

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

赵勇¹,董义阳²,翟家齐¹,刘宽^{1,3},刘志武²,梁犁丽²

(1. 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; 2. 中国长江三峡集团有限公司科学技术研究院,北京 101199; 3. 天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室,天津 300072)

摘要:针对现行干旱区绿洲尺度灌溉用水效率评价对生态服务效益考虑不足的问题,提出了在绿洲尺度上考虑生态耗水的灌溉用水效率评价指标和方法,并应用于宁夏引黄灌溉绿洲。结果表明:宁夏引黄灌溉绿洲农田蒸散消耗水量中的灌溉水量平均占比达74.7%,生态系统蒸散消耗水量中的灌溉水量平均占比达39.8%,灌溉水对生态系统的支撑作用显著;考虑生态耗水前后的灌溉用水效率差为0.052~0.074,占未考虑生态耗水灌溉用水效率的13.9%~16.1%,灌溉水的生态服务效益明显;提出的评价指标与方法合理可行,能客观反映干旱区灌溉用水的综合效益。

关键词:灌溉用水效率;生态耗水;干旱区;蒸散发;水循环模拟;宁夏引黄灌溉绿洲

中图分类号:TV213

文献标志码:A

文章编号:1004-6933(2024)03-0078-12

A new evaluation indicator and method for oasis irrigation water use efficiency in arid regions considering ecological water consumption//ZHAO Yong¹, DONG Yiyang², ZHAI Jiaqi¹, LIU Kuan^{1,3}, LIU Zhiwu², LIANG Lili²

(1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. Science and Technology Research Institute, China Three Gorges Corporation, Beijing 101199, China; 3. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: In response to the shortcomings of insufficient consideration of ecological service benefits in current evaluation of irrigation water use efficiency at irrigated oasis scale in arid regions, a new indicator and method to evaluate irrigation water use efficiency considering ecological water consumption were proposed and applied in irrigated oasis of the Yellow River in Ningxia Hui Autonomous Region. The results show that the average proportion of irrigation water in farmland evapotranspiration consumption is 74.7%, and that in ecosystem evapotranspiration consumption is 39.8%. Irrigation water plays a significant role in supporting the ecosystem. The difference between irrigation water use efficiency with and without considering ecological water consumption is 0.052~0.074, accounting for 13.9%~16.1% of the irrigation water efficiency without considering the ecological water consumption, and the ecological service benefit of irrigation water is obvious. The proposed indicator and method are reasonable and feasible, and can objectively reflect the comprehensive benefits of irrigation water use.

Key words: irrigation water use efficiency; ecological water consumption; arid regions; evapotranspiration; water cycle simulation; irrigated oasis of the Yellow River in Ningxia Hui Autonomous Region

农业灌溉是保障干旱区经济发展和生态环境健康的关键因素,受水资源短缺与供水需求增加的双重驱动,实现农业高效用水已成为破解干旱区“水危机”的关键^[1]。开展多维度灌溉用水效率综合评价是支撑农业高效用水的基础工作。目前,国内外

表征灌溉用水效率的指标较多,且其定义各异。国际灌溉排水委员会于1977年正式定义了灌溉用水效率,认为总灌溉效率等于输水效率、配水效率和田间灌水效率三者的乘积^[2]。此后,众多学者在此基础上提出不同的灌溉用水效率评价指标^[3-5]。相关研究经

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFC3200205);国家自然科学基金项目(51979284);国家杰出青年科学基金项目(52025093);国家科技基础资源调查专项(2021xjkk0405)

作者简介:赵勇(1977—),男,正高级工程师,博士,主要从事水循环模拟与水资源高效利用研究。E-mail:zhaoyong@iwhr.com

通信作者:董义阳(1990—),男,工程师,博士,主要从事水循环模拟与水资源高效利用研究。E-mail:dongyiyang14@mails.ucas.ac.cn

历了从忽视回归水重复利用^[6]到近年来将回归水重复利用考虑到灌溉用水效率评价的过程^[2,7-10]。

国内使用最为广泛的评价指标之一为灌溉水有效利用系数^[5,11],其测定方法主要包括定义法和首尾测算分析法。定义法在计算大型灌区的灌溉水有效利用系数时存在越级渠道和回归水利用等问题^[12],且不能反映当时的实际灌溉利用情况,需要对其修正^[13]。针对定义法存在的问题,李英能^[14]探讨了一种用渠首水量与作物净灌溉水量比值进行灌溉用水效率评价的简易方法。2006年水利部制定了《全国现状灌溉水利用率测算分析技术方案》和《全国农田灌溉水有效利用系数测算分析技术指导意见》等,指出灌溉水有效利用系数是在某次或某一时间内被农作物利用的净灌溉水量与水源渠首处总灌溉引水量的比值,与灌区自然条件、工程状况、用水管理水平、灌水技术等因素有关^[15-16],并提出采用首尾测算分析评价方法,其中隐含“贮存在作物根系层的灌溉水量会全部被作物吸收利用”的假设^[11]。由于回归水的重复利用,贮存在作物根系层的灌溉水量不一定能全部被作物吸收利用,首尾测算分析法可能会高估灌溉水有效利用系数。针对这一问题,蒋磊等^[11]将灌溉水有效利用量(作物生长期灌溉地蒸散发扣除降水量)与灌溉净引水量(总引水量减去退、排水量)的比值定义为灌溉水有效利用系数,其中灌溉地蒸散发用遥感蒸散发模型估算,避免了先前评估中难以准确估算通过灌溉到达作物根系层水量的问题。众多研究从灌溉水被农田作物利用量入手,深刻分析了灌溉水有效利用系数的内涵、测量和计算方法^[5,17-18],并考虑了回归水重复利用和蒸散发准确估算等问题。

水是干旱区绿洲社会经济可持续发展和自然生态系统健康稳定的决定性因素^[19-22],“有水则为绿洲,无水则为荒漠”。干旱区农业灌溉除了支撑农业生产之外,其通过入渗补充地下水,成为绿洲植被和河湖湿地的重要水源,具有潜在支撑绿洲生态的功能^[23-24],相关研究^[25-27]也提出西北干旱区生态环境和社会经济系统耗水“五五分账”模式的观点。灌溉水具有农业生产和生态服务的双重效益,在进行灌溉用水效率评价时,需同时考虑两种效益,但目前尚未有考虑灌溉水生态服务效益的灌溉用水效率评价指标与方法,导致灌溉水有效利用系数等指标可能低估灌溉用水的综合效益。如根据现行的评价指标和方法,西北干旱区许多大型灌区尚未达到国家灌溉用水效率相应标准,但持续节水又面临植被退化、河湖湿地消亡等生态系统问题,威胁绿洲的生态安全。如何建立考虑生态服务效益的灌溉用水效

率综合评价指标与方法,以客观评价干旱区绿洲灌溉用水效率,既是生态水文学的关键科学问题,也是绿洲高质量发展迫切需要解决的现实难题。

针对上述问题,本文兼顾考虑灌溉水的农业生产和生态服务效益,提出考虑生态耗水的干旱区绿洲灌溉用水效率评价指标,将其定义为绿洲灌溉水有效利用量(维持农田生产功能和生态系统服务功能蒸散消耗的灌溉水量)与灌溉水量(水源渠首处总灌溉引水量)的比值,同时提出具体的评价方法,并应用于宁夏引黄灌溉绿洲,以期为干旱区水资源开发利用与生态保护提供技术支撑。

1 研究方法

1.1 干旱区灌溉绿洲水分消耗途径分析

干旱区降水稀少,以人工引水灌溉-蒸散过程为核心的水循环是绿洲自然-社会水循环的主体,自然产汇流等水循环过程处于次要地位。由于存在灌溉回归水重复利用和空间变异性^[10,28-30],灌区引水灌溉农田作物时,灌溉水量较大部分会被其直接吸收利用,小部分通过入渗成为地下水;灌溉水入渗补给的地下水可再次被农田作物吸收利用,也可被非农田植被吸收利用或补给河湖湿地等以维持绿洲的生态功能。除降水外,人工灌溉系统蒸散耗水主要源于灌溉水(本文认为当地地表地下水由灌溉引水、降水、山前侧渗、河流侧渗形成,为灌溉用水效率计算中的过程量,可通过水源贡献比例划分其中的灌溉引水量),自然生态系统蒸散耗水主要源于降水与地下水。绿洲地下水补给主要源于引水灌溉时农田、河湖渠沟的渗漏,降水入渗以及山前、河流侧向补给水量,其排泄途径是排泄排水沟、潜水蒸发和人工开采。灌溉绿洲水分消耗途径见图1。本文以农田蒸散消耗的灌溉水量进行农业生产效益评价^[11,31],以自然生态系统和防护林网等蒸散消耗以及维持河湖湿地水面和地下水位蒸发消耗的灌溉水量进行生态服务效益的评价。

