

靳世鑫, 苏承国, 黄佳荣, 等. 响应生态-经济-社会需求的区域水土资源联合优化配置研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(1): 61-73. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.01.006

JIN Shixin, SU Chengguo, HUANG Jiarong, et al. Joint optimal allocation of regional water and land resources in response to ecological-economic-social demands [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(1): 61-73. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.01.006

响应生态-经济-社会需求的区域水土资源联合优化配置研究

靳世鑫^{1,2}, 苏承国^{1,2}, 黄佳荣^{1,2}, 王慧亮^{1,2}, 严登华³, 王占桥¹

(1. 郑州大学 水利与交通学院, 河南 郑州 450001; 2. 黄河实验室(郑州大学), 河南 郑州 450001; 3. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

摘要:【目的】水土资源联合优化配置是缓解水土资源时空分布格局与区域生态、社会、经济发展不匹配问题, 促进社会稳定和可持续发展的有效途径。【方法】基于二元水循环理论, 将土壤水和再生水纳入水资源供给侧考虑, 统筹考虑生态环境-经济社会系统中水-土-碳等各要素之间相互作用关系, 构建了响应生态-经济-社会需求的区域水土资源多目标优化配置框架, 提出耦合非线性多目标规划和逐次逼近法的双层嵌套算法以实现框架的迭代求解, 得到区域水土资源联合配置方案。【结果】洛阳市的水土资源联合优化配置结果表明, 各县区土地利用格局及水资源供给量实现了协同优化, 区域水资源总量增加了0.2923亿m³, 净碳排放量减少了0.3814%(折合90698t标准煤), GDP维持稳定, 各行政单元间供需水比值的差异程度达到最小。【结论】研究成果为提高区域水土资源综合利用效率, 保障区域生态-经济-社会可持续发展提供了有力的科学支撑。

关键词: 水土资源联合配置; 生态-经济-社会需求; 二元水循环; 相互作用关系; 双层嵌套算法; 影响因素; 水资源

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.01.006

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: TV213.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)01-0061-13



Joint optimal allocation of regional water and land resources in response to ecological-economic-social demands

JIN Shixin^{1,2}, SU Chengguo^{1,2}, HUANG Jiarong^{1,2}, WANG Huiliang^{1,2}, YAN Denghua³, WANG Zhanqiao¹

(1. School of Water Conservancy and Transportation, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, Henan, China; 2. Yellow River Laboratory (Zhengzhou University), Zhengzhou 450001, Henan, China; 3. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: [Objective] Joint optimal allocation of water and land resources is considered an effective approach to mitigating the

收稿日期: 2024-07-03; 修回日期: 2024-08-20; 录用日期: 2024-08-22; 网络出版日期: 2024-08-23

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52279028); 国家自然科学基金青年项目(52109038)

作者简介: 靳世鑫(2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事区域水土资源联合优化配置研究。E-mail: jsx200007@163.com

通信作者: 苏承国(1994—), 男, 副教授, 博士, 主要从事水库群优化调度、区域水土资源联合优化配置等方面研究。E-mail: suchguo@163.com

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

mismatch between the spatial and temporal distribution patterns of water and land resources and regional ecological, social, and economic development, thereby promoting social stability and sustainable development. [Methods] Based on the theory of dualistic water cycle, soil water and reclaimed water are incorporated into the supply side of water resources. The interaction between water-soil-carbon and other elements within the eco-environment-economic and social system are comprehensively considered. A multi-objective optimal allocation framework of regional water and land resources responding to eco-economic-social demands is constructed. The iterative solution of the framework is implemented by a double-layer nested algorithm coupling nonlinear multi-objective programming (NLMOP) and successive approximation (SA) method, leading to the determination of a joint allocation scheme for water and land resources. [Results] The result of the joint optimization allocation of water and land resources in Luoyang city demonstrate that the land use pattern and water resource supply of each county have been collaboratively optimized. The total amount of water resources in the region has increased by 29.23 million m^3 , net carbon emissions have decreased by 0.3814% (equivalent to 90,698 tons of standard coal), and GDP has remained stable. The difference in water supply and demand ratio among administrative units has been minimized. [Conclusion] The results provide strong scientific support for improving the comprehensive utilization efficiency of regional water and land resources and ensuring the sustainable development of regional eco-economy-society.

Keywords: joint allocation of water and land resources; eco-economic-social demands; dualistic water cycle; interactive relationship; two-layer nested algorithm; influencing factors; water resources

0 引言

水资源和土地资源在促进社会经济发展和保护生态环境方面发挥着独特的作用,已经成为一个国家重要的战略自然资源^[1-2]。随着高强度人类活动的影响,社会系统和地球系统交织的更加复杂密切,我国面临着巨大的水资源与土地资源管理挑战^[3-4],人类对水资源的需求与日俱增,人水争地、人地争水问题仍然突出^[5-6],如何实现水土资源协同发展,成为学术研究中的热点和难点^[7-8]。

