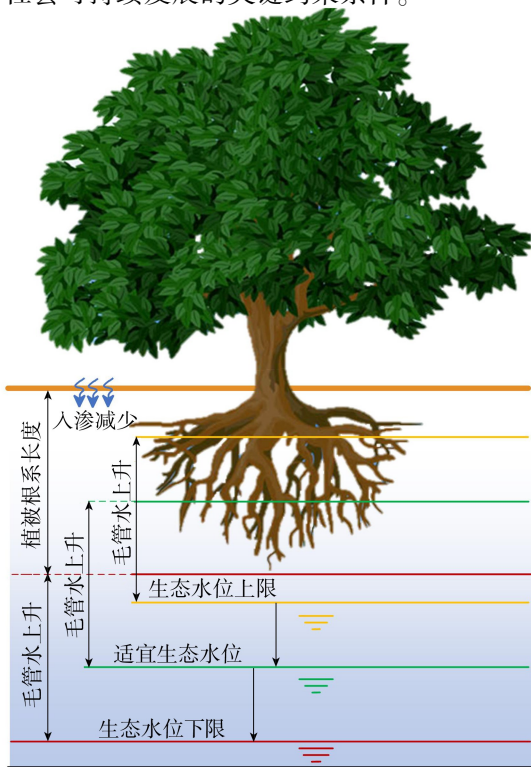


图 2 干旱区植被与地下水水位关系及关键阈值

Fig. 2 Relationship between vegetation and groundwater level and key thresholds in arid areas

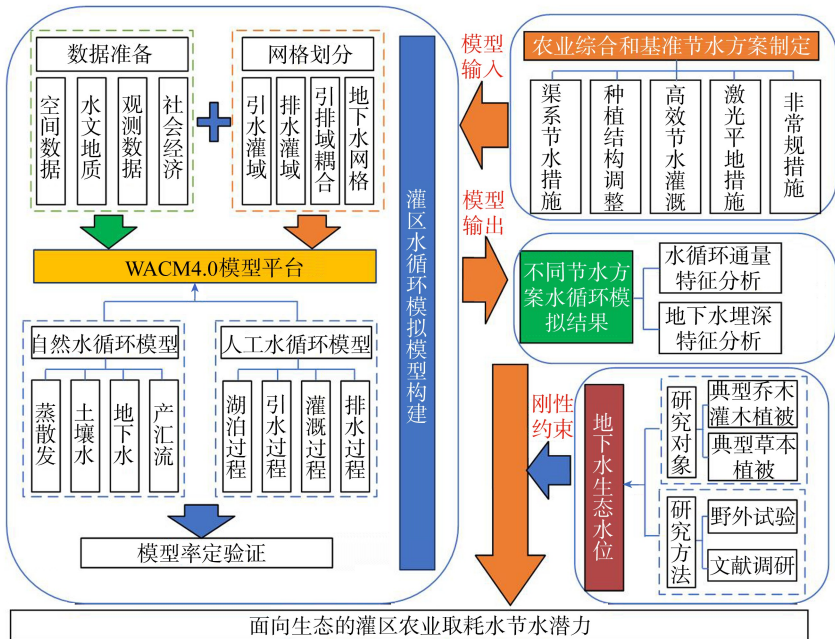


图3 面向生态健康的农业节水潜力评价框架

Fig. 3 Assessment framework of agricultural water-saving potential for ecological health

估。以生态水位为约束条件,模拟不同节水情景方案,确定灌区基于基准情景下考虑生态健康的取水与耗水节水潜力。

生态水位阈值是关键约束条件,具体而言,模型在模拟水循环过程中,通过设置地下水水位边界条件,判断灌区地下水埋深是否低于生态水位阈值。情景模拟过程中,模型首先运行基准情景,获取现状地下水埋深分布;随后对不同农业节水情景进行模拟,输出各情景下的地下水埋深、取水量及耗水量,最终仅保留满足生态水位的情景,排除导致地下水水位超限的高强度节水情景,进而明确满足生态水位约束条件下的最大节水潜力,实现水循环模型与生态水位阈值的动态耦合,确保节水潜力计算兼顾农业节水效益与生态健康。

2 实例分析

2.1 研究区概况

宁夏引黄灌区位于宁夏北部,面积为 10712 km², 占全区总面积的 16.14%, 涵盖青铜峡灌区 (5858 km²)、卫宁灌区 (1442 km²) 及周边过渡带 (图 4)。该地区水资源严重短缺,长期依赖黄河引水满足用水需求,在黄河流域 9 省(区)中水资源压力最为突出^[20]。长期以来,灌区形成了独具特色的引水与排水系统。目前,灌区集中了宁夏总人口的 73.5%,GDP 占全区的 5.9%。20 世纪 90 年代以来,灌区的水资源利用格局发生了显著变化。供(引)水量持续下降,供水总量由 1998 年的 94 亿 m³ 减少至 2023 年的 58.03 亿 m³,其中引黄水量占比

