

协同调控水-农业-生态的干旱区多水源优化配置

朱兴宇^{1,2}, 栗晓玲^{1,2*}, 胡雪雪², 褚江东², 贾丹妮², 吴海江², 张 特²

(1. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 杨凌 712100)

摘要: 干旱区农业发展往往以挤占生态用水和超采地下水为代价, 考虑水-农业-生态互馈关系的水资源优化配置有助于平衡利益冲突。该研究以地下水均衡、经济效益和生态用水满足度为调控目标, 构建基于水-农业-生态协同调控的多水源优化配置模型, 并推求协调发展度计算式, 提出了结合 NSGA-II 算法和协调发展度的协同优化算法, 分析石羊河流域水、农业和生态之间的权衡和协同关系, 确定水-农业-生态协同提升下的水资源配置方案以及适宜的农业和生态用水比例。结果表明, 现状条件下, 六河子系统的水资源优化配置方案的经济效益可提升 1.9%, 实现地下水正均衡 0.59 亿 m³; 全流域农业和生态用水比例为 90%: 10%, 渠井用水比为 67%: 33%。平水年保障蔡旗来水为 3.48 亿 m³/a 时, 能够以牺牲中游 1.6% 的经济效益实现生态用水满足度和地下水均衡量分别较基准情景提升 4.8% 和 18.6%。研究为协同调控复杂的水-农业-生态关系提供了一种有效方法, 可为干旱区流域水资源规划与管理提供参考。

关键词: 水资源; 优化; 生态; 水-农业-生态; 协调发展度; 协同调控; 用水比例; 石羊河流域

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202307012

中图分类号: TV213.4; S273

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2024)-02-0239-10

朱兴宇, 栗晓玲, 胡雪雪, 等. 协同调控水-农业-生态的干旱区多水源优化配置[J]. 农业工程学报, 2024, 40(2): 239-248. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202307012 <http://www.tcsae.org>

ZHU Xingyu, SU Xiaoling, HU Xuexue, et al. Optimal allocation of multiple water sources in arid areas based on water-agriculture-ecology coordinated regulation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(2): 239-248. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202307012 <http://www.tcsae.org>

0 引言

随着人口增长和城市化进程推进, 水资源短缺、粮食危机和生态环境退化已经成为制约全球大部分地区发展的瓶颈^[1-2]。作为最大的用水部门, 全球的农业用水占用水总量的 69%^[3], 并且灌溉农业还在进一步扩大, 持续增长的农业需水不得不挤占其他部门的供水量, 尤其是生态系统, 这导致农业和生态之间存在强烈的用水竞争关系。在中国内陆干旱区, 脆弱的生态系统对水土资源开发响应十分敏感^[4], 以灌溉农业为主导的用水结构造成人工侧支水循环不断扩大, 改变了下游绿洲的水量 and 水质, 导致植被和湿地退化、地表干涸、尾间湖消失等生态问题^[5-6]。严重的生态问题威胁着干旱区的粮食安全 and 人类生存。因此, 将水-农业-生态系统作为一个整体, 全面考虑水的资源、生态和经济属性, 平衡经济发展和生态健康, 增加协同以促进跨部门合作, 是干旱区水资源配置中亟待解决的现实问题, 而揭示不同配置方案下生态目标和经济目标间的权衡转化规律也是水资源

配置面临的科学问题。

研究表明, 干旱区的水资源、经济发展和生态环境之间存在明显冲突^[7-9], 这凸显了合理配置水资源在经济和生态可持续发展中的必要性。多目标规划在平衡不同用水主体的利益方面表现出突出优势, 在处理以水为中心的复杂关系时得到广泛应用^[10-12]。其中, 生态需水被作为约束条件或是与其他用水户并列进行优化配置^[13], 并且随着对二元水循环研究的深入, 水资源配置更加注重协调经济和生态环境需求, 从不同层级对生态水文指标和社会经济发展目标进行综合调控^[14-15], 实现水、经济和生态之间均衡有序发展。在干旱半干旱区, 地下水维持着粮食生产和生态健康, 其作为水-农业-生态系统的核心要素而在水资源配置中被重视。以水资源配置为核心、结合地下水模拟的优化模型以地下水均衡量为调控目标或将地下水生态水位作为约束, 通过优化取用水过程有效控制地下水超采^[8,16-17]。目前针对农业生产和生态恢复过程中的水资源消耗已经有了广泛研究, 但同时考虑内陆干旱区的水安全、经济发展和生态健康, 在水-农业-生态协同提升的基础上进行多目标优化配置, 并进一步确定农业和生态适宜用水比例的研究仍较少。同时, 在寻求多目标优化模型最优解时, 目前的研究通常使用权重赋值^[15,18]、模糊满意度^[19]、多目标线性分式规划^[20-21]、模糊规划^[22]等方法将多目标优化问题从形式上转化为单一目标优化问题。这些方法得到的水资源分配方案往往

收稿日期: 2023-07-02 修订日期: 2023-11-06

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFD1900501); 中央高校基本科研业务费专项资金 (2023HHZX004)

作者简介: 朱兴宇, 研究方向为水文水资源。

Email: zhuxingyu@nwfau.edu.cn

*通信作者: 栗晓玲, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为水文模拟。

Email: xiaolingsu@nwfau.edu.cn

较为单一,并且从高维目标空间向低维转化过程中弱化了目标间的权衡关系,导致多目标之间的制约关系未能得到清晰展现。

在干旱区,水资源形成区和消耗区相分离,并且呈现绿洲水循环增强和荒漠水循环衰竭态势,上中游过度用水必然会造成下游水量的减少^[4],加剧区域内部以及区域之间的用水矛盾。因此,需要研究强人类活动下的水资源分配格局,以实现流域水-农业-生态的协同发展。当前,对西北内陆干旱区水-农业-生态关系的研究通常借助水文模型对地表水、地下水以及生态要素进行模拟^[8,23]。例如, TIAN 等^[24]通过地表和地下水库的联合运行来探索农业用水需求、中游地下水可持续性和下游生态用水之间的平衡; ZHENG 等^[25]基于地下水-地表水耦合模型(Coupled Groundwater and Surface Water Flow Model, GSFLOW)在生态约束下对灌溉供水过程进行高时空分辨率模拟,揭示了黑河流域水、农业和生态之间的复杂联系。受限于流域水资源总量,下游生态系统的恢复一定程度上将以中游生态系统退化和经济效益降低为代价。值得注意的是,石羊河流域的人类活动很大程度上改变了自然水循环过程,山区河流到达山前冲洪积平原后几乎完全被引用,造成部分天然河流断流,加之复杂的水文地质条件和频繁的水转化,建立水文模型难度较大,模型模拟精度难以保证。当前鲜有研究对整个流域的地表水和地下水同时进行模拟,因此利用多目标优化方法分析石羊河流域的水-农业-生态关系是一种途径。

本文以石羊河流域为研究区域,系统考虑干旱区水资源的社会、经济、生态等多属性特点,以地下水均衡量最大、经济效益最大和生态用水满足度最大为目标,构建基于水-农业-生态协同调控的多水源优化配置模型,分析现状条件和不同水土资源管理情景下地下水均衡、经济发展和生态健康之间的权衡和协同关系,并根据协调发展度来确定水-农业-生态协同提升下的最优水资源配置方案和适宜的农业和生态用水比例,以期为流域综合治理和解决干旱区水-农业-生态关系提供途径。