目前传统的“以土定水”^[9-10]和“以水定土”^[11-12]的水资源优化配置被认为是解决区域水资源短缺等问题的有效途径,然而,这些方法均是水资源或者土地资源作为单一配置要素或者约束条件,未能充分考虑到水资源结构和空间布局会随着土地利用的变化而变化的问题,进而可能导致新的水土资源不匹配的现象。因此,统筹考虑系统中水资源和土地资源等各要素间的相互作用影响^[13],将水资源和土地资源的空间格局同时进行优化显得尤为重要。童芳等^[14]通过探讨水土资源与社会、经济、环境发展之间关系,对水土资源联合配置的递阶结构及求解思路进行讨论,并建立了区域水土资源联合优化配置系统的理论框架体系。目前,将水资源和土地资源同时作为配置要素的水土资源联合优化配置研究主要集中在农业和牧业领域,研究对象通常是以耕地为主的农业灌区^[15-18]、以草地为主的牧区^[19]或以流域/行政区^[19-21]为边界的某一土地利用类型,针对流域/区域所有土地利用类型进行优化配置的研究较少;从研究

模式来看,以上研究通常是在水土资源总量约束和过程约束条件下,以调整作物种植结构、不同用水来源或作物不同生育期水资源分配等形式进行配置,且多侧重于优化水资源量和土地面积,对于水土资源空间格局的变化以及二者之间的互馈关系的考虑较少。WANG等^[22]兼顾水量、水质、生态功能、水土资源匹配程度等多个目标,以流域为单元对水土资源利用格局进行了优化调整,但并未考虑水土资源动态互馈关系。卢娜等^[23]以二元水循环为基础,以GDP最大和生态绿当量最高为目标,提出了考虑水土互馈关系的区域水土资源联合优化配置模式,对区域水土资源协同优化进行初步探索,但该研究对水土资源优化配置的社会效益考虑不足,且仅考虑了二元水循环^[24]“产供用耗排”过程中的“产供用”三个阶段,并未考虑再生水利用的过程。

针对上述问题,本文构建了面向生态-经济-社会目标的区域水土资源联合优化配置框架,旨在提高区域水土资源综合利用效率,促进区域可持续发展。该框架将土壤水和再生水纳入水资源供给侧考虑,以进一步将二元水循环全过程纳入水土资源联合优化配置的研究中。此外,充分考虑了水土资源之间的相互作用关系,将水资源分配和土地资源的空间格局同时进行了优化配置。针对非线性多目标模型求解的巨大挑战,本文提出了耦合非线性多目标规划方法(nonlinear multi-objective programming, NLMOP)和逐次逼近法(successive approximation, SA)的双层嵌套算法来实现模型的迭代优化求解。最后,将该框架应用于河南省洛阳市的水土资源联合配置,以期为地区

源管理部门提供更合理的决策支持, 实现区域可持续发展的目标。

1 区域水土资源优化配置框架

近年来, 关于水土资源优化配置的研究逐渐转向了多目标配置^[25-30], 以更好地实现水土资源优化配置的综合效益。本研究以“自然-社会”二元水循环理论为基础^[24], 综合考虑生态-经济-社会系统中水-土-碳等各要素之间相互作用关系, 建立了区域水土资源多目标联合优化配置框架。响应生态-经济-社会需求的区域水土资源联合优化配置框架如图 1 所示。

水资源模拟模块以 SWAT 模型作为载体, 加载由土地资源模块输出的土地利用格局信息来模拟水循环过程, 并模拟产生新的产水量(包含地表水、地下水及土壤水), 为水土资源联合配置模块提供供水水量信息。土地模拟模块以 FLUS 模型^[31]为载体, 以元胞自动机(CA)为原理, 将由水土资源联合配置模块优化得到的各土地利用面积信息转化为产水模块可识别的土地利用格局信息之后, 将模拟出的土地利用新格局传输给水资源模块使用。本研究在团队已有工作的基础上, 着重对水土资源联合配置模块进行了改进。该模块以区域水土资源开发、碳排放等强约束, 以及政策引导下的生态-经济-社会多目标需求作为