1.2 考虑生态耗水的灌溉用水效率评价指标

灌溉用水效率存在尺度效应^[32-34],本文将其分为田间、农田灌域和绿洲3个尺度。田间指田块单元;农田灌域指农田水循环中由引水设施、田块、排水设施构成的特殊单元体;绿洲从农田灌域进一步拓展到农田外,包括绿洲的林地、草地、河湖湿地、居工地(即城乡、工矿、居民用地)以及未利用地等。现有灌溉水有效利用系数等指标可全面评价田间和农田灌域尺度的灌溉用水效率;当上升到绿洲尺度时,灌溉效益包含农业生产和生态服务效益,现有指标仅计算农业生产效益,忽略了其生态服务效益。

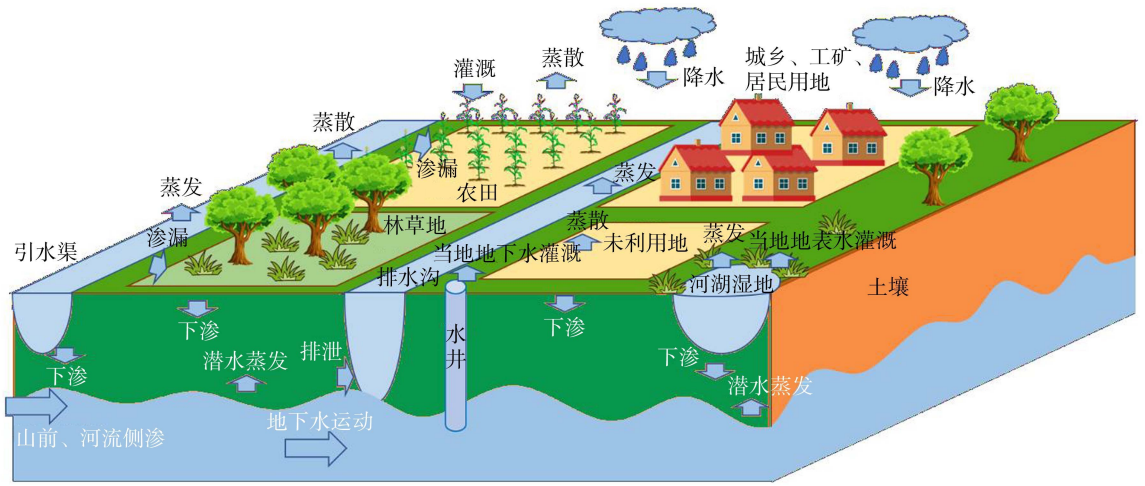


图1 灌溉绿洲水分消耗途径

Fig.1 Water consumption pathways in irrigated oasis

因此,本文主要关注绿洲尺度的灌溉用水效率评价,即在灌溉水有效利用系数基础上考虑灌溉水的生态服务效益,提出绿洲尺度的灌溉用水效率评价指标,将其定义为绿洲灌溉水有效利用量(维持农田生产功能和生态系统服务功能蒸散消耗的灌溉水量)与灌溉水量(水源渠首处总灌溉引水量)的比值。灌溉水的生态服务效益用生态系统蒸散消耗的灌溉水量衡量,即以自然生态系统和防护林网等蒸散消耗以及维持河湖湿地水面和地下水位蒸发消耗的灌溉水量表示。

a. 田间和农田灌域尺度灌溉用水效率计算公式分别为

$$\eta_1 = W_{ET1}/W_1 \quad (1)$$

$$\eta_2 = W_{ET1}/W_2 \quad (2)$$

式中: η_1 、 η_2 分别为田间和农田灌域尺度灌溉用水效率; W_{ET1} 为农田蒸散消耗的灌溉水量, m^3 ; W_1 、 W_2 分别为田间和农田灌域灌溉水量, m^3 。

b. 绿洲尺度考虑生态耗水的灌溉用水效率 η_3 计算公式为

$$\eta_3 = (W_{ET1} + W_{ET2})/W_3 \quad (3)$$

其中 $W_{ET2} = W_{ET21} + W_{ET22} + W_{ET23}$

式中: W_{ET2} 为绿洲生态系统蒸散消耗的灌溉水量, m^3 ; W_3 为绿洲灌溉水量, m^3 ; W_{ET21} 、 W_{ET22} 、 W_{ET23} 分别为林地、草地、河湖湿地蒸散消耗的灌溉水量, m^3 。

1.3 考虑生态耗水的绿洲灌溉用水效率评价方法

1.3.1 基于水循环模拟的评价方法

对绿洲灌溉用水效率进行评价关键是获取农田和生态系统蒸散消耗的灌溉水量,本文利用水的分配与循环转换模型(water allocation and cycle model, WACM)计算。具体评价内容包括:①精细模拟绿洲水循环过程和通量,获取不同土地利用的蒸散消耗

水量;②利用基于水源贡献比例的耗水量划分方法计算农田和生态系统蒸散消耗的灌溉水量;③计算绿洲尺度考虑生态耗水的灌溉用水效率和灌溉水有效利用系数,并与相关部门实测的灌溉水有效利用系数进行比较分析,以验证评价结果的合理性(图2)。

1.3.2 基于水源贡献比例的耗水量划分

水循环过程中蒸散耗水直接来源于土壤水、地下水,而土壤水、地下水则由灌溉水、降水、山前侧渗、河流侧渗补给,但目前尚无成熟的能准确划分蒸散耗水水分来源的方法。绿洲作为一个系统,灌溉水和降水在各输入水源中占比大,在空间上呈多点线或面状分布。同时,绿洲地表-地下水转化频繁,为灌溉水、降水等水源均匀补给土壤水、地下水提供了可能。假设绿洲灌溉水渗漏、降水入渗、山前侧渗、河流侧渗补给土壤水、地下水充分混合,即水循环各过程量中灌溉水量的贡献比例与绿洲灌溉水量占总输入水源水量(灌溉水、降水、山前侧渗、河流侧渗)的比例相同,计算蒸散消耗的灌溉水量时,潜水蒸发量、当地地表水和地下水灌溉农田水量、地下水补给河湖湿地水量是通过各种水源转化而来,由绿洲灌溉水量占总输入水源水量比例(α)计算划分。具体内容如下:

构建绿洲水循环模型,模拟农田蒸散消耗水量 M_{ET1} 和生态系统蒸散消耗水量 M_{ET2} 。 M_{ET2} 计算公式为

$$M_{ET2} = M_{ET21} + M_{ET22} + M_{ET23} \quad (4)$$

式中 M_{ET21} 、 M_{ET22} 、 M_{ET23} 分别为模拟的林地、草地、河湖湿地蒸散消耗水量, m^3 。

根据模拟的农田和生态系统蒸散消耗水量、各水源水量以及灌溉水量占总输入水源水量的比例计算农田和生态系统蒸散消耗的灌溉水量。绿洲灌溉水量占总输入水源水量比例为

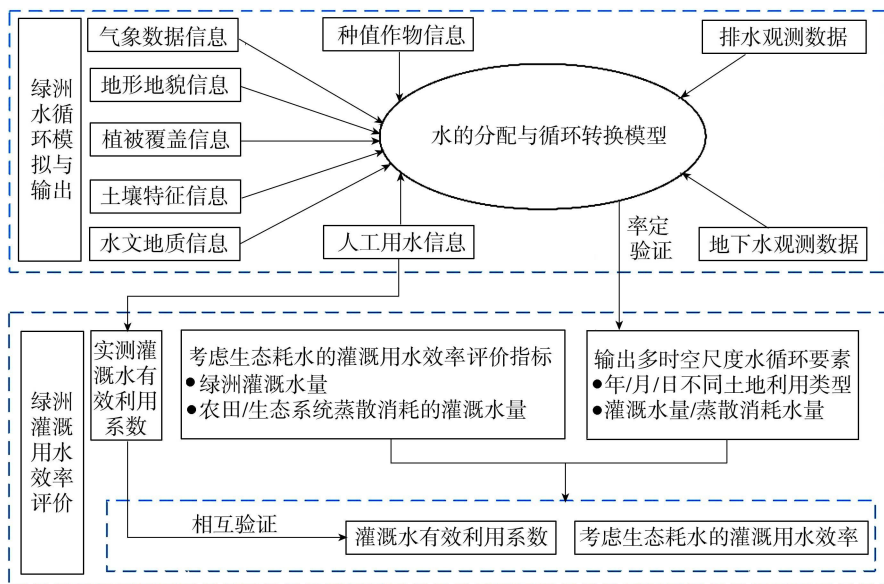


图2 考虑生态耗水的灌溉用水效率评价方法

Fig. 2 Evaluation method of irrigation water use efficiency considering ecological water consumption

$$\alpha = W_3 / (W_3 + P_3 + W_m + W_r) \quad (5)$$

式中: P_3 为绿洲区降水量, m^3 ; W_m 为山前侧渗补给绿洲水量, m^3 ; W_r 为绿洲外河流侧渗补给水量, m^3 。

农田蒸散消耗的灌溉水量计算公式为

$$W_{ET1} = \frac{(E_1 + W_{11} + W_{12})\alpha + W_3 + W_{c1}}{P_1 + E_1 + W_3 + W_{11} + W_{12} + W_{c1}} M_{ET1} \quad (6)$$