1 模型和方法

1.1 协同调控模型

同时考虑水资源、农业和生态目标,建立基于水-农业-生态协同调控的多水源优化配置模型。通过优化水资源在不同计算单元的农业和生态之间的分配来增加 3 个系统之间的协同效应,进而保障水安全、促进经济持续发展和生态健康。模型具体表达形式如下:

1.1.1 协同调控目标

1) 水资源系统

干旱区地下水资源具有 3 个属性:①资源属性:地下水资源对人类社会具有服务价值;②经济属性:地下水资源是工农业生产中重要的生产要素;③生态属性:地下水的过度开采会引起自然植被退化死亡。干旱区地下水埋深通常较深,维持一定地下水位是确保农业和生态可持续发展的关键,而地下水位的变化可通过地下水

均衡量反映,因此将地下水均衡量最大作为水资源系统的调控目标。

$$\max f_{\text{GWB}} = f\left(\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J X_{ij}^s, \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J X_{ij}^g\right) \quad (1)$$

式中 f_{GWB} 表示地下水均衡量,为地表水和地下水用水量的函数,由水资源转化模拟确定; X_{ij}^s 和 X_{ij}^g 分别为第 i 个单元第 j 用水部门的地表水和地下水用水量,亿 m^3 ; $j=1, 2$ 分别表示农业和生态用水部门; I 和 J 分别为计算单元和用水部门的数量。

2) 农业系统

以农业经济效益最大作为农业系统的调控目标。对于“无灌不植”的内陆干旱区,在其他因素一定的情况下,农业经济效益和农业用水量显著相关。通过统计资料建立的水-农业经济效益定量关系表示为

$$\max f_{\text{AEB}} = f\left(\sum_{i=1}^I (X_{i1}^s + X_{i1}^g)\right) \quad (2)$$

式中 f_{AEB} 表示农业经济效益; X_{i1}^s 、 X_{i1}^g 分别为第 i 计算单元农业的地表水和地下水用水量,亿 m^3 。

3) 生态系统

干旱区较深的地下水位难以为植被提供稳定的水源^[26],灌溉用水的有效供给成为维持生态植被健康的有力保障,因而将生态用水满足度最大作为生态系统的调控目标。

$$\max f_{\text{EWS}} = d + (1-d) \frac{\sum_{i=1}^I (X_{i2}^s + X_{i2}^g) - W_{i2,\min}^{\text{eco}}}{W_{i2,\max}^{\text{eco}} - W_{i2,\min}^{\text{eco}}} \quad (3)$$

式中 f_{EWS} 表示生态植被用水满足度; d 为当生态用水为生态需水下限时的满足度,一般可取 0.5; X_{i2}^s 、 X_{i2}^g 分别为第 i 计算单元生态植被的地表水和地下水用水量,亿 m^3 ; $W_{i2,\max}$ 和 $W_{i2,\min}$ 分别为第 i 计算单元生态需水量的上下限值,亿 m^3 。

1.1.2 模型约束条件

1) 地表水、地下水可供水量约束:各计算单元的农业和生态用水量应不大于该单元的可供水量。

$$\sum_{j=1}^J X_{ij}^s \leq W_{ij}^{\text{SW}} (\forall i, j) \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^J X_{ij}^g \leq W_{ij}^{\text{GW}} (\forall i, j) \quad (5)$$

式中 W_{ij}^{SW} 和 W_{ij}^{GW} 分别为第 i 个单元第 j 用水部门的地表水和地下水可用水量,亿 m^3 ,通过水资源转化模拟确定。

2) 农业供水量约束:农业用水量不大于农业需水量。

$$X_{i1}^s + X_{i1}^g \leq W_{i1} (\forall i) \quad (6)$$

式中 W_{i1} 为第 i 计算单元的农业需水量,亿 m^3 。

3) 生态需水约束:生态植被用水量介于生态植被需水上下限值之间。

$$W_{i2,\min} \leq X_{i2}^s + X_{i2}^g \leq W_{i2,\max} (\forall i) \quad (7)$$

4) 地下水生态水位约束:为避免过高的地下水位引

起土壤盐碱化以及影响植被正常生长，地下水位埋深应不小于生态水位下限。

$$h_i - \frac{\Delta V_i}{F_i \mu_i} \geq h_{\min} \quad (8)$$

式中 h_i 为第 i 计算单元的初始地下水位，m； ΔV 为地下水蓄量变化量，即地下水均衡量，亿 m^3 ； F_i 为第 i 计算单元的面积， km^2 ； μ_i 为第 i 计算单元的给水度； $h_{\min}$ 为地下水生态水位下限，m。

5) 非负约束：农业和生态用水量不能为负值。

$$X_{ij}^s \geq 0 \quad (\forall i, j) \quad (9)$$

$$X_{ij}^g \geq 0 \quad (\forall i, j) \quad (10)$$

1.2 模型求解和方案优选

本文定义和推求协调发展度计算公式，提出结合 NSGA-II 算法^[27] 和协调发展度的协同优化算法，对上述模型进行求解，评估水-农业-生态 3 个子系统之间的协调发展程度，并从 Pareto 非劣解集中选取协调发展度最大的方案作为最终的优选方案。在分析不同情景时，也使用该方法确定最优的水资源分配方式。

用离差系数表示目标之间的协调性，离差越小则目标之间的协调性越好。在廖重斌^[28] 提出的两目标协调度计算式基础上，推求三目标协调度的计算式。离差系数 (C_v) 表示为

$$C_v = \frac{S}{\mu} = \sqrt{3 \times \left(1 - \frac{fg+fh+gh}{\left(\frac{f+g+h}{\sqrt{3}} \right)^2} \right)} \quad (11)$$

式中 S 为标准差， μ 为均值， f 、 g 、 h 分别为 f_{GWB} 、 f_{AEB} 、 f_{EWS} 归一化后的标准化值。

离差系数 C_v 越小的充要条件是 C' 越大。

$$C' = \frac{fg+fh+gh}{\left(\frac{f+g+h}{\sqrt{3}} \right)^2} \quad (12)$$

因此，定义三目标协调度 (F_c) 计算式如式 (13) 所示， $F_c \in [0, 1]$ ， F_c 越大则系统协调程度越高。

$$F_c = \frac{3(fg+fh+gh)}{(f+g+h)^2} \quad (13)$$

在由标准化的 3 个目标构成的三维空间中，定义任一点在理想点和原点连线上的投影占比为该点对应的发展度。原点 $O(0, 0, 0)$ 代表系统发展的最差状态， $B(1, 1, 1)$ 为系统发展的最佳状态， $P(f, g, h)$ 是系统任一点的发展状况， OB 代表了最佳发展方向。系统的发展度与发展状况在最优发展轨迹上的投影呈正相关，因此本文定义发展度 (F_D) 计算式为

$$F_D = \frac{|OP| \cdot \cos(\theta)}{|OB|} \quad (14)$$

式中 θ 为 OP 与 OB 之间的夹角， $\theta \in [0, \pi/2]$ ，代表了任一点的发展状况和最佳发展方向的偏离程度。

基于水-农业-生态协同调控的水资源优化配置目标

是要增加系统协同效应和促进系统发展。在水资源匮乏的干旱区，协调和发展一定程度上是 2 个具有冲突性的目标，最优水资源分配方案的协调发展度 (F) 是关于协调度 F_c 和发展度 F_D 的两目标决策问题：