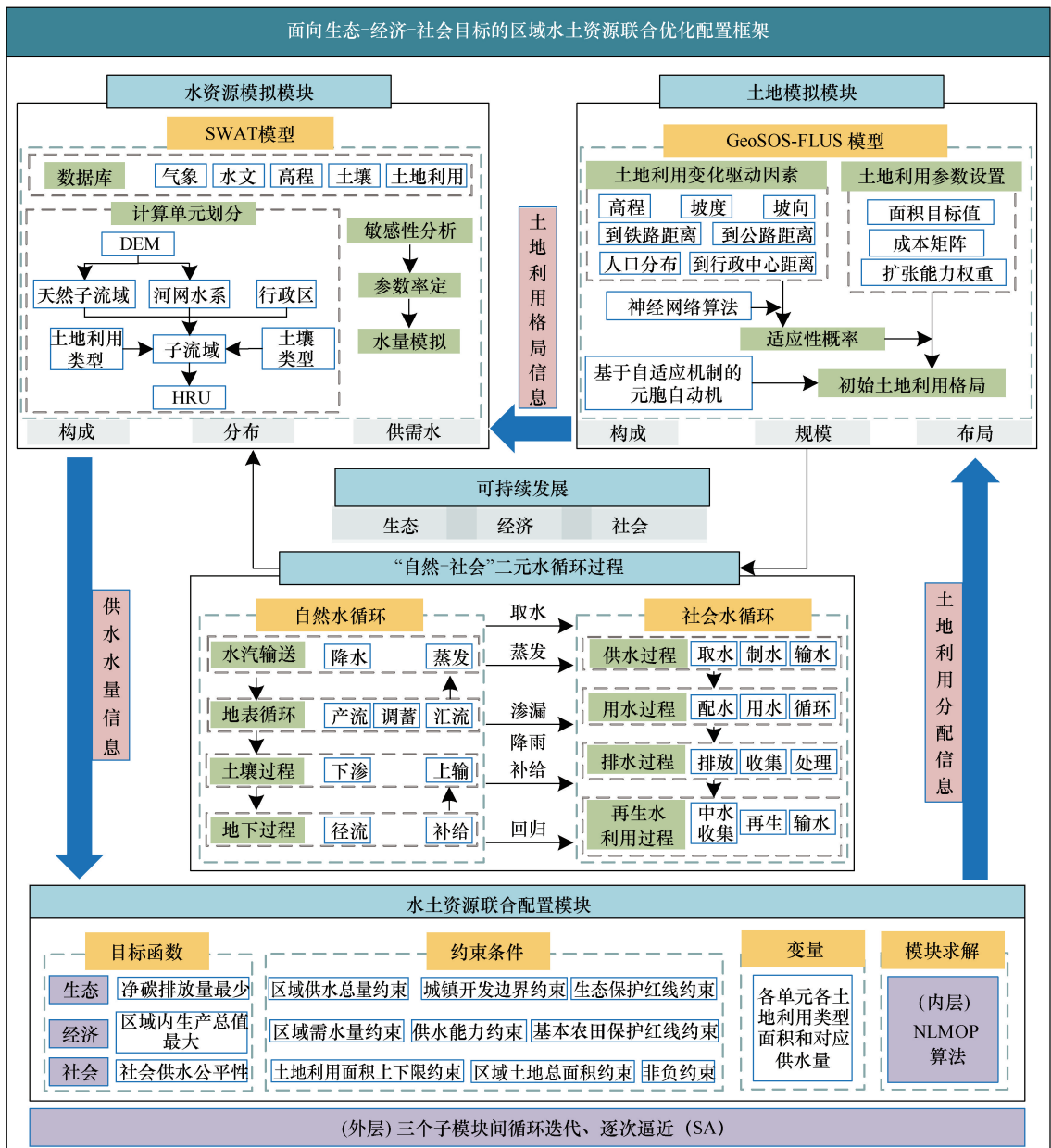


图 1 响应生态-经济-社会需求的区域水土资源联合优化配置框架

Fig. 1 Framework of joint optimal allocation of regional land and water resources in response to ecological economic-social demands

输入条件, 同时将土壤水和再生水纳入水资源供给侧考虑, 通过 NLMOP 算法对水土资源联合配置模块求解, 得出优化后各土地利用类型的面积, 之后将优化结果传递给土地模拟模块, 三个子模块间循环迭代, 逐次逼近(SA), 能够灵活体现政策目标调控对各用水部门用地需求的调节与分配关系以及水土资源的动态互馈过程。该模块具体内容如下。

1.1 目标函数

1.1.1 生态效益

以净碳排放量(Net carbon emissions, NCE)最少作为生态效益衡量指标。公式如下

$$f_1 = \min C = \min \left(\sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K \delta_m \times x_{k,m} \right) \quad (1)$$

式中, C 为研究区净碳排放量总和 [$t(C)$]; M 为土地利用类型总数; K 为计算单元总数; m 为土地利用类型编号, 按照国家标准《土地利用现状分类》, 将研究区土地利用类型重分类为 7 类, 分别为 1 耕地、2 林地、3 草地、4 湿地、5 水体、6 建设用地和 7 未利用土地; δ_k 为土地利用类型 m 的碳排放系数 [$t(C) \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$], 正值为碳排放, 负值为碳吸收; $x_{k,m}$ 为研究区行政单元 k 中土地利用类型 m 的面积 (km^2)。

1.1.2 经济效益

以区域内生产总值(GDP)最大作为经济效益衡量指标。公式如下

$$f_2 = \max \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K a_{k,m} x_{k,m} \beta_{k,m} \quad (2)$$

式中, $a_{k,m}$ 为土地利用类型 m 单位面积经济效益系数 (万元/ km^2); $\beta_{k,m}$ 为行政单元 k 用地类型 m 的经济效益折算系数, 由该行政单元该土地利用类型对应的供需水比值决定, 当供水量 \geq 需水量 $\beta_{k,m} = 1$, 否则 $\beta_{k,m} = \text{供水量} / \text{需水量}$ 。

1.1.3 社会效益

以各行政单元供水量与需水量比值的差异程度最小为目标, 即供水公平性(water supply equity, WSE)作为社会效益衡量指标。差异程度越小, 供水公平性越优, 配置公平性越优。公式如下

$$f_3 = \min \sqrt{\frac{1}{K-1} \times \sum_{k=1}^K (h_k - \bar{h}_k)^2} \quad (3)$$

$$h_k = y_{k,m} / \sum_{m=1}^M b_{k,m} \times x_{k,m} \quad (4)$$

式中, h_k 为行政单元 k 供水量与需水量的比值; \bar{h}_k 为各行政单元的供需水比值的均值; $y_{k,m}$ 为行政单元 k 用地类型 m 的供水量 ($万 m^3 \cdot a^{-1}$); $b_{k,m}$ 为子区域 k