式中: E_1 为农田潜水蒸发量, m^3 ; W_{11} 、 W_{12} 分别为当地地表水和地下水灌溉农田水量, m^3 ; W_{c1} 为渠系渗漏补给农田水量, m^3 ; P_1 为农田区降水量, m^3 。

林地蒸散消耗的灌溉水量计算公式为

$$W_{ET21} = \frac{E_{21}\alpha + W_{c2}}{P_{21} + E_{21} + W_{c2}} M_{ET21} \quad (7)$$

式中: E_{21} 为林地潜水蒸发量, m^3 ; W_{c2} 为渠系渗漏补给林地水量, m^3 ; P_{21} 为林地区降水量, m^3 。

草地蒸散消耗的灌溉水量计算公式为

$$W_{ET22} = \frac{E_{22}\alpha + W_{c3}}{P_{22} + E_{22} + W_{c3}} M_{ET22} \quad (8)$$

式中: E_{22} 为草地潜水蒸发量, m^3 ; W_{c3} 为渠系渗漏补给草地水量, m^3 ; P_{22} 为草地区降水量, m^3 。

河湖湿地蒸散消耗的灌溉水量计算公式为

$$W_{ET23} = \frac{W_{23}\alpha + W_{24}}{P_{23} + W_{23} + W_{24}} M_{ET23} \quad (9)$$

式中: W_{23} 为地下水补给河湖湿地水量, m^3 ; W_{24} 为人工生态补给河湖湿地水量, m^3 ; P_{23} 为河湖湿地地区降水量, m^3 。

2 案例应用

2.1 研究区概况

宁夏引黄灌溉绿洲位于我国西北干旱区,处于

黄河上游下段,是西部重要的生态屏障,在我国生态安全战略格局中地位突出。宁夏引黄灌溉绿洲跨黄土高原和内蒙古高原,地势较平缓,呈现南高北低、西高东低的地势,海拔为 1 054 ~ 1 404 m,整体形状呈“J”形(图 3)。宁夏引黄灌溉绿洲面积为 10 712 km²,主要包括青铜峡灌区、卫宁灌区和灌区边缘区 3 部分,具有多种地貌类型,主要以平原为主。土壤类型主要包括灌淤土、灰钙土、风沙土和盐土等;植被主要包括天然植被和人工植被,其中天然植被主要为灌丛和草甸,人工植被主要为人工林地。

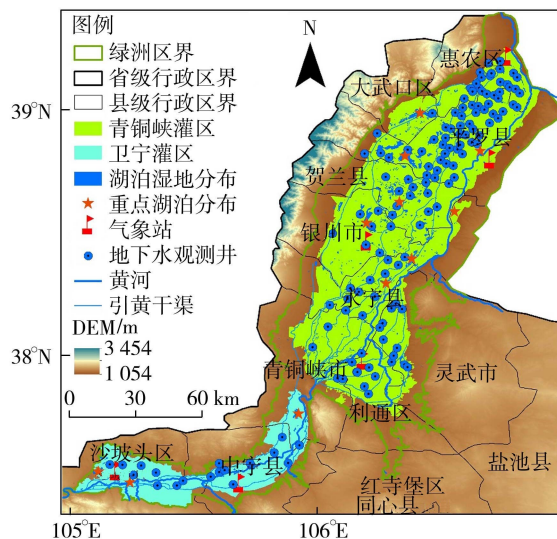


图3 宁夏引黄灌溉绿洲概况

Fig. 3 Irrigated oasis of the Yellow River in Ningxia Hui Autonomous Region

宁夏引黄灌溉绿洲属于中温带大陆性气候,干旱少雨、蒸发强烈、日照充足、气象灾害多发,其农业发展和生态稳定主要依赖于灌溉水量。多年平均降

水量为 189 mm,年内降水分布差异显著,年降水总量的 70% 集中在夏季。多年平均蒸发皿蒸发量为 1 634 mm,水面蒸发量远大于降水量,极为干旱。降水难以形成有效水资源,引黄灌溉是其生存和发展的最重要措施,引黄灌溉已使绿洲逐步形成了独特的以渠沟为主的人工水网与河湖湿地生态系统。根据统计数据,引黄灌溉绿洲拥有各类引水渠系 417 条,拥有各类排水沟系 326 条。根据《宁夏重点湖泊现状调查与分析》统计,引黄灌溉绿洲内共包含沙湖、阅海和星海湖等 11 个重点湖泊湿地,面积共约 60 km²。

《宁夏水资源公报》统计分析表明,绿洲供水水源包括降水、引黄水、当地地表及地下水,当地地表水资源量相对较少,引黄水是当地的主要水源,也是地下水的主要补给水源。2008—2017 年,引黄水量持续减少,从 61.8 亿 m³减少到 47.8 亿 m³,在供水总量中的占比从 74.0% 下降至 66.1%;降水量占比从 21.7% 增加至 33.5%;当地地下水供水占比基本稳定在 4.6% 左右,当地地表水供水量较小。2008—2017 年农业用水总量从 61.2 亿 m³持续显著减少到 46.5 亿 m³,在用水总量中的占比从 93.7% 下降到 90.1%,工业用水占比则从 3.3% 降至 2.7%,生活和生态用水量持续增加,占比从 3.1% 增加至 7.2%。引黄水量的持续减少引起绿洲地下水位下降,导致河湖湿地无法得到有效补给,需要通过生态补水维持一定的水面,2008—2017 年生态补水量由 1.07 亿 m³增加到 2.17 亿 m³。

2.2 绿洲水循环模拟验证

2.2.1 模型模拟

本文绿洲水循环过程采用 WACM^[35-36] 模拟,为灌溉用水效率评价提供不同土地利用类型蒸散消耗水量等数据信息。WACM 能实现绿洲或灌区复杂水循环过程的精细化模拟,在内蒙古河套灌溉绿洲、京津冀地区和渭河流域等得到应用与验证。模型的核心模块包括蒸散发模块、土壤水运动模块、坡面产流与河道汇流模块、地下水运动模块、引水排水模块、农田灌溉模块、工业和生活用水模块、湖泊水库模块、植被生长模块等。

依据宁夏引黄灌溉绿洲所在水资源三级区与行政区划范围确定研究区外边界,对绿洲区单元划分:①引水灌域单元划分。根据各级渠系分布及其所处地形,结合各区县边界范围,确定各段渠系覆盖的灌溉区域即引水灌域单元,其中干渠灌域 18 个,斗农渠灌域 265 个。②排水域单元划分。根据各级沟系分布及其所处地形,结合各区县边界范围,确定各段沟系控制的排水区域即排水域单元,其中干沟排水

域 45 个,斗农沟排水域 539 个。③引排水单元划分。将上述引水灌域单元和排水域单元进行空间叠加,得到 1 850 个引排水单元,每个单元都有唯一的渠、沟与之对应,并且有明确的行政区域范围。④地下水计算单元划分。绿洲区地下水模拟按照 1 km×1 km 单元网格剖分,计算单元共计 10 712 个。