$$\max F(x) = \max\{F_c(x), F_D(x)\} \quad (15)$$

式中 x 表示不同方案的用水量； F 、 F_c 和 F_D 同时受到用水量 x 的影响。

本文引入参数 η ， $\eta \in [0, 1]$ ， η 从 0 到 1 的变化表示从发展优先到协调优先。根据区域发展需要和决策偏好，通过调节 η 使决策过程在协调度和发展度之间进行权衡。将协调发展度 F 表示为

$$F = F_c^\eta F_D^{1-\eta} \quad (16)$$

2 案例分析

2.1 研究区概况

石羊河流域位于甘肃省河西走廊东部，乌鞘岭以西，总面积 4.16 万 km^2 。位于上游的祁连山区为流域产流区，产流面积 1.11 万 km^2 。出山径流经中游绿洲消耗和转化后流向下游，下游蒸发强烈，为径流散失区。自 20 世纪 50 年代以来，绿洲规模扩张导致盆地内部和中下游之间的农业和生态用水矛盾突出，下游蔡旗来水随武威盆地农业取水增加而呈显著减少趋势，导致下游民勤盆地出现严重的生态问题^[29]。直到 2007 年《石羊河流域重点治理规划》^[30] 实施后，严格规定蔡旗来水不小于 2.97 亿 m^3/a ，并限制民勤地下水开采量不高于 0.86 亿 m^3/a ，生态问题才逐渐得到缓解。

石羊河流域依据水力联系可划分为西河、六河和大靖 3 个独立的子系统，其中西河子系统分为永昌盆地和金川昌宁盆地，六河子系统分为武威南盆地和民勤盆地，武威南盆地依据灌溉水源组成进一步划分为中游混灌区和中游井灌区^[31]，将这 6 个区域作为计算单元 (图 1)。由于六河子系统是石羊河流域经济、政治和社会发展的重点区域，人口占比超过 71.1%，实际灌溉面积占全流域 73.6%，同时也是河西地区水资源开发利用程度最高和供需矛盾最为突出的地区，因此本文以六河子系统为重点进行分析。

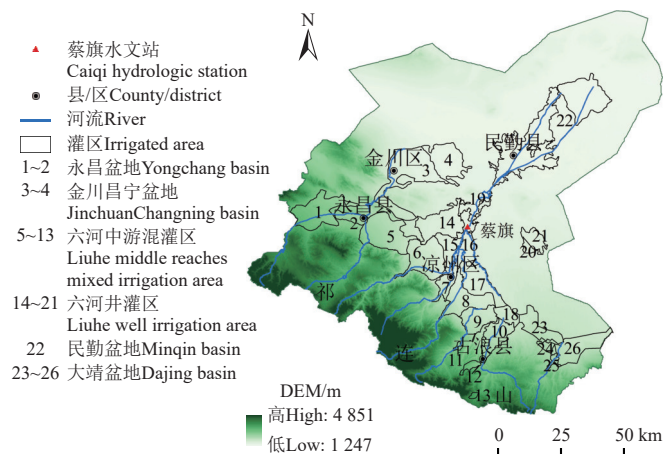
2.2 数据来源与处理

本文所需数据包括流域可供水量数据、社会经济发展数据、气象数据、土地利用类型数据、流域生活、生产和生态需水数据等，数据资料主要来源于水资源公报、统计年鉴、参考文献和相关网站。

1) 可供水量。根据 2010—2020 年《石羊河流域水资源公报》，流域多年平均径流量 15.04 亿 m^3 ，引疏济金、景电二期等调水工程多年平均调水量 1.10 亿 m^3 ，2020 年污水处理回用量 0.52 亿 m^3 。

2) 灌溉需水。2010—2020 年石羊河流域气象站逐日气象数据来源于中国气象数据网 (<http://data.cma.cn/>)。根据 Penman 公式计算参考蒸发蒸腾量^[32]，将作物多年平均蒸发蒸腾量减去作物生育期内多年平均有效

降雨量作为净灌溉定额,由此结合现状种植面积计算出各计算单元的灌溉净需水量,得到全流域灌溉净需水量为 14.99 亿 m^3 。



注: DEM 为数字高程模型,分辨率为 $90\text{ m} \times 90\text{ m}$ 。
Note: DEM is digital elevation model, its spatial resolution is $90\text{ m} \times 90\text{ m}$ 。

图 1 研究区示意图

Fig.1 Schematic diagram of the study area

3) 生态植被需水。某一植被类型的生态需水为该植被在某一地下水位的面积乘以相应的潜水蒸发量与植被系数,潜水蒸发量由阿维利扬诺夫公式确定[31,33],各计算单元的植被面积从土地利用类型数据中提取得到,其中 2020 年土地利用类型数据来自于中国科学院资源环境科学与数据中心 (https://www.resdc.cn/),分辨率为 $30\text{ m} \times 30\text{ m}$ 。计算得到生态植被需水量上下限值分别为 0.91 亿、3.35 亿 m^3 。

4) 基本参数。水资源转化模拟参数取值参考文献[31],渠系水利用系数和田间水利用系数分别取 0.69 和 0.92。

5) 水-农业经济效益定量关系。如图 2 所示,根据 2015—2020《武威/金昌统计年鉴》统计资料,建立农业经济效益和灌溉用水量之间的线性关系,其 $R^2 = 0.93$ 。

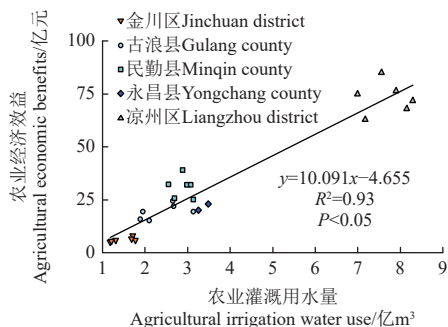


图 2 石羊河流域灌溉用水量和农业经济效益之间的关系

Fig.2 Relationship between irrigation water use and agricultural economic benefits in Shiyang River Basin

2.3 水土资源管理情景

以 2020 年社会经济发展状况和多年平均来水为基准情景,在基准情景的基础上假设两类情景。I 类情景与减少六河子系统的中游农业取水量有关,分为减少中游混灌区地表水引水 I-1、减少中游井灌区地下水提水 I-

2 和按比例减少中游混灌区地表水引水和中游井灌区地下水提水 I-3 共 3 种情况,每种情况取水减少比例又分为 5%、10%、15% 和 20%。II 类情景假设六河子系统的灌溉面积减少比例分别为 3%、6%、9%、12% 和 15%。随着经济发展以及城市化进程推进,可能导致耕地面积减少,II 类情景符合这一预期。