用地类型 m 单位面积用水量 ($万 m^3 \cdot a^{-1}$)。

1.2 约束条件

本研究同时考虑了政府规划要求及水土资源等资源性约束。

1.2.1 供水能力约束

各行政单元不同土地利用类型的供水量之和, 不能超过该行政单元的总供水量。

$$\sum_{m=1}^M y_{k,m} \leq S_k \quad (5)$$

式中, $y_{k,m}$ 为行政单元 k 用地类型 m 的供水量 ($万 m^3 \cdot a^{-1}$); S_k 为行政单元 k 的总供水量 ($万 m^3 \cdot a^{-1}$)。

1.2.2 供水总量约束

行政单元的总供水量由各种水源工程供水量、可利用土壤水和再生水组成。

$$S_{sup k} = S_{pro k} + S_{reu k} + S_{soi k} \quad (6)$$

$$S_{reu k} = SR_{dom k} \times \alpha_{dom} + SR_{ind k} \times \alpha_{ind} \quad (7)$$

$$SR_{dom k} = SU_{dom k} \times (1 - \tau_{dom}) \quad (8)$$

$$SR_{ind k} = SU_{ind k} \times (1 - \tau_{ind}) \quad (9)$$

式中, $S_{pro k}$ 为行政单元 k 中供水工程的可供水量 (不包含再生水量) ($万 m^3 \cdot a^{-1}$); $S_{reu k}$ 为行政单元 k 可利用的再生水量, 由建设用地生活污水回用和工业污水回用组成 ($万 m^3 \cdot a^{-1}$); $SR_{dom k}$ 和 $SR_{ind k}$ 分别为行政单元 k 的生活、工业排水量 ($万 m^3 \cdot a^{-1}$); α_{dom} 为生活污水处理率; α_{ind} 为工业废水处理率; $SU_{dom k}$ 为行政单元 k 的城镇生活用水量 ($万 m^3 \cdot a^{-1}$); $SU_{ind k}$ 为行政单元 k 的工业用水量 ($万 m^3 \cdot a^{-1}$); τ_{dom} 和 τ_{ind} 分别为城镇生活耗水率和工业耗水率, 可由当地行政部门给出的年度《水资源公报》得知; $S_{soi k}$ 为行政单元 k 的可利用的土壤水水量 ($万 m^3 \cdot a^{-1}$), 由水资源模块加载 SWAT 模型进行水量模拟得到。

1.2.3 需水约束

各行政单元各土地利用类型的供水量应在其需水的上下限之间, 其需水下限根据不同土地利用类型的最低供水保证率确定。

$$W_{\min k,m} \leq y_{k,m} \leq W_{\max k,m} \quad (10)$$

式中, $W_{\min k,m}$ 、 $W_{\max k,m}$ 分别表示行政单元 k 土地利用类型 m 的需水下限与需水上限 ($万 m^3 \cdot a^{-1}$)。

1.2.4 区域土地总面积约束

研究区各行政单元不同用地类型面积之和等于土地总面积。

$$\sum_{m=1}^M x_{k,m} = T \quad (11)$$

式中, T 为行政单元 k 各用地类型总面积 (km^2)。

1.2.5 各土地利用类型面积约束

为满足国土空间规划要求, 考虑永久基本农田保护红线、生态保护红线、城镇开发边界等约束。

$$T_{\min m} \leq \sum_{k=1}^K x_{k, m} \leq T_{\max m} \quad (12)$$

式中, $T_{\max m}$, $T_{\min m}$ 分别为各土地利用类型面积上下限 (km^2)。

1.2.6 变量非负约束

行政单元 k 中土地利用类型 m 的土地利用面积和对应的供水量均为正值。

$$x_{k, m} \geq 0, y_{k, m} \geq 0 \quad (13)$$

2 求解方法

针对包含多决策变量、多目标函数、多模块耦合的水土资源联合优化配置框架, 本研究提出了耦合 NLMOP 和 SA 的双层嵌套算法对其进行求解。

内层通过调用 GUROBI 求解器内置的 NLMOP 算法求解水土资源联合配置模型。GUROBI 求解器是全球综合能力较强的数学规划求解器, 无论从求解速度还是准确性考虑, GUROBI 求解器较其他数学规划求解器均较优。其原理是通过分级的方法对目标函数进行优先级划分, 并按照优先级递减的顺序对目标函数进行优化, 在每次优化过程中, 寻找到当前目标的最佳方案, 但只能从那些不会降低高优先级目标的解决方案中找到最佳解决方案, 进而确定各土地利用类型的面积与水量分配。

外层采用 SA 实现三个模块间的动态互馈及逐次迭代的过程, 当模型模拟水量 $|S_{a+1} - S_a| \leq \lambda$ 且各目标函数趋于稳定不再劣化时, 停止迭代。其中, S_{a+1} 为第 $a+1$ 次迭代模拟水量; S_a 为第 a 次迭代模拟水量; λ 为停止水量迭代模拟的阈值, 本研究取 $1/1\ 000$ 初始水量。