基于上述单元划分,将气象、土壤等物理信息和社会经济用水等管理信息赋予每个单元网格,便可完成模型的构建。其中,气象数据信息采用中国气象局国家气象科学数据中心(<http://data.cma.cn/user/toLogin.html>)公布的宁夏引黄灌溉绿洲内 6 个气象站 2008—2017 年的气象要素数据;DEM 数据采用美国国家航空航天局(NASA)发布的全球 90 m 精度 DEM 数据;土地利用类型数据采用中国科学院资源环境科学数据中心发布的 2010 年和 2015 年 1 km 的土地利用数据;土壤数据采用中国科学院南京土壤所公布的全国土壤分布图;社会经济用水数据采用宁夏引黄灌区水资源规划及相关行政区的水资源公报数据。应用 WACM 模型对宁夏引黄灌溉绿洲水循环过程进行模拟,经率定验证后,将蒸散发量按不同土地利用的网格单元进行统计输出,为灌溉用水效率评价提供基础数据序列。

2.2.2 模型校验

模型参数包括作物灌溉水量调配利用系数、土壤饱和含水率、入渗系数、凋萎系数、田埂高度、各级排水沟深度、水文地质参数等。模型根据不同土地类型、地下水系统、绿洲系统水量平衡以及地下水位、排水、水面蒸发等模拟情况,结合对研究区水文生态等过程的认识以及调参经验,通过手动调参进行率定。

结合实测资料对水循环过程中的水面蒸发、径流和地下水过程进行验证。其中,水面蒸发采用研究区各县区气象站 2008—2017 年 4—9 月蒸发皿蒸发折算值进行验证,折算系数通过查阅相关文献资料,结合模型模拟结果综合确定。各县区的折算系数为:惠农区 0.51,大武口区 0.63,平罗县 0.54,银川市 0.59,贺兰县 0.56,永宁县 0.59,青铜峡市 0.56,利通区 0.57,沙坡头区 0.44,中宁县 0.48。排水过程采用宁夏水资源公报中的青铜峡河西、河东和卫宁河北、河南灌区 2008—2017 年排水信息进行验证;地下水位埋深利用 2008—2017 年绿洲 147 眼地下水观测井实测资料进行验证。为定量验证模型模拟精度,采用相对误差 R_e 、决定系数 R^2 和纳什系数(NSE)进行定量评价。

a. 水面蒸发验证。研究区部分区域水面蒸发模拟效果及统计指标计算结果如图 4 所示。蒸发皿

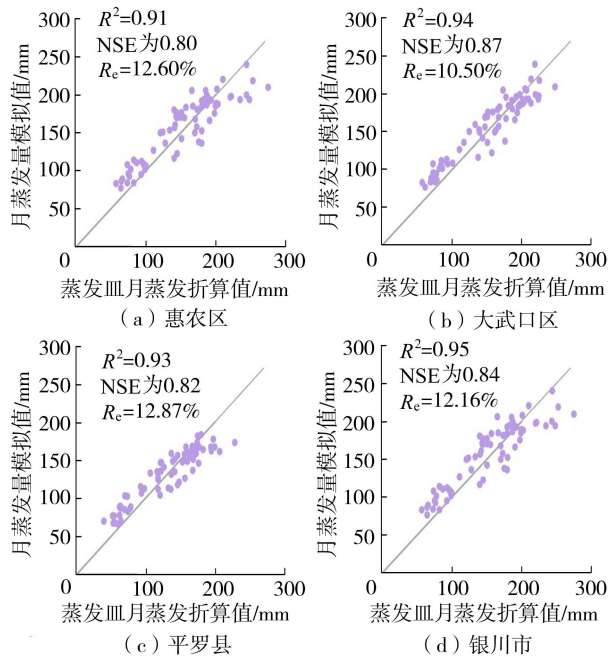


图4 水面蒸发模拟效果及统计指标计算结果

Fig.4 Water surface evaporation simulation effect and statistical index calculation results

蒸发折算值和模拟值的 $R^2 > 0.9$, NSE 均高于 0.8, $R_e < 13\%$, 水面蒸发模拟精度较高。

b. 灌区排水验证。研究区灌区排水模拟效果及统计指标计算结果如图 5 所示。3 个灌区排水实测值和模拟值的 $R^2 > 0.63$, 但 NSE 均较小, 4 个灌区 $R_e < 12\%$, 模拟精度一般。经分析发现, 出现这种情况的原因是灌区排水量监测主要针对较大的排水沟, 而小的排水沟排水量根据经验估计获得。模型通过了不同土地利用类型、不同系统水量平衡验证,

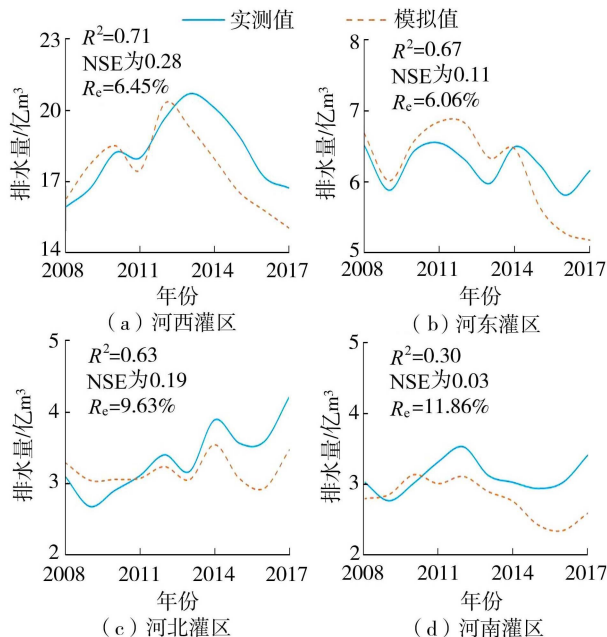


图5 灌区排水模拟效果及统计指标计算结果

Fig.5 Drainage simulation effect and statistical index calculation results of irrigation district

对后续进行灌溉用水效率计算的影响较小, 整体来看对排水的模拟能达到精度要求。

c. 地下水位验证。研究区部分观测井 2008—2017 年月平均地下水位埋深时间变化模拟效果及统计指标计算结果如图 6 所示。地下水位埋深实测值和模拟值的 $R^2 > 0.74$, NSE 基本大于 0.56, $R_e < 17\%$, 模拟结果与实际监测结果拟合较好, 在变化趋势上能够较好地反映实际变化特征。2017 年典型月地下水位埋深空间分布模拟结果(图 7)表明, 模拟的地下水位埋深空间分布基本能反映实际

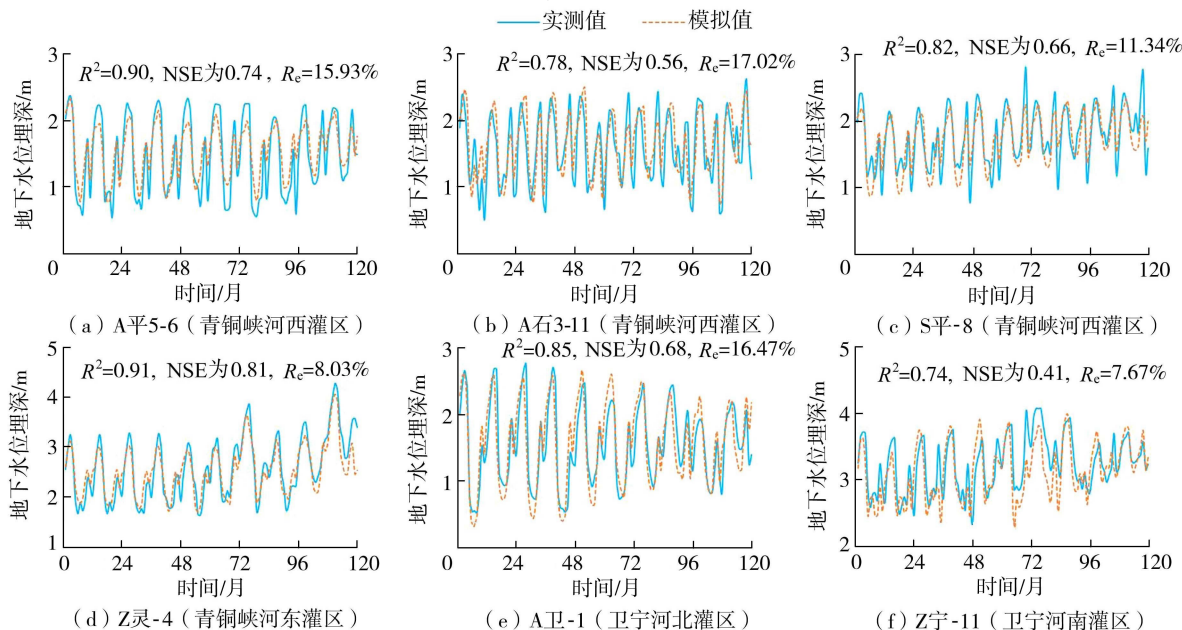


图6 月平均地下水位埋深模拟效果及统计指标计算结果

Fig.6 Simulation effect of monthly average groundwater depth and statistical index calculation results