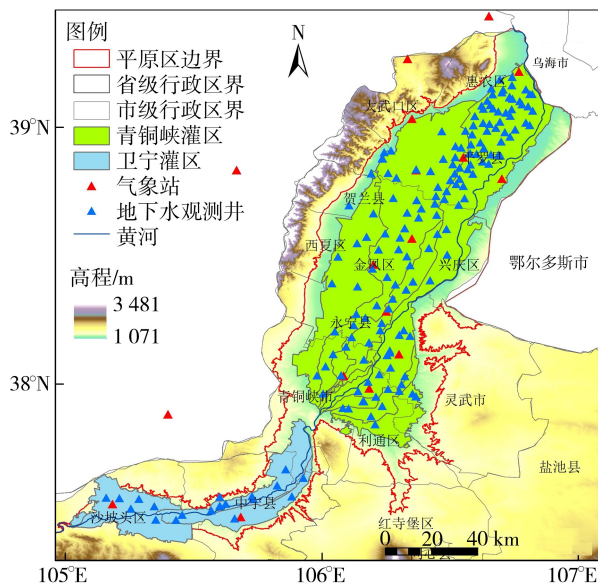


图4 研究区概况

Fig. 4 Overview of the study area

超过 90%,从 86.6 亿 m³ 降至 53.32 亿 m³,地下水开采量基本稳定在 3.6 亿 m³ 左右,再生水利用率仍处于较低水平。用水结构以农业用水为主(占比超 87%)。2023 年农业用水量为 50.81 亿 m³,较 1998 年下降 42%;工业用水量下降了 69%,降为 1.81 亿 m³;生活用水量则增至 2.68 亿 m³,增长了 1.33 倍。年均耗水量约为 34.07 亿 m³,耗水峰值出现在 2005 年(39.18 亿 m³),此后呈逐步下降趋势,2023 年为 34.99 亿 m³。受节水技术推广及黄河水资源调水的影响,排水量由 1998 年的 51.89 亿 m³ 降至 2023 年的 17.19 亿 m³,降幅达 67%。总体来看,宁夏引黄灌区呈现用水效率不断提升、节水能力持续

增强、生态环境管理日益强化的可持续发展态势。良好。

2.2 模型构建及验证

采用 WACM 对宁夏引黄灌区水循环过程进行模拟。该模型在强人类活动影响区域具有显著的模拟能力,已先后应用于海河流域^[21]和内蒙古河套灌区^[22]等人类活动剧烈区域的水循环精细化模拟,积累了丰富的模拟经验。WACM 主要包括降水、蒸发、产流、土壤水运动、坡面汇流与河道汇流、引排水过程、农田用水过程、工业与生活耗水过程、植被生长、湖泊湿地动态以及地下水运动等核心模块。其中,产流过程基于 Horton 下渗原理进行模拟;坡面汇流与河道汇流采用运动波方程求解;土壤水运动则采用 3 层土壤结构,并结合非饱和达西定律进行描述,具体方法见文献[23]。

2.2.1 数据说明

构建宁夏引黄灌区水循环模型需要的基础数据包括灌区的数字高程模型 (DEM)、土地利用类型及其分布 (LUCC) 等,如表 2 所示。

在模型单元划分方面,引水区划分为 265 个计算单元,排水区划分为 539 个单元,通过引水与排水区的空间叠加,共生成 1 850 个引排水复合单元。为兼顾地表水与地下水的耦合模拟需求,以 1 km² 为网格单元对研究区进行离散化处理,最终得到 10 712 个计算网格。

2.2.2 模型验证

宁夏引黄灌区 WACM 验证采用各市、县水面蒸发观测数据、主要排水沟排水监测数据以及地下水位连续观测数据,验证期为 2008—2017 年。模型性能评估选用纳什效率系数 (N)、相关系数 (R^2) 和相对误差 (R_e) 作为评价指标。

a. 水面蒸发验证结果见图 5(a),可见 $R^2 > 0.90$, $N > 0.79$, $R_e < 13\%$,表明水面蒸发精度较高。

b. 排水沟验证结果见图 5(b)。采用排水干沟长系列月流量过程数据对模型进行验证,可见 $R^2 > 0.7$, $N > 0.6$, $R_e < 19\%$,模拟精度较高,模型表现

c. 地下水埋深验证结果见图 5(c),观测井 A 平 5-6 模拟精度较好,全部站点 $R^2 > 0.77$, $N > 0.55$, $R_e < 18\%$,模拟效果一般。考虑到宁夏引黄灌区地表水和地下水交互较为频繁,因此总体而言结果较为可靠。同时,对 2017 年 6 月地下水模拟结果进行对比验证,结果表明模型能够较好地反映实际地下水埋深的空间分布特征,见图 5(d)。

2.3 生态水位阈值

宁夏引黄灌区属于典型的地下水依赖型生态系统,维持该地区天然生态健康需要确定适宜的生态水位。干旱区典型植被主要包括灌木与草本植物,其中怪柳、白刺和骆驼刺为灌木类典型植被,芦苇和芨芨草则为草本类典型植被。根据相关学者的研究^[24-29],干旱区典型植被生态水位阈值区间见图 6。可见,怪柳的适宜生态水位阈值区间相对较宽,为 1~5 m;白刺与骆驼刺的适宜生态水位阈值为 1~4 m;芦苇对应的适宜生态水位阈值为 2~4 m;而芨芨草的适宜生态水位阈值范围较小,为 1~3 m。因此,西北干旱区生态水位阈值维持在 1~4 m 时,可满足多数典型植被的生长用水需求。此外,通过野外实地样方调查 (10 m×10 m),结合高斯模型构建根系深度分布模型,拟合不同植被与地下水之间的依赖关系;同时,基于土壤盐渍化样品的实地采集,分析不同盐渍化程度与地下水水位的关系,进而确定土壤盐渍化的关键水位阈值;并结合遥感监测数据,分析湖泊与湿地面积变化趋势,以确定生态水位阈值的上下限。最终确定宁夏引黄灌区维持 2.5 m 左右的生态水位阈值可有效满足当前生态系统的整体需求。