2.4 水资源转化模拟

石羊河流域地表水地下水多次转化,形成了独特的水资源重复利用开发模式。中游混灌区引大量出山口来水并辅以少量地下水进行灌溉,地表水渗漏补给地下水后被中游井灌区抽取再次灌溉。中游混灌区和井灌区之间水转化关系较为直观,使用水均衡模型来计算中游混灌区和井灌区的水转化量:

$$\sum V_{\text{补}} - \sum V_{\text{排}} = \Delta V \quad (17)$$

式中 $V_{\text{补}}$ 和 $V_{\text{排}}$ 分别为中游井灌区地下水的补给量和排泄量,亿 m^3 ,两者的计算参考文献[31,34]。

中游井灌区和下游混灌区之间地质条件复杂,水资源转化关系不易确定,难以通过直观的水量平衡方程来描述其转化关系,因而通过多元线性回归关系来模拟蔡旗来水。建立蔡旗来水量 Q_{cq} 和六河子系统中游的地表径流量 R_s 、降水量 P_r 、农业用水量 X_A 、工业用水量 W_I 和生活用水量 W_L 之间的多元线性回归关系 (式 (18), $R^2 = 0.92$, $P < 0.05$)。

$$Q_{\text{cq}} = 0.146R_s + 0.005P_r - 0.164X_A - 0.527W_I - 1.362W_L + 3.437 \quad (18)$$

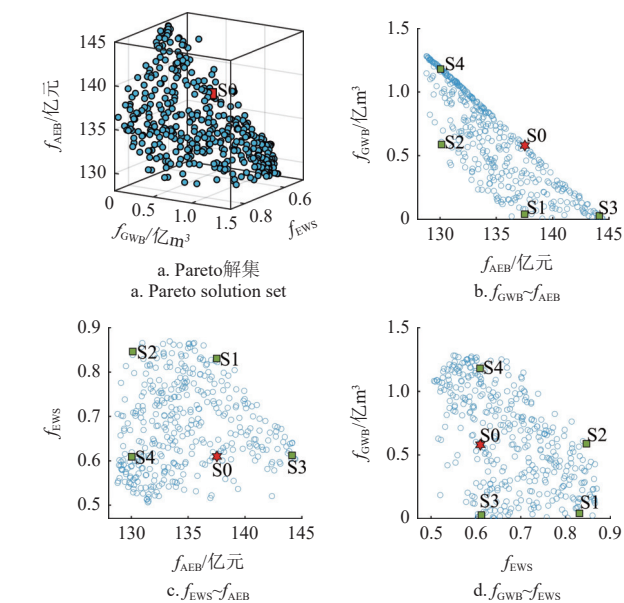
3 结果与分析

3.1 Pareto 最优解

满足模型约束的非劣解 (400 组) 共同构成 Pareto 最优解集,并将 Pareto 解集投影到二维平面,反映水-农业-生态以及两两目标之间的权衡和冲突 (图 3)。结果表明,提升经济效益会刺激对水资源的需求,挤占生态用水,这也是导致地下水位下降的主要因素 (图 3b~图 3c)。 f_{GWB} 和 f_{AEB} 之间呈负相关性带状分布,当经济效益从 129.93 亿元提高到 144.93 亿元,地下水均衡量从 1.21 亿 m^3 减少至 0 (图 3b),说明经济效益的增加将不可避免地以地下水均衡量减少甚至以地下水超采为代价。图 3c 和图 3d 中也呈现类似结果,两两目标之间都存在权衡关系。图 3b~图 3d 中沿纵轴方向,上下边界之间存在一定距离,表明不同的生态用水和地下水抽水的空间分布将会带来不同的经济效益和生态用水满足度。

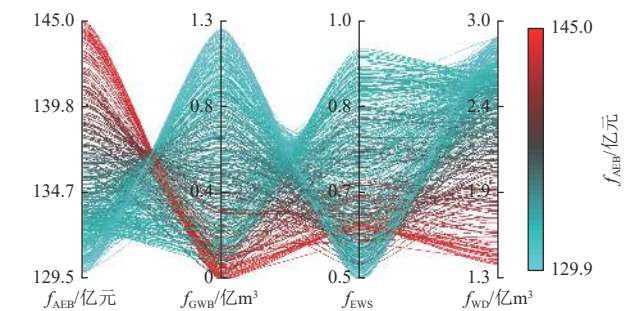
在三维空间中难以清晰直观地反映各目标间的权衡关系,将目标值绘于平行坐标图中展示 Pareto 最优解之间的差异。如图 4 所示,纵轴表示 3 个调控目标和对应的缺水量 f_{WD} ,所有 Pareto 最优解的取值范围为 $129.93\text{ 亿元} < f_{\text{AEB}} < 144.93\text{ 亿元}$ 、 $0 < f_{\text{GWB}} < 1.21\text{ 亿 m}^3$ 、 $0.50 < f_{\text{EWS}} < 0.95$ 、 $1.44\text{ 亿 m}^3 < f_{\text{WD}} < 2.93\text{ 亿 m}^3$ 。相邻坐标之间,多数目标值在平行坐标轴顶端和底部之间剧烈波动,这种变化形成的斜线段体现了水、农业和生态之间存在明

显的权衡关系。



注： f_{GWB} 为地下水均衡量，亿 m^3 ； f_{AEB} 为农业经济效益，亿元； f_{EWS} 为生态用水满足度；S0~S4 分别为不同的水资源配置方案。Note: f_{GWB} is groundwater balance, 亿 m^3 ; f_{AEB} is agricultural economic benefits, 亿元; f_{EWS} is satisfaction of ecological water use; S0~S4 are different water resources allocation schemes.

图 3 Pareto 最优解及其投影
Fig.3 Pareto-optimal solutions and its projection



注： f_{WD} 为 Pareto 解集对应的缺水。
Note: f_{WD} is the water deficit corresponding to the Pareto solution set

图 4 Pareto 最优解的平行坐标图

Fig.4 Parallel coordinate plot of Pareto-optimal solutions

现实情况下，石羊河流域水资源供需平衡是建立在挤占生态用水和超采地下水的基础之上，水-农业-生态关系处于失衡状态，在满足最低生态需水和地下水零超采条件下，现状需水大于供水，仅六河子系统就存在 1.44 亿~2.93 亿 m^3/a 的缺水量（图 4）。这说明目前的水资源分配方式是次优的，应当进行调整以实现水-农业-生态协同发展，使得决策能够实现更高的经济效益和产生较低的负面影响。

3.2 最优的水资源配置方式

根据 2020 年《石羊河流域水资源公报》，六河子系统的农业经济效益约为 135 亿元，流域内超采区的地下水位以下降为主，这一现实情况与优化结果存在一定差距，说明当前的水资源开发利用方式既没有充分实现水资源的经济价值，也没能全面控制住地下水超采。通过

计算不同水资源配置方案的协调发展度（参数 η 取 0.6），从前述 400 组水资源配置方案中确定兼顾多维目标的折衷方案 S0，该方案下六河子系统的经济效益为 137.53 亿元，生态用水满足度为 0.60，地下水均衡量为 0.59 亿 m^3 。相较于现实情况，S0 的经济效益提升 1.9%，更大程度满足生态用水需求，特别是实现了地下水正均衡。基于 S0，遵循地下水均衡量、经济效益和生态用水满足度三者之一较当前更优的原则，选取 4 种水资源分配方案 S1~S4 进行结果对比分析（图 3b~图 3d）。S1 在与 S0 相同的经济效益（ f_{AEB} ）下具有最大的生态用水满足度（ f_{EWS} ），S2 在与 S0 相同的地下水均衡量（ f_{GWB} ）下具有最大的生态用水满足度（ f_{EWS} ），S3 和 S4 在与 S0 相同的生态用水满足度（ f_{EWS} ）下分别具有最大的经济效益（ f_{AEB} ）和最大的地下水均衡量（ f_{GWB} ）。结果显示方案 S2 和 S4 表现出较差的经济效益，约为 130.10 亿元，较 S0 低 5.4%；方案 S1 和 S3 的地下水均衡量则几乎为 0，分别较 S0 低 92.9% 和 95.2%。结果表明，在多目标优化中单目标的提升往往会损害其他目标的利益，造成系统协调有序程度降低。这意味着多目标权衡有助于减少低维目标优化引起的决策偏差，通过计算协调发展度确定综合考虑不同部门利益的折衷方案是必要的。