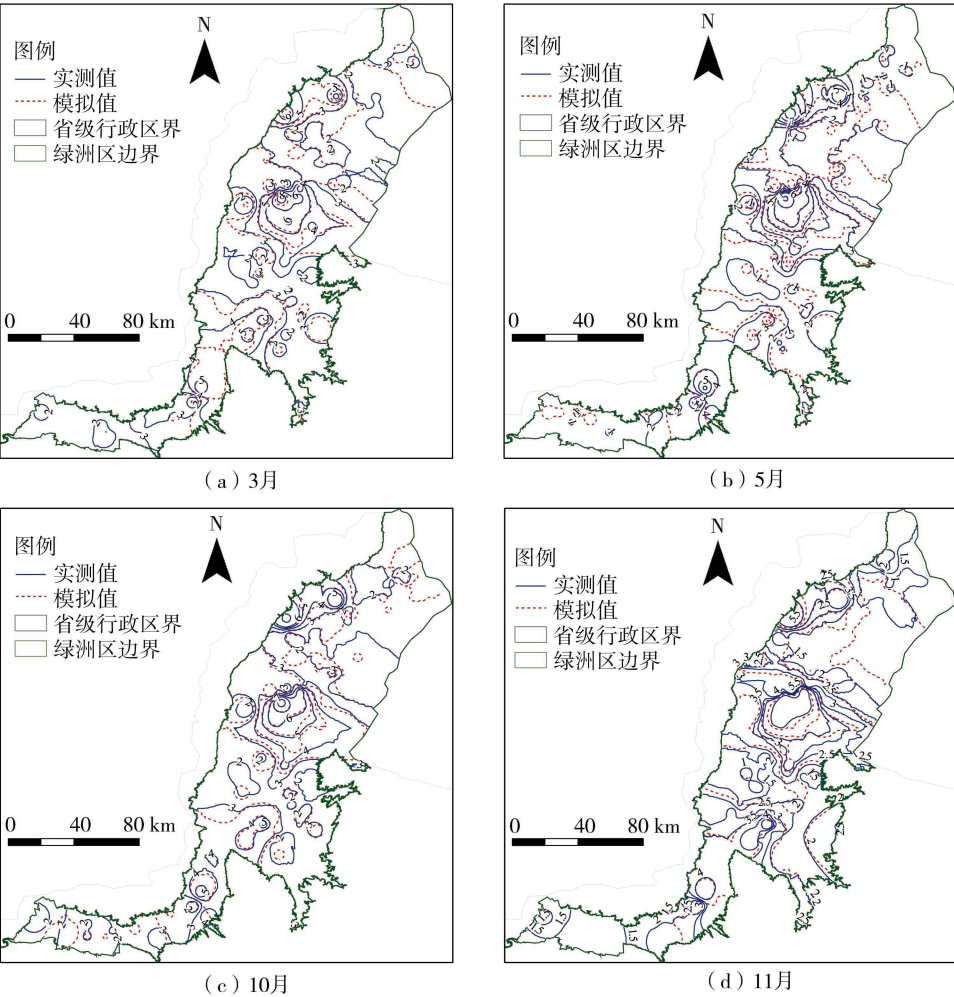


图 7 2017 年典型月地下水位埋深空间分布(单位:m)

Fig.7 Spatial distributions of groundwater depth of typical months in 2017 (unit:m)

监测水位埋深空间分布情况,模拟效果较好。

综上,构建的模型对宁夏引黄灌溉绿洲水循环的模拟结果整体较好,可用于绿洲灌溉用水效率的计算分析。

2.3 绿洲引耗水量变化

不同土地利用类型蒸散消耗的灌溉水量占各自蒸散消耗水量的比例存在较大差异(图 8),河湖湿地、农田蒸散消耗的灌溉水量在各自蒸散消耗水量中的平均占比超过 74.7%,而林草地则较低,草地的平均占比最低,仅为 21.0%。这一结果是由于河湖湿地和农田的蒸散耗水主要来源于引水灌溉,而林草地几乎不直接引水灌溉,蒸散耗水来源主要是降水和地下水,地下水主要由灌溉水入渗产生,故蒸散耗水中来源于灌溉水的比例较小;林地蒸散消耗的灌溉水量显著多于草地,因为林地多是深根植被,比起多为浅根系的草地植被,可吸收利用更多地下水,故林地蒸散耗水中来源于灌溉水的比例较高。整体来看,农田和生态系统蒸散消耗的灌溉水量在其蒸散消耗水量中的平均占比达 67.2%,生态系统

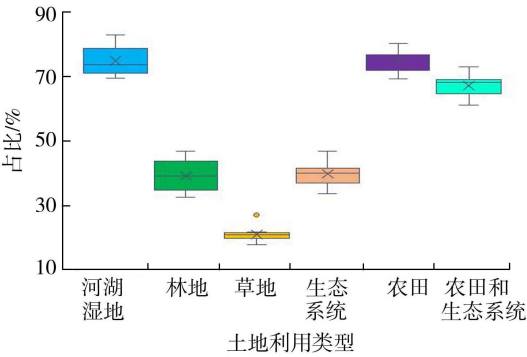


图 8 2008—2017 年不同土地利用类型蒸散消耗的灌溉水量在其蒸散消耗水量中的占比

Fig.8 Proportions of irrigation water consumption by evapotranspiration to total evapotranspiration water consumption of different land use types from 2008 to 2017

蒸散消耗的灌溉水量在其蒸散消耗水量中的平均占比达 39.8%,说明灌溉水不仅服务农业生产,还对维持绿洲生态有重要作用。

表 1 为 2008—2017 年研究区相关水量年际变化。从降水量年际变化可以看出,2008—2009 年、

2011 年、2013 年降水较少,属于枯水年;2012 年、2016 年属于降水偏多年份。10 a 间降水量均值为 20.49 亿 m³,2013 年降水量最少,2016 年降水量最多,分别为 14.41 亿 m³和 25.96 亿 m³。从灌溉引水量年际变化来看,2008—2017 年引水量呈现减少的趋势,主要原因是灌区近年来持续节水使引水量持续减少;2008—2011 年引水量较其他年份多,都超过 58.0 亿 m³,是节水水平相对较低和其间降水总体偏少共同作用的结果;2016 年引水量最少,仅为 46.64 亿 m³,是持续节水和极丰水年共同作用的结果。因此,引水量的变化受灌区节水改造和降水量共同影响。同时也必须看到随着灌区持续节水,河湖湿地的生态补水量逐年增加,特别是 2012 年以来生态补水量显著增加。

从表 1 可以看出,2008—2017 年农田蒸散消耗的灌溉水量均值为 22.53 亿 m³,农田和生态系统二者蒸散消耗的灌溉水量年际变化较小,略有增加,均值为 28.43 亿 m³,变化范围为 27.01 亿 ~ 31.47 亿 m³。生态系统蒸散消耗的灌溉水量呈现先减少后增加的趋势,2008—2011 年减少趋势与林草地蒸散消耗的灌溉水量减少趋势一致,2012—2017 年增加趋势与河湖湿地蒸散消耗的灌溉水量增加趋势一致,总体维持在一个较稳定的水平,均值为 3.30 亿 m³,生态系统蒸散消耗的灌溉水量占农

田和生态系统蒸散消耗灌溉水量之和的比例为 12.21% ~ 13.84%。产生上述变化的原因是 2008—2011 年节水导致地下水位下降、部分林草地退化,进而引起林草地蒸散消耗的灌溉水量减少,2012 年后自治区政府大力进行河湖湿地生态补水,以恢复河湖湿地面积,同时加强林草地保护与恢复,共同促使生态系统蒸散消耗的灌溉水量呈现增加趋势。由以上分析可知,灌区持续开展节水改造并没有对农业生产产生负面影响,但对绿洲生态有一定影响,主要表现在河湖湿地水量平衡越来越依赖于人工生态补水,如生态补水从 2008 年的 1.07 亿 m³持续增加到 2017 年的 2.17 亿 m³,其主要原因是节水导致地下水位显著下降,使河湖湿地的补给减少,出现萎缩甚至干涸,需要进行人工生态补水维持一定的水面。