2.4 农业节水情景方案设置

为系统评估不同节水措施对宁夏引黄灌区水生态系统的影响,综合考虑农业节水要素及不同要素间的情景组合,构建不同的农业节水情景方案,并在多年平均降水量与引水条件下进行模拟分析。

基于自然条件、社会经济状况及节水投资等因

表 2 构建 WACM 的主要数据类型及数据源

Table 2 Main data types and data sources for constructing WACM

数据项	数据内容	时间	数据来源
空间数据	DEM	2015 年	2015 年 NASA 发布的精度为 30 m 的全球 ASTER GDEM 数据
	土地利用图	2010 年和 2015 年	中国科学院地理科学与资源研究所发布的 30 m 精度土地利用数据集
	灌区水系分布图		宁夏回族自治区水利厅提供的渠系沟道图集矢量化
	土壤分布图	2000 年	南京土壤研究所公布的全国土壤分布图
水文地质数据	地下水井站分布、水文地质参数		宁夏回族自治区水利厅
气象观测数据	降水、气温、风速、相对湿度	2008 年以来,逐日	中国气象局网站共享数据资料
水文观测数据	主要水文控制站点的流量过程信息	2008 年以来,逐月	宁夏回族自治区水利厅
灌区引排水数据	引排水渠系分布、引排水过程信息	2008 年以来,逐月	宁夏回族自治区水利厅
社会经济数据	农业、工业、生活和生态用水量等信息	2008 年以来,逐年	宁夏水资源公报数据与宁夏回族自治区水利厅

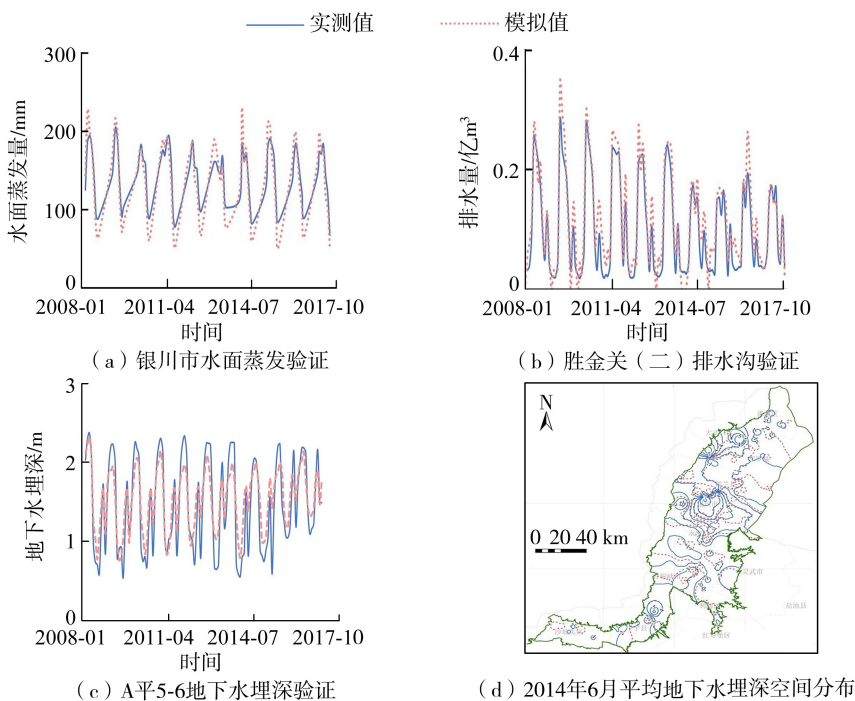


图 5 宁夏引黄灌区水面蒸发量、排水量和地下水位模拟值与观测值对比

Fig. 5 Comparison of simulated and observed values for water surface evaporation, drainage, and groundwater levels in the Ningxia Yellow River Irrigation District

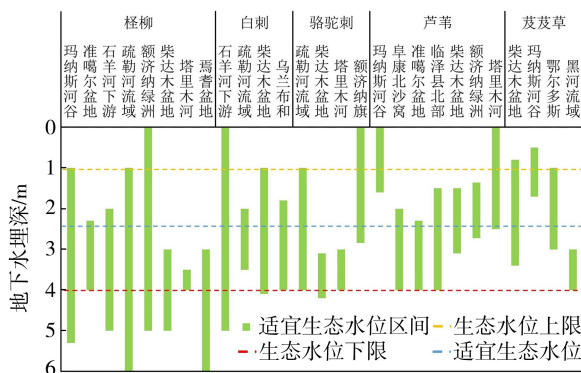


图 6 干旱区典型植被生态水位阈值区间

Fig. 6 Threshold range of ecological groundwater level for typical vegetation in arid areas

素,主要考虑农业节水工程因素和管理因素,最终确定农业节水工程措施包括渠道衬砌、田间高效节水灌溉(如喷灌与滴灌)以及激光平地等;管理措施包括种植结构调整和冬灌优化等。其中,冬灌作为宁夏引黄灌区的传统灌溉方式,具有保墒、除害和压碱等作用,尽管其节水潜力相对有限,但在农业节水情景中也同样考虑其优化的影响。渠道衬砌措施依据唐徕渠、西干渠等骨干渠道的规划目标进行差异化设置,分别将渠系水利用系数提升至 0.63 和 0.65 两个强度等级;田间高效节水灌溉措施主要针对玉米、葡萄等作物,采用喷灌或滴灌技术实施;种植结构调整则是将宁夏引黄灌区内的水稻种植区转化为玉米种植区。