模型求解流程如图 2 所示。

3 实例分析

3.1 研究区概况及数据

本研究以洛阳市为研究区域, 以 2020 年为基准年展开研究。洛阳市位于黄河中游南岸, 面积 $15\ 229\ \text{km}^2$, 地理坐标为东经 $111^\circ 08' - 112^\circ 59'$, 北纬 $33^\circ 39' - 35^\circ 35'$ (见图 3)。洛阳市现辖 1 市 8 县 6 区, 是河南省副中心城市, 与三门峡、南阳、平顶山及郑州市相邻, 社会经济较为发达; 多年平均水资源量为 $28.17\ \text{亿}\ \text{m}^3$, 洛阳市境内水系分布于黄河、淮河和长江三大流域的黄河干流、伊洛河、沙颍河、

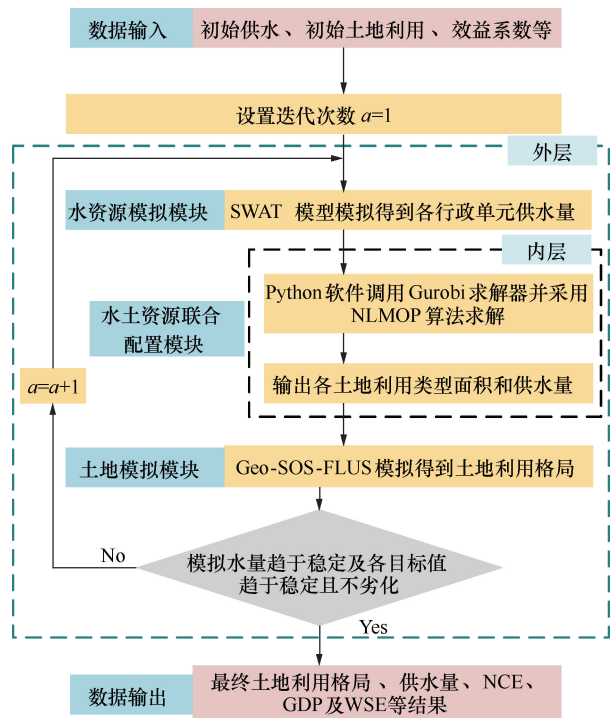


图 2 模型求解流程

Fig. 2 Flowchart of model solving

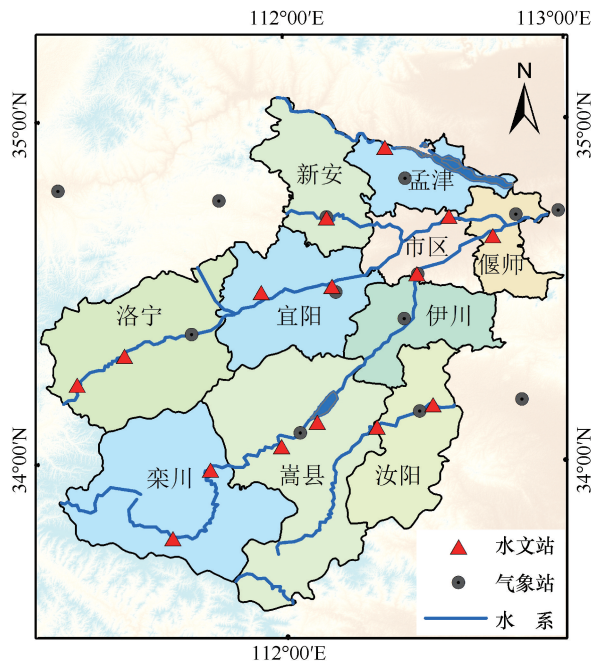


图 3 研究区地理位置

Fig. 3 Geographical location map of the study area

丹江和唐白河 5 个河系。全市有 5 座大型水库和 12 座中型水库; 洛阳市近几年发展迅速, 2020 年全市地区生产总值突破 5 100 亿元, 达到 5 128.4 亿元, 同比增长 1.8%。其中, 第一产业 254.1 亿元, 第二产业 2 312.2 亿元, 第三产业 2 562.1 亿元; 农林牧

渔业总产值 486.2 亿元; 全年工业增加值 1 854.6 亿元。年末常住人口 705.9 万人, 比上年末增加 13.68 万人, 城镇化率为 64.98%。2020 年农田有效灌溉面积 244.95 万亩, 同比增长 5.52%。需水需求日益显著, 各县域间供需水差异较大, 水土资源不匹配问题逐渐突出。

3.2 数据说明及计算

3.2.1 计算单元

由于洛阳市部分行政区面积过小, 为了方便计算及统计, 根据地理区位划分, 本研究将洛龙区、涧西区、西工区、老城区、瀍河区 5 个区合并为市区, 将吉利区合并入孟津县, 将洛阳市分为 10 个计算单元。

3.2.2 主要参数和目标函数

所需数据包括 2020 年洛阳市经济数据、碳排放数据、各县区行政单元需水及用水数据、土地利用类型数据、空间规划数据等, 具体数据来源如表 1 所列。

根据以上数据对模型所需参数进行计算。

(1) 经济效益系数。查阅整理《洛阳市统计年鉴 2020》中经济数据, 将经济效益数据分类展布到各土地利用类型, 可得洛阳市 2020 年各土地利用类型经济效益系数, 如表 2 所列。