2.4 考虑生态耗水的绿洲灌溉用水效率评价

模型计算的未考虑生态耗水的灌溉用水效率与实测的灌溉水有效利用系数总体上较为接近,但前者略小于后者(图 9(a)),原因是首尾测算分析法假设贮存在作物根系层的灌溉水量会全部被作物吸收利用,然而由于存在回归水的重复利用,导致该方法高估了实际的灌溉水有效利用系数。因此,通过模型计算绿洲灌溉水有效利用系数是合理的,也说明水循环过程模拟结果较为可靠。

表 1 2008—2017 年研究区相关水量年际变化

Table 1 Interannual changes in related water volumes in study area from 2008 to 2017

年份	灌溉引水量/亿 m ³	降水量/亿 m ³	生态补水量/亿 m ³	蒸散消耗的灌溉水量/亿 m ³				生态系统蒸散消耗的灌溉水量占农田和生态系统蒸散消耗的灌溉水量比例/%
				农田	生态系统	林草地	河湖湿地	
2008	61.79	18.94	1.07	23.54	3.27	1.59	1.68	12.21
2009	59.34	18.23	1.14	22.62	3.19	1.48	1.71	12.37
2010	58.29	20.09	1.21	21.83	3.23	1.58	1.65	12.90
2011	58.39	17.96	1.28	21.55	3.01	1.35	1.66	12.26
2012	53.97	25.62	1.34	19.58	2.85	1.32	1.53	12.69
2013	55.91	14.41	1.90	22.52	3.62	1.69	1.93	13.84
2014	54.37	20.68	2.18	23.01	3.48	1.42	2.06	13.13
2015	54.47	21.49	2.07	25.14	3.58	1.46	2.12	12.48
2016	46.64	25.96	1.73	22.93	3.22	1.32	1.90	12.32
2017	47.82	21.54	2.17	22.58	3.53	1.49	2.04	13.51

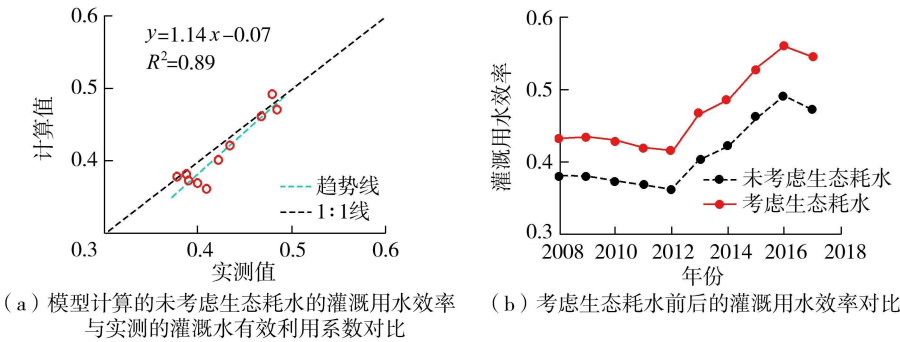


图 9 灌溉用水效率对比

Fig. 9 Comparison of irrigation water use efficiency

2008—2012 年研究区未考虑生态耗水的灌溉用水效率变化较小,在 0.36~0.38 范围内,其后呈现显著上升趋势,2016 年后超过 0.47,其中 2016 年最大,为 0.49(图 9(b))。考虑与未考虑生态耗水的灌溉用水效率的变化规律一致,但前者整体偏大 0.052~0.074,占未考虑生态耗水的灌溉用水效率的 13.9%~16.1%。2008—2012 年两种情况下灌溉用水效率差为 0.052~0.055,之后呈现上升趋势,从 2013 年的 0.065 上升到 2017 年的 0.074,主要原因是 2012 年以后大力进行生态补水以恢复河湖湿地面积,同时加强林草地保护与恢复,共同促使生态系统蒸散消耗的灌溉水量增加,进而使灌溉用水效率差上升趋势明显,反映了 2012 年以后自治区政府大力加强生态环境治理产生的积极效果。

3 讨 论

3.1 干旱区灌溉绿洲生态耗水来源

在干旱区,水分条件是生态演变的驱动因素,绿洲生态系统质量与水分条件及地下水位一一对应。在自然条件下,绿洲植被类型以天然地带性植被为主,其生态需水来源主要是河流径流形成的地下水和降水;但随着引水灌溉等高强度水土资源开发利用,植被类型改变为以非地带性植被为主,其生态需水来源主要是灌溉引水形成的地下水和降水,形成由人工灌溉支撑的绿洲生态系统^[37]。由于降水产流和入渗较少,灌溉是绿洲地下水的主要补给来源,造成引水条件好的绿洲地下水位埋深较小,而引水条件差的地下水位埋深较大。

选择我国西北干旱平原区的内蒙古河套灌溉绿洲、宁夏引黄灌溉绿洲、民勤灌溉绿洲和渭干河灌溉绿洲进行相关统计分析。由表 2 可知,各灌溉绿洲由于降水量和灌溉引水量不同,水分条件呈现出差异,其中,宁夏引黄灌溉绿洲单位面积输入水量最高为 857 mm,内蒙古河套和渭干河灌溉绿洲超过 500 mm,民勤灌溉绿洲的单位面积输入水量最少,

不足 200 mm,且四大绿洲降水量都小于 200 mm,但潜在蒸散发量均在 1 000 mm 以上。从林草地实际蒸散发量来看,地下水位浅埋深的内蒙古河套和宁夏引黄灌溉绿洲以及地下水位中埋深的渭干河灌溉绿洲,其林草地实际蒸散发量远大于降水量,绿洲植被可以吸收利用地下水,以获得较充分的水分维持蒸散耗水较大的非地带性植被生存,其植被为非地带性和地带性生态类型^[37];而地下水位大埋深的民勤灌溉绿洲林草地实际蒸散发与降水相当,绿洲植被很难吸收利用地下水,植被生长只能依靠有限降水,其植被为地带性生态类型。除了植被生态外,也发现地下水位大埋深的民勤和中埋深的渭干河灌溉绿洲湖泊较少或者没有,而在地下水位浅埋深的内蒙古河套和宁夏引黄灌溉绿洲则存在一定比例的湖泊,湖泊占比与地下水位埋深具有较明显的关系,这是由于干旱区平原绿洲湖泊地表水补给较少,主要依靠地下水补给。

以上分析表明,干旱区绿洲生态耗水直接来源于降水和地下水,而引水灌溉是地下水补给的重要形式,因此生态耗水中有相当一部分来源于灌溉水,图 8 和表 1 的结果印证了这个结论。灌溉改变绿洲生态主要是通过补给地下水,节水灌溉和开采地下水灌溉等导致地下水位下降,最终引起绿洲生态系统的演变:①地表植被无法吸收利用地下水,出现退化,可能出现荒漠化;②绿洲中依靠地下水补给的河湖湿地无法得到有效补给,出现萎缩甚至干涸,需要进行人工生态补水维持一定的水面。因此,在利用灌溉用水效率指标量化评价农业水资源高效利用效果时,需要考虑灌溉水产生的生态服务效益。

3.2 考虑生态耗水的灌溉用水效率影响因素

降水和灌溉水是绿洲耗水的重要来源,考虑生态耗水的灌溉用水效率(η_3)受二者影响较大,其相互关系见图 10。可以看出 η_3 随降水量增加呈增加的趋势,随灌溉引水量减少呈增加的趋势。此外, η_3 不仅与灌溉引水量和降水量有关,还与输水系统、灌

表 2 干旱区典型绿洲相关水量和生态指标计算结果对比

Table 2 Comparison of related water volumes and ecological indicator calculation results for typical irrigated oases in arid region

灌溉绿洲	面积/km ²	单位面积输入水量/mm		单位面积排水量/mm	潜在蒸散发量/mm	林草地实际蒸散发量/mm	不同土地利用类型面积占比/%				地下水位埋深/m
		降水量	灌溉引水量				林地	草地	湖泊	农田	
内蒙古河套灌溉绿洲	11 340	176	417	48	1 081	287	1	16	2	63	2.0~3.0
宁夏引黄灌溉绿洲	10 712	189	668	358	1 102	294	3	16	6	51	1.5~2.5
民勤灌溉绿洲	2 867	118	76	0	1 183	126	2	13	0	45	18.0~20.0
渭干河灌溉绿洲	5 654	67	439	61	1 226	282	5	13	1	70	4.0~5.8