通过农业节水工程与管理措施的协同配置,构

建宁夏引黄灌区农业节水情景方案。以 2017 年实施的农业节水工程与管理措施为基准情景(Z0),对多因素情景方案进行组合,最终筛选出 5 种代表性节水方案,分别命名为 Z1~Z5。其中,Z4 方案整合所有单项措施中的最高节水水平,代表节水方案的极限情景;Z3 方案为维持工程措施现状,仅考虑冬灌优化,旨在分离管理措施的独立影响,单独评估非生育期灌溉调整的影响。Z1、Z2 和 Z5 为中等节水强度情景方案,Z1 方案为以工程措施为主,与常规管理措施组合的节水情景方案,即渠系衬砌与田间高效节水灌溉采用高标准节水措施,而种植结构与冬灌优化采取较低标准措施;Z2 方案为农业节水工程措施与管理措施协同组合情景方案,渠系衬砌与种植结构调整均采用高节水情景方案;Z5 方案为综合措施组合节水情景方案。各方案采用的具体节水措施见表 3。

2.5 不同情景下水循环变化特征

2.5.1 水循环通量

基准情景采用多年平均引黄水量 50.83 亿 m^3 模拟水循环过程,表 4 为 Z0 方案水循环全过程。从整体水循环角度来看,宁夏引黄灌区水分输入水量中,总引黄水量最大,为 50.83 亿 m^3 ,占总输入水量的 69.7%;降水量其次,为 19.63 亿 m^3 ,占总输入水量的 26.9%。而水分输出水量中,蒸散发水量占比最大,为 48.56 亿 m^3 ,占总输出水量的 64.5%;其次是灌区排水量,为 23.85 亿 m^3 ,占 31.7%;工业与生

表 3 宁夏引黄灌区农业节水潜力情景方案设置

Table 3 Scenario setting for agricultural water-saving potential in the Ningxia Yellow River Irrigation District

措施分类	具体内容	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5
渠系衬砌	渠系水利用系数 0.63	✓	✓	✓		✓
	渠系水利用系数 0.65				✓	
高效节水	高效节水灌溉面积率 35%	✓		✓		
	高效节水灌溉面积率 40%		✓			✓
	高效节水灌溉面积率 45%				✓	
激光平地	激光平地面积 25.33 万 hm ²	✓	✓	✓	✓	✓
种植结构	水稻种植面积 7.33 万 hm ² , 全部退减为玉米	✓		✓		
	水稻种植面积 6.67 万 hm ² , 全部退减为玉米		✓		✓	
	水稻种植面积 5.33 万 hm ² , 全部退减为玉米					✓
冬灌优化	冬灌维持现状定额, 1 年 1 灌	✓	✓		✓	✓
	冬灌定额 1 800 m ³ /hm ² , 1 年 1 灌			✓		

活耗水量、侧排入黄河水量以及浅层地下水补给深层地下水水量合计仅占总输出水量的 3.8%, 占比较小。

在 Z0 模拟的基础上, 进一步对 Z1~Z5 的水循环过程进行模拟。各节水方案在模拟水循环过程中, 输入水量中的总降水量、黄河侧渗、山区洪水、山前侧渗等, 以及输出水量中的地下水开采、浅层地下水补给深层地下水、侧排入黄等均沿用 Z0 数据, 因此水循环通量在各方案间基本保持一致。然而, 由于不同节水措施的实施, 各方案在引黄水量、排水量、蒸散发量及灌区水资源总量等方面表现出显著差异。

对于低强度节水方案 Z1, 模拟结果显示, 灌区总引水量降至 46.1 亿 m³。随着输入水量的大幅减少, 灌区的各项水循环通量也发生了改变, 见表 4。在此情景下, 宁夏引黄灌区呈现输出水量大于输入水量的不平衡状态, 水资源亏缺情况进一步加剧。

相比于 Z1 方案, Z2~Z5 方案节水力度逐渐增强, 节水效果更加显著, 对宁夏引黄灌区水循环过程的影响也更加突出, 其中 Z4 方案因采用最高强度的渠道衬砌与田间高效节水灌溉措施, 节水量最大。在灌区引水量大幅度减少的情况下, 其排水量也相

应减少。尽管 Z4 方案引水量减少最多, 但排水量最低的并非 Z4 方案, 而是实施了高强度冬灌措施的 Z3 方案, 排水量减少到 19.78 亿 m³, 表明宁夏引黄灌区的冬灌措施存在着严重的水资源浪费现象, 且水分利用效率较低。此外, 各节水方案下蒸散发量均明显下降, 以 Z4 和 Z5 方案最为显著, 反映出田间高效节水灌溉措施及种植结构调整(水稻种植面积压减)对降低灌区水资源消耗成效显著。地下水入渗水量方面, Z3 与 Z4 方案降幅最大, 其中 Z3 方案主要通过优化冬灌实现节水, 说明冬灌期间大量灌溉水渗入地下水系统, 随后通过排水沟排出; Z4 方案则通过高强度渠系衬砌与田间高效节水灌溉措施减少了渠系与田间的渗漏补给, 从而有效降低了地下水入渗水量。

宁夏引黄灌区在实施不同节水方案后, 所有情景均表现为输出水量大于输入水量, 整体水资源呈减少趋势, 其中土壤水减少幅度最大, 地下水次之。随着节水强度的增加, Z4 方案水资源减少总量最大。