(2) 碳排放系数。耕地的碳排放系数参考 CAI 等^[32]、何勇^[33] 研究得到; 林地、草地的碳排放系数参考方精云等^[34] 研究得到; 湿地、水体、未利用土地的碳排放系数依据赖力等^[35]、段晓男等^[36] 研究得到; 建设用地碳排放主要是由生活生产中能源燃料消耗产生, 包含石油、天然气和煤炭等, 其碳排放系数则采用间接估算法, 估算公式如下

$$\delta_7 = C_{con, sta} / \sum_{k=1}^K x_{sta k, 7} \quad (14)$$

$$C_{con, sta} = \sum_{k=1}^K GDP_{sta k, 7} \times E_{sta k, 7} \times \theta \quad (15)$$

式中, $C_{con, sta}$ 为洛阳市 2020 年建设用地产生的碳排放

总量, 即建设用地各种能源消耗产生的碳排放量 $[t(C)]$; $x_{sta k, 7}$ 为优化前建设用地的总面积 (km^2) ; $GDP_{sta k, 7}$ 为洛阳市 2020 年县区 k 建设用地产生的 GDP(万元); $E_{sta k, 7}$ 为单位 GDP 能耗, t 标准煤/万元, 根据《洛阳市统计年鉴 2020》能耗公报, 将各能源消耗转化为标准煤消耗量, 并结合当地建设用地产生的 GDP 可得; θ 为标准煤的碳排放系数。

洛阳市 2020 年各土地利用类型碳排放系数如表 2 所列。

(3) 各县区各土地利用类型需水系数。查阅相关文献, 根据洛阳市历年《水资源公报》中各县区用水量统计及河南省地方标准《农业与农村生活用水定额》等, 确定耕地单位面积需水量为 $b_{k,1} = 1.513 \text{ 万 m}^3 \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 林地单位面积需水量为 $b_{k,2} = 1.351 \text{ 万 m}^3 \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 草地单位面积需水量为 $b_{k,3} = 1.351 \text{ 万 m}^3 \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 湿地、水域和未利用土地暂不做考虑; 建设用地单位面积需水量因各县区发展水平和城镇化进度不同, 导致生产生活需水量差异较大, 因此本研究对各县建设用地单位面积用水量分别计算确定, 结果如表 3 所列。

(4) 再生水系数。我国高度重视水体污染治理, 并取得了显著成效^[37]。查阅洛阳市《水资源公报 2020》、统计年鉴及河南省人民政府网站提供的公告等资料可知, 洛阳市工业耗水率为 32%, 生活耗水率为 53%, 工业废水处理率 62%, 城镇生活污水处理率为 99.3%。考虑到洛阳市发展现状, 农村对生活污水处理暂未达到规模化污水回用, 因此, 生活污水回用仅考虑城镇生活污水作为再生水来源。将 2020 年洛阳市工业用水量、生活用水量等数据折算可得, 建设用地的单位面积再生水系数为 $0.58 \text{ 万 m}^3 \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

(5) 目标函数优先级划分。目标函数优先级为: 生态效益>经济效益>社会效益。黄河流域生态保护和高质量发展是一项重要的国家战略, 洛阳市作为

表 1 数据来源
Table 1 Data sources

数据类型	数据来源	
经济数据、碳排放数据	2020 年洛阳市统计年鉴	洛阳市人民政府网站
空间规划数据	洛阳市土地利用总体规划(2006—2020 年)	
需水及供水数据	2020 年洛阳市水资源公报、农业与农村生活用水定额(DB/T 958—2020)	
数字高程模型(DEM)	地理数据空间云	
土地利用类型数据	全球 30 m 精细地表覆盖数据(GlobeLand30m)	
土壤类型和土壤属性	国家青藏高原科学数据中心	
气象数据	中国气象数据共享服务网	
月均流量	黄河流域水文年鉴(2001—2020 年)	

表2 2020年洛阳市各土地利用类型系数

Table 2 Coefficient table of each land use type in Luoyang

City in 2020

土地利用类型	经济效益系数 /万元· km ⁻² ·a ⁻¹	碳排放系数 /t(C)· km ⁻² ·a ⁻¹	需水系数 /万m ³ · km ⁻² ·a ⁻¹
耕地 δ ₁	567.239	49.700	1.513
林地 δ ₂	17.454	-58.100	1.351
草地 δ ₃	0.000	-2.100	1.351
湿地 δ ₄	0.000	-2.530	0.000
水域 δ ₅	223.971	-2.530	0.000
建设用地 δ ₆	42 488.116	13 239.400	见表3
未利用土地 δ ₇	0.000	-0.500	0.000

黄河流域重要节点城市,因此本研究选择将生态效益置于首位;经济效益作为城市发展的重要考量指标,将其置于第二优先级;社会效益以供水公平性作为考量指标,将其置于第三优先级。

3.2.3 水资源模拟模块

水资源模拟模块所需的数据包括洛阳市内及邻近气象站点逐日降水、风速、气温、相对湿度及太阳辐射等气象数据,洛阳市下辖的白马寺站、龙门镇站等水文站点的逐月经流量数据,洛阳市行政区划图、数字高程数据、洛阳市土壤类型分布数据及土地利用数据等。