因此，将方案 S0 作为现状条件下满足水-农业-生态协同发展的最优决策方案，其对应的农业和生态用水比例以及渠井用水量如表 1 所示。全流域和六河子系统的农业和生态用水比均为 90%: 10%（生活、工业等部门的需水完全满足）。其中，六河中游混灌区、永昌盆地以及民勤盆地的生态用水占比较高，分别为 10%、16% 和 18%。六河中游混灌区和永昌盆地的生态需水量大是由于两地植被茂盛而需要较多水量维持生长，民勤盆地生态用水占比高则是因为生态用水中包含了向尾间湖人工输送的 3 180 万 m^3 水量。对于地表水和地下水用水量，流域各区域均不同程度开采利用地下水，并且受地表水地下水频繁转化的影响，整个流域用水量中地下水占有很大比例，渠井用水比为 67%: 33%。

表 1 不同计算单元农业和生态用水比例及渠井用水量

计算单元 Calculation units		用水比例 Proportion of water consumption/%		渠井用水量 Quantity of water use for canal and well/亿 m^3	
		农业 Agriculture	生态 Ecology	地表水 Surface water	地下水 Groundwater
六河子系统 Liuhe subsystem	中游混灌区	90	10	8.42	0.35
	中游井灌区	96	4	-	4.93
	民勤盆地	82	18	2.50	0.83
西河子系统 Xihe subsystem	永昌盆地	84	16	1.81	0.69
	金川昌宁盆地	93	7	1.54	0.38
大靖子系统 Dajing	大靖盆地	94	6	2.01	0.66
	全流域 Whole Basin	90	10	16.28	7.84

3.3 不同情景下水-农业-生态关系分析

在地表水资源充分利用的前提下, 农业发展势必会加大抽取地下水以满足灌溉需求, 造成地下水均衡量减少。因此, 将不同情景下农业用水量和地下水均衡量作为研究水—农业关系的关键变量。表 2 为不同情景下六河子系统农业用水量的变化情况。相较于基准情景, I、II 类情景的农业用水量减少量分别为 0.06 亿~1.71 亿 m³ 和 0.24 亿~1.32 亿 m³。尽管减少中游农业用水将增加蔡旗来水(表 2), 但流向下游的水量部分在输水过程中损失, 部分为生态所用, 将导致下游农业获得的水量增量小于中游农业减少的取水量, 致使全流域的农业用水减少, 从而农业经济效益降低。对于地下水均衡量, I-1 和 I-3 这 2 类情景下六河子系统的地下水均衡量增加更为明显, 分别比基准情景高出 6.9%~49.2% 和 8.1%~44.3%。与 I-2 情景相比, I-1 和 I-3 这 2 种情景更有利于增加蔡旗来水, 可为民勤盆地农业用水提供更多的地表水量, 减少对地下水的依赖。

表 2 I、II 类情景下各水量要素变化
Table 2 Changes in water quantity elements under scenarios I and II 亿 m³

水土资源管理情景 Scenarios of water and soil resource management		农业用水量 Agricultural water consumption		蔡旗来水量 Inflow of Caiqi	
		地表水	地下水		
		Surface water	Groundwater		
基准情景 Baseline		8.85	5.24	3.36	
I 类情景 Scenario I	I -1	5%	8.54	5.37	3.43
		10%	8.26	5.21	3.52
		15%	7.86	5.08	3.63
		20%	7.56	4.82	3.73
	I -2	5%	8.90	5.13	3.43
		10%	9.08	4.77	3.48
		15%	8.82	4.74	3.54
		20%	9.02	4.33	3.60
	I -3	5%	8.72	5.25	3.42
		10%	8.59	5.08	3.50
		15%	8.47	4.83	3.59
		20%	8.33	4.61	3.65
II 类情景 Scenario II	3%	8.68	5.17	3.48	
	6%	8.40	5.10	3.52	
	9%	8.19	4.97	3.57	
	12%	8.15	4.90	3.61	
	15%	8.02	4.75	3.69	

注: 基准情景为 2020 年社会经济发展状况和多年平均来水。I 类情景: 减少取水量; I-1~I-3 分别为减少地表水引水、减少地下水提水、按比例减少地表水引水和地下水提水; 5%~20% 为减少比例。II 类情景: 减少灌溉面积, 3%~15% 为减少比例。
Note: The baseline scenario is the socio-economic development status and multi-year average inflow in 2020. Scenario I: Reduce water intake; I-1 to I-3 refer to reducing surface water diversion, reducing groundwater pumping, proportionally reducing surface water diversion and groundwater pumping, respectively; 5% to 20% denote the reduction ratio. Scenario II: Reduce irrigation area, with a reduction proportions of 3% to 15%.

如图 5 所示, 民勤盆地生态用水量和蔡旗来水量呈正相关关系, 随蔡旗来水的增加, I、II 这 2 类情景下民勤盆地的生态用水量在 0.57 亿 m³ 到 1.10 亿 m³ 之间变化。表 2 和图 6b 均表明 I、II 这 2 类情景下中游农业用水的减少可增加蔡旗来水, 进而提升六河子系统的生态用水满足度。减少中游农业取水有利于平衡中游农业和生态用水矛盾, 而增加流向下游的水量则对保障民勤盆地的生态用水和提升流域生态用水满足度至关重要。蔡旗来水在六河子系统中起着纽带作用, 保证一定的蔡旗来水是维持和改善民勤盆地生态状况的关键。当蔡旗

来水较小时, 水量将会被优先分配到农业系统, 导致生态用水处于较低水平, 生态健康状况难以得到提升。

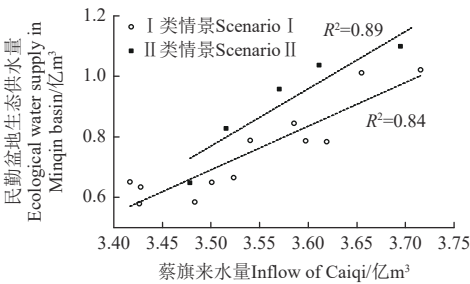


图 5 民勤盆地生态供水量和蔡旗来水的关系
Fig.5 Relationship between ecological water allocation in the Minqin Basin and the inflow of Caiqi