2.5.2 地下水埋深

实施不同节水方案后宁夏引黄灌区地下水埋深变化分布如图 7 所示。可见, Z1 方案由于节水强度最小, 地下水水位下降幅度相对较小; Z2 方案通过扩大田间高效节水灌溉面积和调整种植结构, 地下水水位下降较为明显; Z3 方案加强了冬灌节水措施, 冬灌水量减少的同时也降低了对地下水的补给, 导致地下水水位显著下降; Z4、Z5 方案节水力度较大, 灌区周边区域地下水埋深亦开始显著降低。值得注意的是, 灌区周边地区是天然林草地的主要聚集地, 地下水水位大幅下降可能对其生态系统造成不利影响。Z1 和 Z2 方案的地下水平均埋深分别为 2.43 m 和 2.49 m, 均低于生态水位阈值(2.5 m), 满足地下水生态约束条件; 而 Z3~Z5 地下水埋深分别为 2.57、2.61、2.60 m, 均大于 2.5 m, 不满足生态水位阈值。

2.6 农业节水潜力极限结果

基于 WACM 模拟了不同节水方案下灌区水循环过程, 得到了各节水方案下的引黄取水量。相较

表 4 不同方案下灌区主要水循环通量模拟结果

Table 4 Simulation results of major water cycle fluxes for irrigation district under different schemes

									单位: 亿 m ³
									unit: 10 ⁸ m ³
方案	引水量	排水量	蒸散发量	地下水入渗量	潜水蒸发量	地表水蓄变量	土壤水蓄变量	地下水蓄变量	总蓄变量
Z0	50.83	23.85	48.56	28.29	9.74	-0.08	-1.89	-0.40	-2.37
Z1	46.10	21.39	47.53	25.22	8.93	-0.12	-2.93	-0.55	-3.60
Z2	45.43	21.33	47.15	25.03	8.88	-0.12	-3.17	-0.55	-3.84
Z3	43.97	19.78	47.37	23.45	8.78	-0.14	-3.23	-0.59	-3.96
Z4	42.93	20.23	46.44	23.45	8.38	-0.15	-3.75	-0.62	-4.52
Z5	43.81	20.55	46.56	23.46	8.62	-0.13	-3.37	-0.41	-3.91

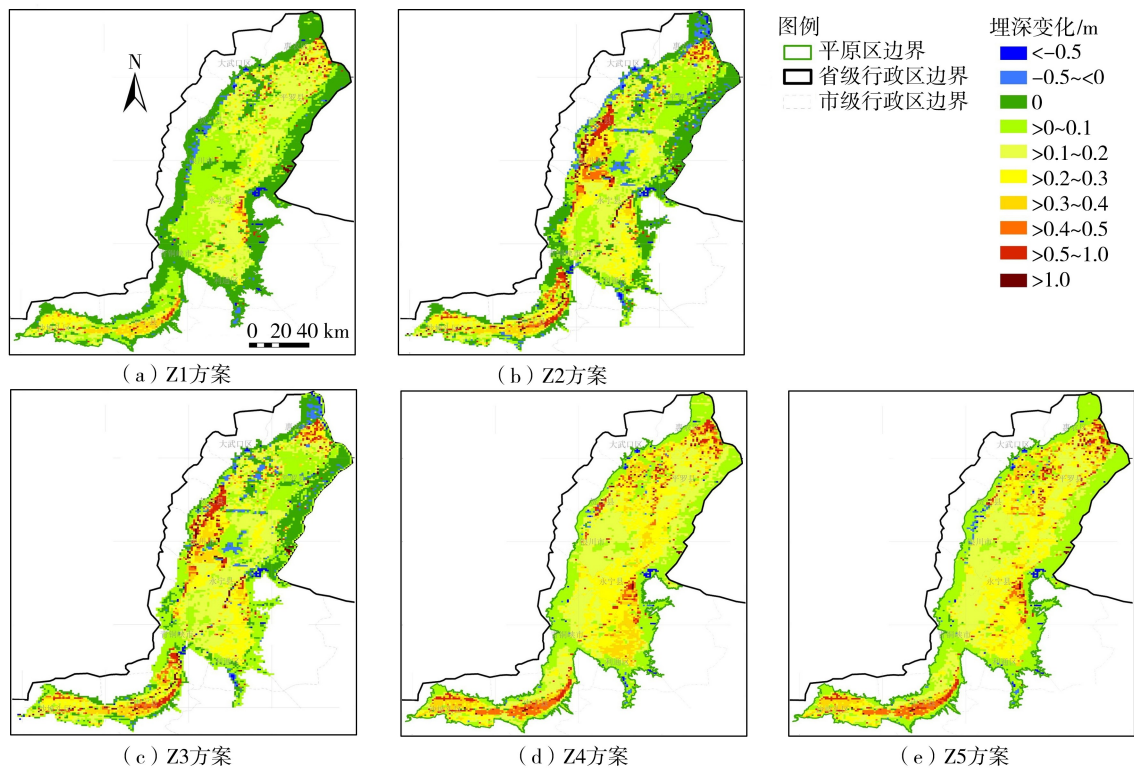


图7 不同节水方案地下水埋深变化分布

Fig. 7 Distribution of groundwater depth changes under different water-saving schemes

于Z0,Z1方案可实现取水节水量4.72亿 m^3 ,Z2方案增加至5.40亿 m^3 ,Z3方案为6.85亿 m^3 ,Z4方案达7.89亿 m^3 ,Z5方案为7.01亿 m^3 。进一步对比分析各方案与Z0下的灌区耗水量,结果表明,低强度的Z1方案和高强度的Z4方案分别实现耗水节水量1.03亿、2.18亿 m^3 ;实施较强田间高效节水灌溉措施的Z2方案为1.40亿 m^3 ,Z3、Z5方案分别为1.19亿、1.99亿 m^3 ,节水效果显著。