加载上述数据,构建 SWAT 模型,将洛阳市共划分为 33 个子流域,262 个计算单元。经过径流参数率定,各水文站模拟评价指标 $R^2 > 0.63$, $NSE > 0.58$,证明各测站径流模拟值与实测值拟合较好,满足精度要求。2020 洛阳市水资源总量模拟值为 21.30 亿 m³,与水资源公报给出的实际值 20.39 亿 m³ 误差仅为 4.46%,对应土壤水总量模拟值为 12.24 亿 m³。

3.2.4 土地模拟模块

加载洛阳市优化前的土地利用格局进行土地利用类型适应性分析,得到洛阳市各土地利用类型的适应性概率,如图 4 所示。

将各土地利用类型初始面积值以及经水土资源联合配置模块逐次迭代得到的面积值转化为初始像元个数和未来像元个数(一个像元为 30 m×30 m),并将其输入 FLUS 模型,得到未来土地利用面积变化后的土地利用格局。

4 结果与讨论

洛阳市水土资源联合优化配置结果最终在迭代 5 次之后趋于稳定,水资源模拟模块中水资源总量和土壤水的水量迭代过程如图 5 所示,土地利用类型面积变化过程如图 6 所示,各效益具体优化迭代过程如图 7 所示。

由图 5 可以看出,5 次迭代模拟过程中,水资源总量和土壤水量先升高再降低,之后趋于平稳;水资源量在逐次迭代过程中发生变化正是在水土资源互馈过程中,土地利用格局发生改变,即下垫面条件发生改变,进而导致了水资源量动态变化。水资源总量由 21.300 亿 m³ 升高到 21.814 亿 m³ 后,又降低到 21.587 亿~21.669 亿 m³;可利用土壤水和再生水是区域可供水量中不可或缺的一部分。可利用土壤水的多少,直接影响着除土壤水外,需要额外供给用水户水量的多少,在满足耕地、林地、草地等需水需求中扮演着极为重要的角色,在迭代过程中,可利用土壤水量由 12.245 亿 m³ 升高到 12.526 亿 m³ 后,又降低到 12.433 亿~12.471 亿 m³;再生水作为一种量级很少的供水来源,往往会被决策者忽略,不被纳入水源供给侧进行考虑,本研究依据洛阳市再生水回用现状,将再生水纳入配置,再生水由现状 0.474 亿 m³ 升高到 0.704 亿 m³ 后,又降低到 0.699 亿~0.699 亿 m³,再生水的比例也由初始时的 2.2% 提升至 3.2% 以上。本研究将可利用土壤水和再生水纳入水土资源优化配置过程中,可以有效避免水资源的重复供应,更加合理高效地对水资源进行分配。

洛阳市 6 种土地利用类型面积变化过程如图 6 所示。可以看出,耕地面积在迭代过程中先减少后增加,之后趋于稳定;林地、湿地、水体、建设用地面积均为先增加后降低,之后趋于稳定;草地面积在经过优化后,面积减少。

由图 7 可知生态效益 f_1 在经过两次优化迭代后,由现状值 1 593.223 万 t(C) 降低到 1 586.850 ~ 1 587.647 万 t(C),降低了 0.35%~0.40%,优化效果显著。经济效益 f_2 在优化过程中基本维持稳定,且因在模型中设置了强约束条件,经济效益没有出现下降趋势,较现状值 5 095.085 亿元增加了 0%~

表3 2020年洛阳市各计算单元建设用地单位面积用水量

Table 3 Water consumption per unit area of construction land for each calculating unit in Luoyang City in 2020

计算单元	市 区	孟津县	新安县	栾川县	嵩 县	汝阳县	宜阳县	洛宁县	伊川县	偃师市
单位面积用水量/万 m ³ ·km ⁻² ·a ⁻¹	8.966	5.808	9.224	9.301	5.357	5.336	4.064	3.943	5.292	5.402