图 6 为流域水-农业-生态关系的定量表示, 反映了不同情景下六河子系统的经济效益、生态用水满足度以及地下水均衡量随蔡旗来水的变化情况。从图 6b 和图 6c 中可以发现随着中游农业取水量和灌溉面积的减少, 生态用水满足度和地下水均衡量均处于增加状态。当蔡旗来水量从 3.36 亿 m³ 增加到 3.72 亿 m³, 六河子系统的经济效益降低了 10.2%, 而生态用水满足度和地下水均衡量分别从 0.60 提升到 0.76、0.59 亿 m³ 增至 0.88 亿 m³。平水年在维持外调水量不变的情况下, 增加蔡旗来水有利于增加流域生态用水和地下水均衡量, 但蔡旗来水的增加是以损失中游的经济效益为代价, 因此有必要进行综合评估来确定合适的蔡旗来水量 Q_{cq} 。根据图 6 曲线的变化趋势, Q_{cq} 在 3.48 亿 m³ (河道来水量 1.29 亿 m³, 西营河和景电二期输水量 2.19 亿 m³) 前后经济效益发生了明显变化, 3.48 亿 m³ 之前经济效益下降缓慢, 之后快速下降。同时, Q_{cq} 为 3.48 亿 m³ 时生态用水满足度和地下水均衡量都得到进一步提升。换言之, 减少一定的中游农业用水以增加流向下游的水量是必要的, 损失中游一定的经济效益来提升六河子系统的生态健康状况和地下水位, 有利于增加系统的协同效应。

当中游混灌区引水量比基准情景减少 6% (0.43 亿 m³) 时, 可以实现蔡旗来水较《石羊河流域重点治理规划》规定的 2.97 亿 m³ 增加 0.51 亿 m³, 达到 3.48 亿 m³。此时, 六河子系统的农业用水量和生态用水量分别为 13.87 亿 m³ 和 1.62 亿 m³, 地下水正均衡 0.70 亿 m³ (图 6), 牺牲中游 1.6% 的经济效益实现生态用水满足度和地下水均衡量分别提升 4.8% 和 18.6%。该情况下具体的水资源配置结果见表 3。

对于民勤盆地的农业和生态用水比例, 郭萍等^[22] 计算得到不同可信度水平下的比例为 79%: 21%, 本文民勤的比例为 82%: 18%, 由于前者农业用水中只考虑了小麦和玉米的用水量, 并未考虑其他作物, 因而导致农业用水占比偏小, 从而生态用水占比偏大。总的来说, 本文结果和郭萍等^[22] 研究结果相近。但需要指出的是, 本文对协同提升水-农业-生态关系进行了初探, 仍有不足, 未来还需加强以下方面的研究:

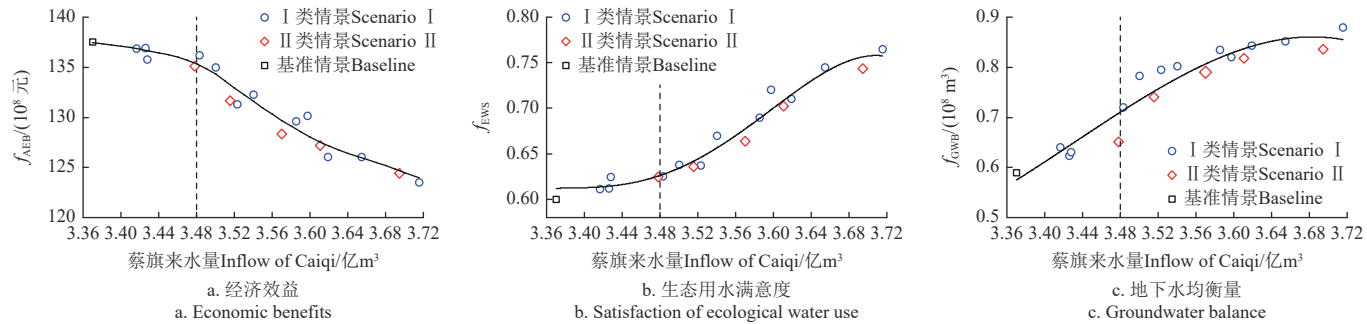


图 6 不同情景下经济效益、生态用水满足度、地下水均衡量和蔡旗来水量的关系
Fig.6 The relationship among economic benefits, satisfaction of ecological water use, groundwater balance, and the inflow of Caiqi under diverse scenarios

表 3 水资源优化配置毛供水量
Table 3 Gross water supply based on optimal allocation of water resources (亿 m³)

计算单元 Calculation units		农业用水 Agricultural water use		生态用水 Ecological water use		其他部门用水 Water use in other sectors		总供水量 Total water supply	
		地表水 Surface water	地下水 Ground-water	地表水 Surface water	地下水 Ground-water	地表水 Surface water	地下水 Ground-water	地表水 Surface water	地下水 Ground-water
六河子系统 Liuhe subsystem	中游混灌区	6.60	0.001	0.47	0.31	1.11	0.01	8.18	0.31
	中游井灌区	-	4.42	-	0.22	-	0.32	-	4.96
	民勤盆地	1.91	0.93	0.58	0.05	0.10	0.08	2.59	1.06
	小计	8.51	5.36	1.05	0.57	1.21	0.41	10.77	6.34
西河子系统 Xihe subsystem	永昌盆地	1.28	0.63	0.30	0.05	0.26	0.004	1.84	0.69
	金川昌宁盆地	0.78	0.36	0.07	0.01	0.77	0.01	1.61	0.38
	小计	2.05	0.99	0.37	0.07	1.03	0.01	3.45	1.07
大靖子系统 Dajing subsystem	大靖盆地	1.81	0.65	0.14	0.01	0.07	0.01	2.02	0.66
合计 Total		12.38	6.99	1.55	0.65	2.31	0.43	16.24	8.07

1) 变化环境下水文序列具有非一致性以及需水存在不确定性, 进一步考虑供需水不确定性和水文序列非一致性开展长序列模拟计算, 以减少配置结果的不确定性和增加可靠性。

2) 除了水资源分配方式, 水-农业-生态系统还受到灌溉规模和种植结构、生态植被规模、节水水平、河道输水时间、供水工程调度等供需侧因素的影响, 因此, 需要进一步开展多层次、多因素、全过程的调控以全面提升系统的协同发展水平。

4 结 论

本文提出了一种考虑干旱区水-农业-生态互馈关系的水资源配置方法, 结合多目标优化和协调发展度来分析水-农业-生态系统的协同效应和权衡问题。将模型应用于石羊河流域, 探讨了不同水土资源管理情景对流域水-农业-生态关系的影响, 得到水-农业-生态协同发展下的水资源配置方案。获得以下主要结论:

1) 仅考虑某单一目标的决策和最优决策 S0 相比, 方案 S2 和 S4 的经济效益降低了 5.4%, 方案 S1 和 S3 的地下水均衡量分别降低了 92.9% 和 95.2%, 说明干旱区的水资源管理需要在水安全、农业发展和生态健康之间保持适当平衡, 未考虑不同用水主体之间的相互影响将会出现决策偏差而产生次优的决策方案, 从而降低系统的协同程度。

2) 当前石羊河流域的水资源开发利用方式还没有充

分实现水资源的经济价值, 也没能达到全面控制住地下水超采。与现状条件相比, 六河子系统的水资源最优分配方案的经济效益可提升 1.9%, 更大程度满足生态用水需求, 实现地下水正均衡 0.59 亿 m³; 整个流域的农业和生态用水比例为 90%: 10%, 渠井用水比为 67%: 33%。

3) 流域的地下水均衡量和生态用水满足度之间存在协同效应, 但两者和农业发展之间存在权衡, 反映了流域中下游之间水、农业和生态之间复杂的互馈关系。通过减少中游农业取水量保障蔡旗来水为 3.48 亿 m³/a 时, 能够以牺牲中游 1.6% 的经济效益实现生态用水满足度和地下水均衡量分别较基准情景提升 4.8% 和 18.6%, 进一步增加系统的协同效应。

本文通过优化调控初步协调水资源、农业和生态之间的矛盾, 探寻更加合理的水资源分配方式, 可为管理部门进行决策提供依据以及为相应研究提供参考。

[参 考 文 献]

[1] ZHAO Y, WEI Y P, LI S B, et al. Downstream ecosystem responses to middle reach regulation of river discharge in the Heihe River Basin, China[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2016, 20: 4469-4481.