上述结果表明,高强度农业节水措施在宁夏引黄灌区具有显著的节水潜力,但需同步评估其对区域生态环境的影响。以地下水生态水位作为刚性约束条件进行评价,Z1和Z2方案对应的地下水埋深分别为2.43、2.49m,均处于维持生态健康所需的合理范围;而Z3~Z5等较高强度节水方案虽然节水成效突出,但地下水埋深均超过2.5m,可能会对生态系统造成不利影响。因此,在保障生态稳定的前提下,宁夏引黄灌区可实现的合理取水节水量为5.40亿 m^3 ,耗水节水量为1.40亿 m^3 。

Z0采用多年平均降水情景及50.83亿 m^3 的引水量设定,而实际数据显示,宁夏引黄灌区年引水量已由1998年的86.6亿 m^3 下降至2023年的53.32亿 m^3 ,25年间降幅达38.4%。本文提出的5.40亿 m^3 取水节水量,本质上是在现有节水工程措施(如渠道衬砌率提高、水稻种植面积缩减等)基础上,通过进一步优化农业节水工程技术与管理措

施可以实现的合理节水空间,与历史引水量递减趋势基本一致。模型模拟结果显示,Z2方案引水量为45.43亿 m^3 ,较2023年实际引水量(53.32亿 m^3)仍有约7.89亿 m^3 的节水空间,但需注意,2023年实际引水量受当年气象条件等因素的影响。

2.7 讨论

2.7.1 农业耗水节水潜力来源

模型模拟结果显示,宁夏引黄灌区农田耗水量占灌区总耗水量的72.5%,自然生态耗水量占27.5%,其中农业耗水的节水潜力为1.40亿 m^3 ,占总耗水节水潜力的92%,表明农田节水是节水潜力的主要贡献者,同时也反映出节水措施可能对生态用水产生潜在影响。农田节水措施(渠系衬砌、高效节水灌溉技术等)通过减少无效渗漏与蒸发损失,直接降低了地下水的入渗量。在Z0下,地下水的入渗量为28.29亿 m^3 ,而在满足生态水位需求的Z2方案中,地下水的入渗量下降至25.03亿 m^3 (表4),减少了3.26亿 m^3 ,其中约8%(即0.26亿 m^3)转化为自然生态耗水的节水量。这一现象的原因在于,田间渗漏水是干旱区天然植被的重要水源之一,其减少将导致潜水蒸发量下降,进而影响依赖地下水生存的怪柳、芦苇等植被的生长状况。

尽管削减高耗水作物(如水稻)种植面积可显著降低农田耗水量,但也会改变水分在农田系统与

自然生态系统之间的分配格局。例如,水稻田作为人工湿地,其面积缩减减少了补给地下水的水量,因此天然植被的耗水量也相应减少。模型模拟结果显示,在 Z2 方案中,草地耗水节水潜力占生态总节水潜力的 49%,这是因为草地是宁夏引黄灌区的主要植被类型,且草地对地下水水位变化的敏感性最高。农田节水通过提高整体水分利用效率(如渠系水利用系数由 0.63 提高至 0.65),将传统上补给生态系统的渗漏水量(传统视为无效损耗)转化为可节约的取水量。然而,当节水强度过大导致地下水入渗量低于生态水位阈值时(如 Z4 方案),天然植被将面临水分胁迫,从而导致其耗水量减少。自然生态耗水的节水潜力仅占灌区总节水潜力的 8%,表明在现有节水技术水平下,生态耗水的调节空间已趋于饱和。

2.7.2 农业节水对生态影响

灌区农业节水效应通过水循环作用于天然生态。节水措施使灌区地下水埋深显著增加,而适宜的地下水埋深是生态系统稳定的关键。据宁夏引黄灌区数据统计,自 1998 年实施大规模农业节水措施后,地下水埋深从 1.54 m 增至 2.25 m;2017 年人工生态补水量已达 2.17 亿 m³,且补水量自 2002 年起快速增长,用以减少灌区高强度节水对生态产生的影响^[30]。

节水方案模拟结果显示,Z2 方案下地下水水位将达到临界生态水位阈值,灌区自然生态处于维持正常耗水能力的临界状态。若进一步提升灌区节水强度(如 Z3~Z5 方案),地下水水位将超出该临界生态水位阈值。从自然演替规律来看,若节水导致地下水水位超出阈值,天然植被可能发生适应性改变,浅根系草甸植被(如芦苇)或将逐步被耐旱的深根系植被(如骆驼刺、怪柳)替代,形成新的生态平衡,这一过程即生态演替。生态演替具有普遍性,宁夏因灌溉水循环系统发达,形成了显著高于干旱地区的地下水水位,进而形成了与自然生态系统完全不同的人工生态系统。若引水量持续减少,人工生态系统可能向自然耐旱生态系统演替,该过程虽符合干旱区的自然规律,但会对依赖绿洲生存的社会经济系统造成冲击。

从人为干预的角度出发,灌区可在推进节水的同时增加生态补水,构建节水工程与补水工程协同管理模式,从而避免持续节水下的生态退化。当前灌区人工生态补水量的持续增长,已缓解了局部湿地的退化压力,表明通过补水措施与植被适应性管理,可在一定程度上降低节水带来的生态风险。因此,本文提出的 2.5 m 生态水位阈值,本质是维系现

有人工-自然复合生态系统稳定的管理临界值,并非自然生态健康的绝对下限。实际节水规划中,可结合人工动态补水方案进行干预,为生态系统自我调节预留缓冲空间。

3 结 语

本文从灌区水循环全过程出发,提出了面向生态健康的农业节水潜力概念及研究框架,包括构建灌区水循环模拟模型、设置灌区综合节水方案,并以宁夏引黄灌区为例,通过文献调研及实地考察确定维持灌区生态稳定的适宜生态水位为 2.5 m;按照低、中、高节水强度制定不同节水措施组合下的综合节水方案,通过模拟不同节水方案下的水循环过程,结合地下水生态水位约束,确定了宁夏引黄灌区取水节水潜力为 5.40 亿 m³,耗水节水潜力为 1.40 亿 m³。

参考文献:

[1] 郝丽娜. 面向生态的绿洲适度农业规模及布局优化研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2019.