注:绿洲面积由中国科学院资源环境科学数据中心 1 km 分辨率土地利用数据统计获得;降水量由国家气象科学数据中心的降水数据统计获得;引排水量由水文部门收集的各绿洲多年引排水数据统计获得;潜在蒸散发量由气象数据计算获得;林草地实际蒸散发量由逐月再分析数据统计获得(http://files.ntsg.umn.edu/data/ET_global_monthly/Global_8kmResolution/);不同土地利用类型面积占比由 2015 年土地利用数据统计获得;地下水位埋深由从水文部门收集的多年地下水位数据统计获得。

水技术有关,即使在相同的灌溉系统中,灌溉用水效率也不为常数,而是随降水量和灌溉引水量的变化而变化,这更符合实际情况。假设节水改造工程每年对 η_3 的贡献相同,建立 η_3 的经验估算模型,即:

$$\eta_3 = a + bT + cP_3 + dW_3 \quad (10)$$

式中: T 为节水改造历时; a 、 b 、 c 、 d 分别为回归系数。

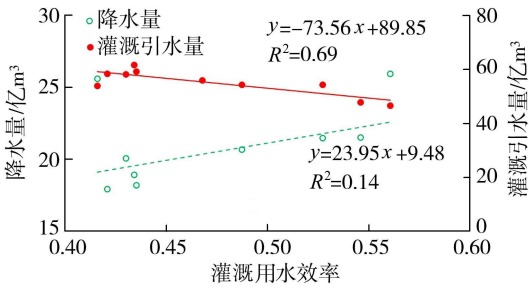


图 10 灌溉用水效率随降水量和灌溉引水量变化
Fig. 10 Variation of irrigation water use efficiency with precipitation and water diversion

根据图 10 中对应的数据对式(10)经验模型进行线性回归,得到

$$\eta_3 = 0.478 + 0.01219T - 0.00113P_3 - 0.00289W_3 \quad (11)$$

线性回归的 $R^2 = 0.78$, 拟合效果较好。由式(10)可知,在相同降水量情况下, η_3 随节水改造历时的增加而增加,随灌溉引水量的增加而减小,并且节水改造工程对 η_3 变化的影响大于灌溉引水量减少。这一结果与蒋磊等^[11]在内蒙古河套灌区的研究结果相反,主要是因为宁夏引黄灌溉绿洲是大引大排类型,而内蒙古河套灌区则主要是大引小排类型(表 2),节水改造对本研究区灌溉引水量减少的影响更大,进而表现出节水改造工程对 η_3 变化的影响更大。降水量也是影响 η_3 的一个重要方面,但影响较小。由于采用渠道防渗等节水措施,使得输水过程中损失的水量减少,导致 η_3 增加;灌溉引水条件的改善、渠系工程的改造、田间节水措施的实施以及各种管理技术手段的提高等因素综合作用是灌溉用水效率提高的根本原因^[16]。长期以来,以工程措施、农业措施和管理措施实现节水增效是宁夏灌区实现水资源优化配置和高效利用的核心,但必须认识到这些措施提高了灌溉水的农业用水效率,却在一定范围内减弱了灌溉水的生态服务效益,这可从节水灌溉影响绿洲生态得以印证。因此节水措施需同时兼顾农业和生态,通过考虑生态耗水的灌溉用水效率评价指标客观反映干旱区绿洲灌溉用水的综合效益,进行适度评价,为优化农业节水措施和节水潜力评价等提供相关理论依据。

3.3 考虑生态耗水的灌溉用水效率指标与方法的适用性

在最严格水资源管理制度下,灌区管理部门采用现行的指标,如灌溉水有效利用系数等评价灌溉用水效率,多通过改造渠系输配水工程减少输水损失,达到提升灌溉用水效率和降低灌溉定额的目的。然而节约的水量通常被用来扩大绿洲灌溉面积,导致耗水量增加,产生灌溉效率悖论^[23,34]。在灌区取水总量控制下,随着灌区蒸散耗水增加,出现地下水位下降、排水量减少以及水平方向的水循环过程减弱的现象,进而引发植被退化、河湖湿地萎缩甚至干涸以及土壤积盐问题,威胁灌区高质量发展^[23]。上述绿洲生态环境问题的产生与目前通行的灌溉用水效率评价方法有密切关系,为避免出现类似问题,需要同时将灌溉水的农业生产与生态服务效益纳入灌溉用水效率指标。本文提出的评价指标满足要求,但该指标未纳入灌溉水对灌区排水/排盐、水污染排放等方面的效益评价^[23,38],这是未来需要继续开展深入研究的重点。此外,该指标基于干旱、半干旱地区灌溉水对植被、河湖湿地生态具有重要的支撑作用而提出,而在湿润地区灌溉水的这种支撑作用大大减弱,该指标并不适用,构建类似指标时应重点考虑灌溉水对河湖湿地等水质方面产生的生态效益^[38-39]。本文提出的指标计算方法在宁夏引黄灌溉绿洲的应用表明,该方法合理可行,但还需探索更为简单易行的计算方法,促进其大范围推广应用。

4 结 语

本文提出的考虑生态耗水的干旱区绿洲尺度灌溉用水效率评价指标和方法在宁夏引黄灌溉绿洲取得了良好的应用效果。通过 WACM 模拟绿洲水循环过程和通量发现,绿洲生态系统蒸散消耗水量中灌溉水量平均占比达 39.8%,灌溉水对生态系统的支撑作用显著。提出的在绿洲尺度考虑生态耗水的灌溉用水效率评价指标与方法合理可行,能客观反映干旱区绿洲灌溉用水的综合效益;宁夏引黄灌溉绿洲灌溉水的生态服务效益占农业生产效益的 13.9% ~ 16.1%,生态服务效益明显。该研究可为干旱区水资源管理和生态保护提供理论支撑。

参考文献:

[1] 康绍忠. 藏粮于水 藏水于技:发展高水效农业 保障国家粮食安全[J]. 中国水利, 2022(13): 1-5. (KANG Shaozhong. Store grain in water and technology: development of highly-efficient agricultural water use for ensuring national food security [J]. China Water