[2] ZHAO D D, LIU J G, SUN L X, et al. Quantifying economic-social-environmental trade-offs and synergies of water-supply constraints: An application to the capital region of China[J]. *Water Research*, 2021, 195: 116986.

- [3] UNESCO, UN-Water. United Nations World Water Development Report 2020: Water and Climate Change[R]. Paris: UNESCO. [2020-03-21]. <https://www.unwater.org/publications/un-world-water-development-report-2020>.
- [4] 邓铭江. 破解内陆干旱区水资源紧缺问题的关键举措——新疆干旱区水问题发展趋势与调控策略[J]. 中国水利, 2018(6): 14-17.
DENG Mingjiang. National water conservation action is a key measure for alleviating water shortage in inland dry areas: A study on the development trend of water issues in the dry areas of Xinjiang and its allocation and regulation strategy[J]. China Water Resources, 2018(6): 14-17. (in Chinese with English abstract)
- [5] 陈亚宁, 李玉朋, 李稚, 等. 全球气候变化对干旱区影响分析[J]. 地球科学进展, 2022, 37(2): 111-119.
CHEN Yaning, LI Yupeng, LI Zhi, et al. Analysis of the impact of global climate change on dryland areas[J]. Advances in Earth Science, 2022, 37(2): 111-119. (in Chinese with English abstract)
- [6] MA Y, LI Y P, HUANG G H, et al. Sustainable management of water-agriculture-ecology nexus system under multiple uncertainties[J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 341: 118096.
- [7] 冯起, 李宗礼, 高前兆, 等. 石羊河流域民勤绿洲生态需水与生态建设[J]. 地球科学进展, 2012, 27 (7): 806-814.
FENG Qi, LI Zongli, GAO Qianzhao, et al. Ecosystem water needs and ecosystem rehabilitation of Minqin Oasis in Shiyang River Basin[J]. Advance in Earth Science, 2012, 27(7): 806-814. (in Chinese with English abstract)
- [8] WU X, ZHENG Y, WU B, et al. Optimizing conjunctive use of surface water and groundwater for irrigation to address human-nature water conflicts: A surrogate modeling approach[J]. *Agricultural Water Management*, 2016, 163: 380-392.
- [9] WANG Y Z, GUO X W, ZHANG F, et al. The spatially-distributed ANN-optimization approach for water-agriculture-ecology nexus management under uncertainties and risks[J]. *Agricultural Water Management*, 2022, 271: 107780.
- [10] 何英, 唐晓宇, 彭亮, 等. 南疆丰收灌区水资源多目标优化配置方案优选[J]. 农业工程学报, 2021, 37(6): 117-126.
HE Ying, TANG Xiaoyu, PENG Liang, et al. Optimized selection of the solution for multi-objective optimal allocation of water resources in Fengshou Irrigation Areas of South Xinjiang[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(6): 117-126. (in Chinese with English abstract)
- [11] 李茉, 曹凯华, 付强, 等. 不确定条件下考虑水循环过程的灌区多水源高效配置[J]. 农业工程学报, 2021, 37(18): 62-73.
LI Mo, CAO Kaihua, FU Qiang, et al. Efficient allocation of multiple water sources in irrigation areas considering water cycle process under uncertainty[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(18): 62-73. (in Chinese with English abstract)
- [12] 张帆, 蔡宴朋, 郭萍, 等. 灌区干支渠渗漏估算方法及其在水资源优化配置中的应用[J]. 农业工程学报, 2021, 37(4): 140-147.
ZHANG Fan, CAI Yanpeng, GUO Ping, et al. Method for estimating trunk and branch canal leakage in irrigation districts and its application in optimal allocation of water resources[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(4): 140-147. (in Chinese with English abstract)
- [13] 粟晓玲, 康绍忠. 石羊河流域多目标水资源配置模型及其应用[J]. 农业工程学报, 2009, 25(11): 128-132.
SU Xiaoling, KANG Shaozhong. Multi-objectives allocation model of water resources and its application in the Shiyang River basin[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(11): 128-132. (in Chinese with English abstract)
- [14] 邓铭江. 三层级多目标水循环调控理论与工程技术[J]. 干旱区地理, 2019, 42(5): 961-975.
DENG Mingjiang. System of three-scale multi-object water cycle regulation theory and engineering technology[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(5): 961-975. (in Chinese with English abstract)
- [15] 李丽琴, 王志璋, 贺华翔, 等. 基于生态水文阈值调控的内陆干旱区水资源多维均衡配置研究[J]. 水利学报, 2019, 50(3): 377-387.
LI Liqin, WANG Zhizhang, HE Huaxiang, et al. Research of water resources multi-dimensional equilibrium allocation based on ec-hydrological threshold regulation in inland arid region[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(3): 377-387. (in Chinese with English abstract)
- [16] NAGHDI S, BOZORG-HADDAD O, KHORSANDI M, et al. Multi-objective optimization for allocation of surface water and groundwater resources[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 776: 146026.
- [17] 粟晓玲, 宋悦, 刘俊民, 等. 耦合地下水模拟的渠井灌区水资源时空优化配置[J]. 农业工程学报, 2016, 32(13): 43-51.
SU Xiaoling, SONG Yue, LIU Junmin, et al. Spatiotemporal optimization allocation of water resources coupling groundwater simulation model in canal-well irrigation district[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(13): 43-51. (in Chinese with English abstract)
- [18] 宋歌, 陈玉珊, 张珊, 等. 非充分灌溉条件下多目标整数规划配水模型构建[J]. 农业工程学报, 2022, 38(9):