[2] 朱美玲,刘军. 西北干旱区农业高效节水区域效益评价指标体系研究[J]. 节水灌溉,2016 (2): 95-100. (ZHU Meiling, LIU Jun. Research on the evaluation index system of efficient water-saving regional benefits in arid areas of Northwest China[J]. Water Saving Irrigation, 2016 (2): 95-100. (in Chinese))

[3] DAVENPORT D C, HAGAN R M. Agricultural water conservation in California, with emphasis on the San Joaquin Valley: summary and conclusions [M]. Davis: University of California, Davis, 1982.

[4] 雷波,刘钰,许迪. 灌区农业灌溉节水潜力估算理论与方法[J]. 农业工程学报,2011,27(1): 10-14. (LEI Bo, LIU Yu, XU Di. Theoretical estimation method of agricultural irrigation water-saving potential in irrigation districts [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27 (1): 10-14. (in Chinese))

[5] JÄGERMEYR J, GERTEN D, HEINKE J, et al. Water savings potentials of irrigation systems: global simulation of processes and linkages[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2015, 19(4): 3593-3644.

[6] 丁志宏,徐向广,付晓亮. 基于分区的海河流域农业节水潜力评估[J]. 中国农村水利水电,2018(7): 47-51. (DING Zhihong, XU Xiangguang, FU Xiaoliang. Assessment of agricultural water-saving potential in the Haihe River Basin based on regionalization [J]. China Rural Water and Hydropower, 2018 (7): 47-51. (in Chinese))

[7] 代小平,周雯晶,韩宇平,等. 作物相对水分利用效率与理论节水潜力[J]. 水科学进展,2019,30(5): 682-690.

- (DAI Xiaoping, ZHOU Wenjing, HAN Yuping, et al. Relative water use efficiency and theoretical water-saving potential of crops [J]. *Advances in Water Science*, 2019, 30(5): 682-690. (in Chinese))
- [8] ZHANG Dongmei, GUO Ping. Integrated agriculture water management optimization model for water saving potential analysis [J]. *Agricultural Water Management*, 2016, 170: 5-19.
- [9] YAN Nana, WU Bingfang, PERRY C, et al. Assessing potential water savings in agriculture on the Hai Basin Plain, China [J]. *Agricultural Water Management*, 2015, 154: 11-19.
- [10] GAO Jie, ZHUO La, DUAN Ximing, et al. Agricultural water-saving potentials with water footprint benchmarking under different tillage practices for crop production in an irrigation district [J]. *Agricultural Water Management*, 2023, 282: 108274.
- [11] MI Lina, TIAN Juncang, SI Jianning, et al. Evolution of groundwater in Yinchuan Oasis at the upper reaches of the Yellow River after water-saving transformation and its driving factors [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, 17(4): 1304.
- [12] 张倩, 全强, 李健, 等. 河套灌区节水条件下地下水动态变化分析 [J]. *灌溉排水学报*, 2018, 37(增刊 2): 97-101. (ZHANG Qian, QUAN Qiang, LI Jian, et al. Analysis of groundwater dynamics under water-saving conditions in Hetao Irrigation District [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2018, 37(Sup2): 97-101. (in Chinese))
- [13] 姜秀芳, 张霞, 张钦武, 等. 青铜峡灌区引黄用水与地下水位响应关系分析 [J]. *水资源与水工程学报*, 2012, 23(4): 148-150. (JIANG Xiufang, ZHANG Xia, ZHANG Qinwu, et al. Analysis of the response relationship between Yellow River water diversion and groundwater level in Qingtongxia irrigation district [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2012, 23(4): 148-150. (in Chinese))
- [14] 彭翔. 基于遥感的河套灌区地下水埋深变化对生态环境的影响研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2017.
- [15] ZHANG Rui, WU Jingwei, YANG Yang, et al. A method to determine optimum ecological groundwater table depth in semi-arid areas [J]. *Ecological Indicators*, 2022, 139: 108915.
- [16] 赵勇, 董义阳, 翟家齐, 等. 考虑生态耗水的干旱区绿洲灌溉用水效率评价指标与方法 [J]. *水资源保护*, 2024, 40(3): 78-89. (ZHAO Yong, DONG Yiyang, ZHAI Jiaqi, et al. Evaluation indicators and methods for irrigation water efficiency in arid oasis considering ecological water consumption [J]. *Water Resources Protection*, 2024, 40(3): 78-89. (in Chinese))
- [17] 刘圣. 马海盆地荒漠绿洲区生态地下水位对人类活动响应的研究 [D]. 北京: 中国地质大学, 2014.
- [18] 柳菲. 民勤绿洲土壤水盐特征及其与地下水的关系 [D]. 兰州: 兰州大学, 2019.
- [19] 翟家齐, 赵勇, 刘宽, 等. 干旱区灌溉绿洲农业节水潜力形成机制与评估方法 [J]. *水利学报*, 2023, 54(12): 1440-1451. (ZHAI Jiaqi, ZHAO Yong, LIU Kuan, et al. Formation mechanism and evaluation method of agricultural water-saving potential in irrigation oasis of arid areas [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2023, 54(12): 1440-1451. (in Chinese))
- [20] 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 and coordination analysis of eco-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))
- [21] 翟家齐. 流域水-氮-碳循环系统理论及其应用研究 [D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2012.
- [22] 毕彦杰, 赵晶, 张文鸽, 等. WACM4.0 模型模拟内蒙古河套地区山水林田湖草系统水循环 [J]. *农业工程学报*, 2020, 36(14): 148-158. (BI Yanjie, ZHAO Jing, ZHANG Wenge, et al. Simulation of water cycle in the mountain-water-forest-farmland-lake-grass system in Hetao area, Inner Mongolia using WACM4.0 model [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(14): 148-158. (in Chinese))
- [23] 翟家齐, 赵勇, 王丽珍, 等. 平原区地表水-地下水耦合模拟与水资源配置效应评估 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2020.
- [24] 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]. *水文地质工程地质*, 2019(3): 1-8. (DANG Xueya, LU Na, GU Xiaofan, et al. Groundwater threshold of ecological vegetation in Qaidam Basin [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2019(3): 1-8. (in Chinese))
- [25] 王旭, 国林, 胡宸, 等. 基于 RS、GIS 西辽河流域地下水与植被发育关系的探究 [J]. *地下水*, 2024(2): 20-22. (WANG Xu, GUO Lin, HU Chen, et al. Exploration of the relationship between groundwater and vegetation development in the Xiliao River Basin based on RS and GIS [J]. *Groundwater*, 2024(2): 20-22. (in Chinese))
- [26] 刘蓉, 赵勇, 王庆明, 等. 海河平原区浅层地下水位健康修复目标研究 [J]. *水利学报*, 2022(9): 1105-1115. (LIU Rong, ZHAO Yong, WANG Qingming, et al. Research on health restoration targets of shallow groundwater level in the Haihe Plain [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2022(9): 1105-1115. (in Chinese))