- Resources,2022(13):1-5. (in Chinese))
- [2] BOS M G. Standards for irrigation efficiencies of ICID [J]. Journal of the Irrigation and Drainage Division, 1979,105(1):37-43.
- [3] HART W E, PERI G, SKOGERBOE G V. Irrigation performance;an evaluation[J]. Journal of Irrigation and Drainage Division,1979,105(3):275-288.
- [4] BURT C M, CLEMMENS A J, STRELKOFF T S, et al. Irrigation performance measures;efficiency and uniformity [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering,1997, 123(6):423-442.
- [5] 崔远来,熊佳. 灌溉水利用效率指标研究进展[J]. 水科学进展,2009,20(4):590-598. (CUI Yuanlai, XIONG Jia. Advances in assessment indicators of irrigation water use efficiency[J]. Advances in Water Science,2009,20(4):590-598. (in Chinese))
- [6] MOLDEN D. Accounting for water use and productivity [R]. Colombo:International Water Management Institute, 1997:16.
- [7] KELLER A, KELLER J, SECKLER D. Integrated water resource systems; theory and policy implications [R]. Colombo: International Irrigation Management Institute, 1996:14.
- [8] 吴迪,崔远来,黄文波,等. 基于改进 SWAT 模型的多水源灌区节水潜力尺度效应[J]. 农业工程学报,2021,37(12):82-90. (WU Di, CUI Yuanlai, HUANG Wenbo, et al. Scale effect of water-saving potential in multi-source irrigation systems based on modified SWAT model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2021,37(12):82-90. (in Chinese))
- [9] 刘路广,崔远来,吴瑕. 考虑回归水重复利用的灌区用水评价指标[J]. 水科学进展,2013,24(4):522-528. (LIU Luguang, CUI Yuanlai, WU Xia. Water use assessment indices under the influence of return flows in irrigation districts[J]. Advances in Water Science,2013, 24(4):522-528. (in Chinese))
- [10] GRAFTON R Q, WILLIAMS J, PERRY C J, et al. The paradox of irrigation efficiency [J]. Science, 2018, 361(6404):748-750.
- [11] 蒋磊,杨雨亭,尚松浩. 基于遥感蒸发模型的干旱区灌区灌溉效率评价[J]. 农业工程学报,2013,29(20):95-101. (JIANG Lei, YANG Yuting, SHANG Songhao. Evaluation on irrigation efficiency of irrigation district in arid region based on evapotranspiration estimated from remote sensing data [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(20):95-101. (in Chinese))
- [12] 汪富贵. 大型灌区灌溉水利用系数的分析方法[J]. 节水灌溉,2001(6):25-26. (WANG Fugui. Analyzing method of irrigation water using coefficient for large-scale irrigation areas[J]. Water Saving Irrigation,2001(6):25-26. (in Chinese))
- [13] 许建中,赵竞成,高峰,等. 灌溉水利用系数传统测定方法存在问题及影响因素分析[J]. 中国水利,2004(17):39-41. (XU Jianzhong, ZHAO Jingcheng, GAO Feng, et al. Problems with traditional measurement methods of irrigated water use coefficient and its affected factor analysis [J]. China Water Resources,2004(17):39-41. (in Chinese))
- [14] 李英能. 浅论灌区灌溉水利用系数[J]. 中国农村水利水电,2003(7):23-26. (LI Yingneng. Elementary discussion on water use efficiency of irrigation district[J]. China Rural Water and Hydropower,2003(7):23-26. (in Chinese))
- [15] LANKFORD B. Localising irrigation efficiency [J]. Irrigation and Drainage,2006,55(4):345-362.
- [16] 赵勇,裴源生,陆垂裕. 大型灌区灌溉用水有效利用系数比较分析[J]. 中国水利,2009(3):15-17. (ZHAO Yong, PEI Yuansheng, LU Chuiyu. Comparison of effective utilization coefficient of irrigated water in large irrigation districts[J]. China Water Resources,2009(3):15-17. (in Chinese))
- [17] 尚松浩,蒋磊,杨雨亭. 基于遥感的农业用水效率评价方法研究进展[J]. 农业机械学报,2015,46(10):81-92. (SHANG Songhao, JIANG Lei, YANG Yuting. Review of remote sensing-based assessment method for irrigation and crop water use efficiency [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(10):81-92. (in Chinese))
- [18] WU X J, ZHOU J, WANG H J, et al. Evaluation of irrigation water use efficiency using remote sensing in the middle reach of the Heihe River, in the semi-arid Northwestern China[J]. Hydrological Processes,2015,29(9):2243-2257.
- [19] 王浩,秦大庸,王研,等. 西北内陆干旱区生态环境及其演变趋势[J]. 水利学报,2004(8):8-14. (WANG Hao, QIN Dayong, WANG Yan, et al. Ecological status and its evolution trend in arid region of northwest China [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004(8):8-14. (in Chinese))
- [20] 栗晓玲,姜田亮,牛纪苹. 生态干旱的概念及研究进展[J]. 水资源保护,2021,37(4):15-21. (SU Xiaoling, JIANG Tianliang, NIU Jiping. Concept and research progress of ecological drought [J]. Water Resources Protection,2021,37(4):15-21. (in Chinese))
- [21] 严登华,王浩,杨舒媛,等. 干旱区流域生态水文耦合模拟与调控的若干思考[J]. 地球科学进展,2008,23(7):773-778. (YAN Denghua, WANG Hao, YANG Shuyuan, et al. Some opinions on the eco-hydrological processes simulation and regulation in arid basins [J]. Advances in Earth Science,2008,23(7):773-778. (in Chinese))
- [22] 王浩,许新发,成静清,等. 水资源保护利用“四水四

- 定”.基本认知与关键技术体系[J].水资源保护,2023,39(1):1-7. (WANG Hao,XU Xinfu,CHENG Jingqing,et al. “Basing four aspects on water resources” in water resources protection and utilization: basic cognition and key technology system[J]. Water Resources Protection, 2023,39(1):1-7. (in Chinese))
- [23] 沈彦俊,齐永青,罗建美,等.地理学视角的农业节水理论框架与水资源可持续利用[J].地理学报,2023,78(7):1718-1730. (SHEN Yanjun, QI Yongqing, LUO Jianmei, et al. The combined pathway to sustainable agricultural water saving and water resources management: an integrated geographical perspective[J]. Acta Geographica Sinica,2023,78(7):1718-1730. (in Chinese))
- [24] 贾绍凤,柳文华.水资源开发利用40%阈值溯源与思考[J].水资源保护,2021,37(1):87-89. (JIA Shaofeng,LIU Wenhua. Tracing and thinking about 40% threshold value of water resources development and utilization ratio[J]. Water Resources Protection,2021,37(1):87-89. (in Chinese))
- [25] 钱正英.西北地区水资源配置生态环境建设和可持续发展战略研究:综合卷[M].北京:科学出版社,2004.
- [26] 雷志栋,胡和平,杨诗秀,等.塔里木盆地绿洲耗水分析[J].水利学报,2006,37(12):1470-1475. (LEI Zhidong, HU Heping, YANG Shixiu, et al. Analysis on water consumption in oases of the Tarim Basin[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2006,37(12):1470-1475. (in Chinese))
- [27] 邓铭江,石泉.内陆干旱区水资源管理调控模式[J].地球科学进展,2014,29(9):1046-1054. (DENG Mingjiang, SHI Quan. Management and regulation pattern of water resource in inland arid regions[J]. Advances in Earth Science,2014,29(9):1046-1054. (in Chinese))
- [28] 崔远来,董斌,李远华,等.农业灌溉节水评价指标与尺度问题[J].农业工程学报,2007,23(7):1-7. (CUI Yuanlai, DONG Bin, LI Yuanhua, et al. Assessment indicators and scales of water saving in agricultural irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23 (7): 1-7. (in Chinese))
- [29] 陈皓锐,黄介生,伍靖伟,等.灌溉用水效率尺度效应研究评述[J].水科学进展,2011,22(6):872-880. (CHEN Haorui, HUANG Jiesheng, WU Jingwei, et al. Review of scale effect on the irrigation water use efficiency[J]. Advances in Water Science,2011,22(6):872-880. (in Chinese))
- [30] 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 agriculture water-saving potential in irrigated oasis in arid regions [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2023, 54 (12): 1440-1451. (in Chinese))
- [31] 裴源生,赵勇,张金萍,等.广义水资源高效利用理论与核算[M].郑州:黄河水利出版社,2008.
- [32] 谢先红,崔远来,代俊峰,等.农业节水灌溉尺度分析方法研究进展[J].水利学报,2007,38(8):953-960. (XIE Xianhong, CUI Yuanlai, DAI Junfeng, et al. Review on scaling analysis approaches for agricultural water saving irrigation[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2007,38(8):953-960. (in Chinese))
- [33] 崔远来,李远华,陆垂裕.灌溉用水有效利用系数尺度效应分析[J].中国水利,2009(3):18-21. (CUI Yuanlai, LI Yuanhua, LU Chuiyu. Scale effect of effective utilization coefficient of irrigated water[J]. China Water Resources,2009(3):18-21. (in Chinese))
- [34] 宋健峰,王玉宝,吴普特.灌溉用水反弹效应研究综述[J].水科学进展,2017,28(3):452-461. (SONG Jianfeng, WANG Yubao, WU Pute. A reviews on irrigation water rebound effect [J]. Advances in Water Science, 2017,28(3):452-461. (in Chinese))
- [35] 赵勇,陆垂裕,肖伟华.广义水资源合理配置研究(II):模型[J].水利学报,2007,38(2):163-170. (ZHAO Yong, LU Chuiyu, XIAO Weihua. Study on rational deployment of generalized water resources II: model[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2007,38(2):163-170. (in Chinese))
- [36] 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.
- [37] 赵文智,任珩,杜军,等.河西走廊绿洲生态建设和农业发展的若干思考与建议[J].中国科学院院刊,2023,38(3):424-434. (ZHAO Wenzhi, REN Heng, DU Jun, et al. Thoughts and suggestions on oasis ecological construction and agricultural development in Hexi Corridor [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences,2023,38(3):424-434. (in Chinese))
- [38] 王浩,王建华,胡鹏.水资源保护的新内涵:“量-质-域-流-生”协同保护和修复[J].水资源保护,2021,37(2):1-9. (WANG Hao, WANG Jianhua, HU Peng. New connotation of water resources protection: “quantity-quality-domain-connectivity-biology” coordinated protection and restoration[J]. Water Resources Protection,2021,37(2):1-9. (in Chinese))
- [39] 王沛芳,钱进,胡斌,等.农田灌溉水循环利用系统构建方法[J].河海大学学报(自然科学版),2022,50(4):7-12. (WANG Peifang, QIAN Jin, HU Bin, et al. Construction method of irrigation water recycling system of farmland [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2022,50(4):7-12. (in Chinese))

(收稿日期:2023-08-14 编辑:施业)