- 129-139.
- SONG Ge, CHEN Yushan, ZHANG Shan, et al. Construction of water allocation model with multi-objective integer programming under inadequate irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(9): 129-139. (in Chinese with English abstract)
- [19] 张帆, 任冲锋, 蔡宴朋, 等. 基于复合多目标方法的灌区水资源优化配置[J]. 农业机械学报, 2021, 52(11): 297-304.
- ZHANG Fan, REN Chongfeng, CAI Yanpeng, et al. Optimally allocating of water resources among irrigation districts based on composite multiobjective method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(11): 297-304. (in Chinese with English abstract)
- [20] NIU G, ZHENG Y, HAN F, et al. The nexus of water, ecosystems and agriculture in arid areas: A multiobjective optimization study on system efficiencies[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 223: 105697.
- [21] WANG Y Z, LIU L, GUO S S, et al. A bi-level multi-objective linear fractional programming for water consumption structure optimization based on water shortage risk[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 237: 117829.
- [22] 郭萍, 潘琦, 岳琼, 等. 基于 2 型模糊集的多目标农业-生态水土资源优化配置[J]. 农业机械学报, 2022, 53(12): 353-365.
- GUO Ping, PAN Qi, YUE Qiong, et al. Multi-objective Modelling for Optimal Allocation of Agricultural-ecological Water and Land Resources Based on Type-2 Fuzzy Sets[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(12): 353-365. (in Chinese with English abstract)
- [23] ZHANG Z D, ZHENG Y, HAN F, et al. Recovery of an endorheic lake after a decade of conservation efforts: Mediating the water conflict between agriculture and ecosystems[J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 256: 107107.
- [24] TIAN Y, XIONG J Z, HE X, et al. Joint Operation of Surface Water and Groundwater Reservoirs to Address Water Conflicts in Arid Regions: An Integrated Modeling Study[J]. *Water*, 2018, 10(6): 1105.
- [25] ZHENG Y, TIAN Y, DU E H, et al. Addressing the water conflict between agriculture and ecosystems under environmental flow regulation: An integrated modeling study[J]. *Environmental Modelling and Software*, 2020, 134: 104874.
- [26] 曹乐, 聂振龙, 刘敏, 等. 民勤绿洲天然植被生长与地下水埋深变化关系[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(3): 25-33.
- CAO Le, NIE Zhenlong, LIU Min, et al. Changes in natural vegetation growth and groundwater depth and their relationship in the Minqin oasis in the Shiyang River Basin[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(3): 25-33. (in Chinese with English abstract)
- [27] DEB K, PRATAP A, AGARWA S, et al. A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2002, 6(2): 182-197.
- [28] 廖重斌. 环境与经济协调发展的定量评判及其分类体系——以珠江三角洲城市群为例[J]. 热带地理, 1999, 19(2): 76-82.
- LIAO Chongbin. Quantitative judgement and classification system for coordinated development of environment and economy: A case study of the city group in the Pearl River Delta[J]. *Tropical Geography*, 1999, 19(2): 171-177. (in Chinese with English abstract)
- [29] 猴天宇, 佟玲, 康德奎, 等. 中国西北干旱区石羊河流域重点治理综合效应评价[J]. 农业工程学报, 2022, 38(12): 74-84.
- GOU Tianyu, TONG Ling, KANG Dekui, et al. Evaluating the comprehensive effects of the Key Master Plan of the Shiyang River Basin in arid areas of northwest China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(12): 74-84. (in Chinese with English abstract)
- [30] 甘肃省水利厅, 甘肃省发展和改革委员会. 石羊河流域重点治理规划[M]. 兰州: 甘肃省水利厅, 甘肃省发展和改革委员会, 2007.
- [31] 粟晓玲. 石羊河流域面向生态的水资源合理配置理论与模型研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2007.
- SU Xiaoling. Theory and Model of Water Resources Responsible Allocation Oriented Ecology in the Shiyang River Basin[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2007. (in Chinese with English abstract)
- [32] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and Drainage Paper 56[R]. Rome: Food and Agricultural Organization of the United Nations (FAO), 1998.
- [33] 李骊, 张青青, 李宏, 等. 近 28a 克孜河流域天然植被需水满足程度研究[J]. 干旱区研究, 2021, 38(4): 1075-1084.
- LI Li, ZHANG Qingqing, LI Hong, et al. The status of natural vegetation water demand in the Kezi River Basin in recent over 28 years[J]. *Arid Zone Research*, 2021, 38(4): 1075-1084. (in Chinese with English abstract)
- [34] 张光辉, 刘少玉, 谢悦波, 等. 西北内陆黑河流域水循环于地下水形成演化模式[M]. 北京: 地质出版社, 2005.

Optimal allocation of multiple water sources in arid areas based on water-agriculture-ecology coordinated regulation

ZHU Xingyu^{1,2}, SU Xiaoling^{1,2✉}, HU Xuexue², CHU Jiangdong², JIA Danni², WU Haijiang², ZHANG Te²

(1. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest A & F University, Yangling 712100, China; 2. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling 712100, China)

Abstract: Water scarcity, food crisis, and ecological degradation have been the bottlenecks in a considerable percentage of the world under the dual influence of global climate and human activities. Trade-offs between agricultural development and ecological effects are of great importance, especially in arid areas with highly developed agriculture. Water resources can be allocated, according to the mutual feedback relation among water, agriculture, and ecology. The agricultural and ecological water supply can also be optimized in different units. Synergy effects of the system can be expected to compromise the conflicts for the water security, sustainable development, and ecological health. In this study, an optimal allocation model of multi-water resources was constructed in the Shiyang River Basin using water-agriculture-ecology synergistic regulation. The objectives were taken as the groundwater balance, agricultural benefits, and ecological water use. Besides, the coordinated development degree was deduced using collaborative optimization with the NSGA-II algorithm. Trade-off and collaborative relationships were then quantified among water, agriculture, and ecology. The allocation schemes of water resources were finally proposed for the suitable water use proportion between agricultural and ecological under the synergistic promotion of water-agriculture-ecology. The results showed that the net water demand of irrigation was $14.99 \times 10^8 \text{ m}^3$ in the Shiyang River Basin, whereas, the upper and lower water demand of ecological vegetation were 0.91×10^8 and $3.35 \times 10^8 \text{ m}^3$, respectively. The current balance between the supply and demand of water resources was attributed to the crowding out of ecological water and overexploiting groundwater. The water demand was also exceeded the water supply, in order to fully meet the minimum demand of for ecological water and groundwater. There was a water shortage of $1.44 \sim 2.63 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ in the Liuhe subsystem alone. Furthermore, the agricultural benefits, ecological water use, and groundwater balance were 137.53×10^8 Yuan, 0.60, and $0.59 \times 10^8 \text{ m}^3$, respectively, in the optimal allocation scheme. The agricultural benefits increased by 1.9% than before. The positive balance of groundwater was achieved in $0.59 \times 10^8 \text{ m}^3$. The agricultural and ecological water was accounted by for 90% and 10%, respectively, in the whole watershed, while that in canals and wells was 67% and 33%, respectively. The economic benefits of schemes S2 and S4 were reduced by 5.4%, compared with the optimal decision scheme (S0), while the groundwater balance of schemes S1 and S3 was reduced by 92.9% and 95.2%, respectively. Compared with the baseline, there was a 6% reduction in the water diversion from the middle reaches under diverse water and soil resource management, in order to guarantee a water inflow of $3.48 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ from Caiqi. In this case, the agricultural and ecological water consumptions of the Liuhe subsystem were 13.87×10^8 and $1.62 \times 10^8 \text{ m}^3$, respectively, while the groundwater was in a positive equilibrium of $0.70 \times 10^8 \text{ m}^3$. When the inflow in Caiqi was $3.48 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ in a normal year, the ecological water use and groundwater were achieved to balance 1.6% of the agricultural benefits in the middle reaches. The ecological water use and the balance of groundwater were elevated by 4.8% and 18.6%, respectively, compared with the baseline. There was a synergistic trade-off between groundwater balance and ecological water in agriculture. The water resources in arid areas can be managed to maintain an appropriate balance among water security, agricultural development, and ecological health. Failure to consider the mutual influence among different water users can result in the decision biases and suboptimal schemes. This finding can provide an effective way to analyze the complex relationship among water, agriculture, and ecology. A strong reference was also offered for water resource planning and management in arid basins.

Keywords: water resources; optimization; ecology; water-agriculture-ecology; coordinated development degree; coordinated regulation; water use ratio; Shiyang River Basin