(下转第 258 页)

究[D]. 重庆:西南大学,2016.

[23] 易伯鲁,余志堂,梁秩桑. 葛洲坝水利枢纽与长江四大家鱼[M]. 武汉:湖北科学技术出版社,1988.

[24] 周春生,梁秩桑,黄鹤年. 兴修水利枢纽后汉江产漂流性卵鱼类的繁殖生态[J]. 水生生物学报,1980,4(2): 175-188. (ZHOU Chunsheng, LIANG Zhishen, HUANG Henian. Ecological features of the spawning of certain fishes in the Hanjiang River after the construction of dams [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 1980, 4(2): 175-188. (in Chinese))

[25] 刘乐和,吴国犀,王志玲. 葛洲坝水利枢纽兴建后长江干流铜鱼和圆口铜鱼的繁殖生态[J]. 水生生物学报, 1990, 14(3): 205-215. (LIU Lehe, WU Guoxi, WANG Zhiling. Reproduction ecology of coreius heterodon (bleeker) and coreius guichenoti (sauvage et dabry) in the mainstream of the Changjiang River after the construction of Gezhouba Dam [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 1990, 14(3): 205-215. (in Chinese))

[26] 许蕴珩,邓中彝,余志堂,等. 长江的铜鱼生物学及三峡水利枢纽对铜鱼资源的影响[J]. 水生生物学报,1981, 7(3): 271-294. (XU Yungan, DENG Zhonglin, YU Zhitang, et al. The biological aspects of coreius heterodon (bleeker) and the effects of proposed sanxia hydroelectric project on its resource [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 1981, 7(3): 271-294. (in Chinese))

[27] HORNE A C, WEBB J A, MUSSEHL M, et al. Not just another assessment method; reimagining environmental flows assessments in the face of uncertainty[J]. Frontiers in Environmental Science, 2022, 10: 808943.

[28] POFF N L R, THARME R E, ARTHINGTON A H.

+++++ (上接第 226 页) +++++

[27] 石志高. 水资源非线性损失对植被生长影响的模型研究[J]. 延边大学学报(自然科学版), 2023(2): 149-154. (SHI Zhigao. Study on the model of the impact of nonlinear water resource loss on vegetation growth [J]. Journal of Yanbian University (Natural Science Edition), 2023(2): 149-154. (in Chinese))

[28] 张丽,董增川,黄晓玲. 干旱区典型植物生长与地下水位关系的模型研究[J]. 中国沙漠, 2004, 24(1): 110-113. (ZHANG Li, DONG Zengchuan, HUANG Xiaoling. Model study on the relationship between typical plant growth and groundwater level in arid areas [J]. Journal of Desert Research, 2004, 24(1): 110-113. (in Chinese))

[29] 农晓星. 陕北风沙滩区地下水埋深对地表生态环境的影响[D]. 西安:西安理工大学, 2023.

[30] 吴丹,陈江南. 协同治理视角下中国水治理效能的演变特征与贡献测量[J]. 水资源保护, 2025, 41(5): 268-277. (WU Dan, CHEN Jiangnan. Evolution characteristics and contribution measurement of China's water governance effectiveness from the perspective of collaborative governance [J]. Water Resources Protection, 2025, 41(5): 268-277. (in Chinese))

(收稿日期:2025-02-05 编辑:胡新宇)