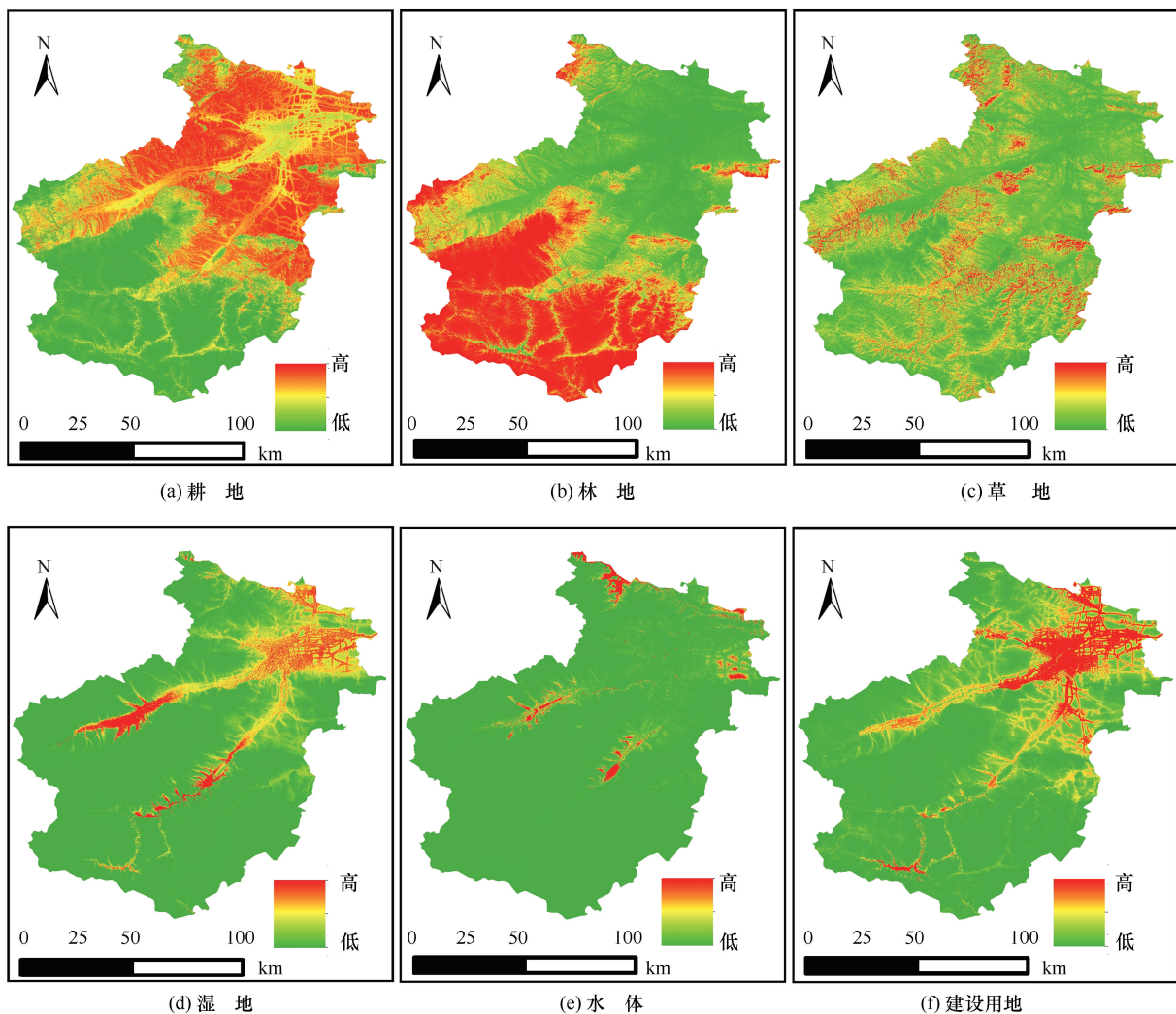


图4 各土地利用类型适应性概率

Fig. 4 Adaptability probability of each land use type

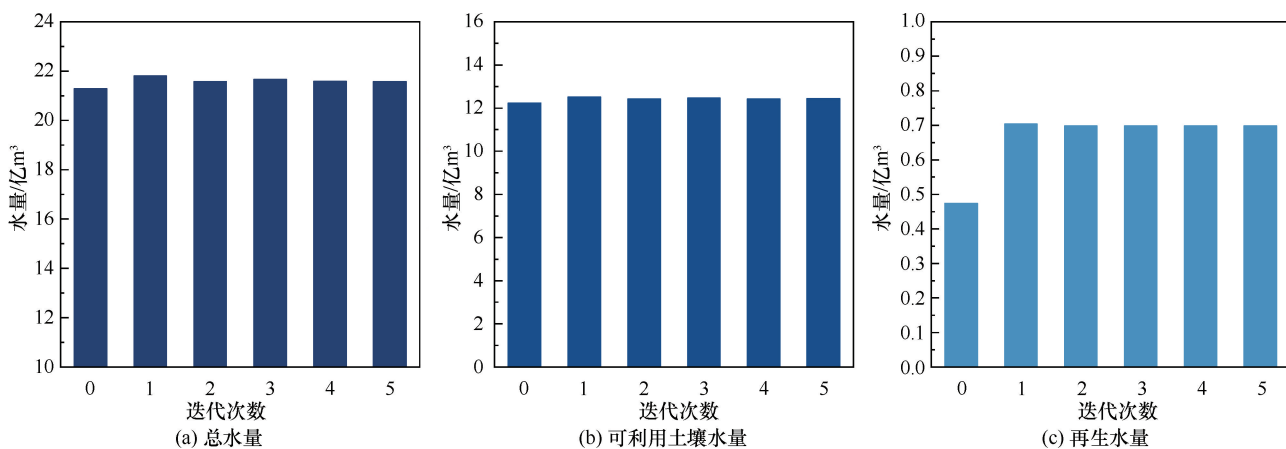


图5 水量迭代过程

Fig. 5 Water iteration process

0.01%。其增长幅度较小是因为经济效益和生态效益是相互博弈的两个目标函数，建设用地的碳排放系数及单位面积 GDP 系数均比其他几种土地利用类型要

大 2~5 个量级，是决定生态效益和经济效益的主要因素，建设用地的增加会使经济效益增加，也势必会导致碳排放量的增加。生态效益作为优先保证的第一

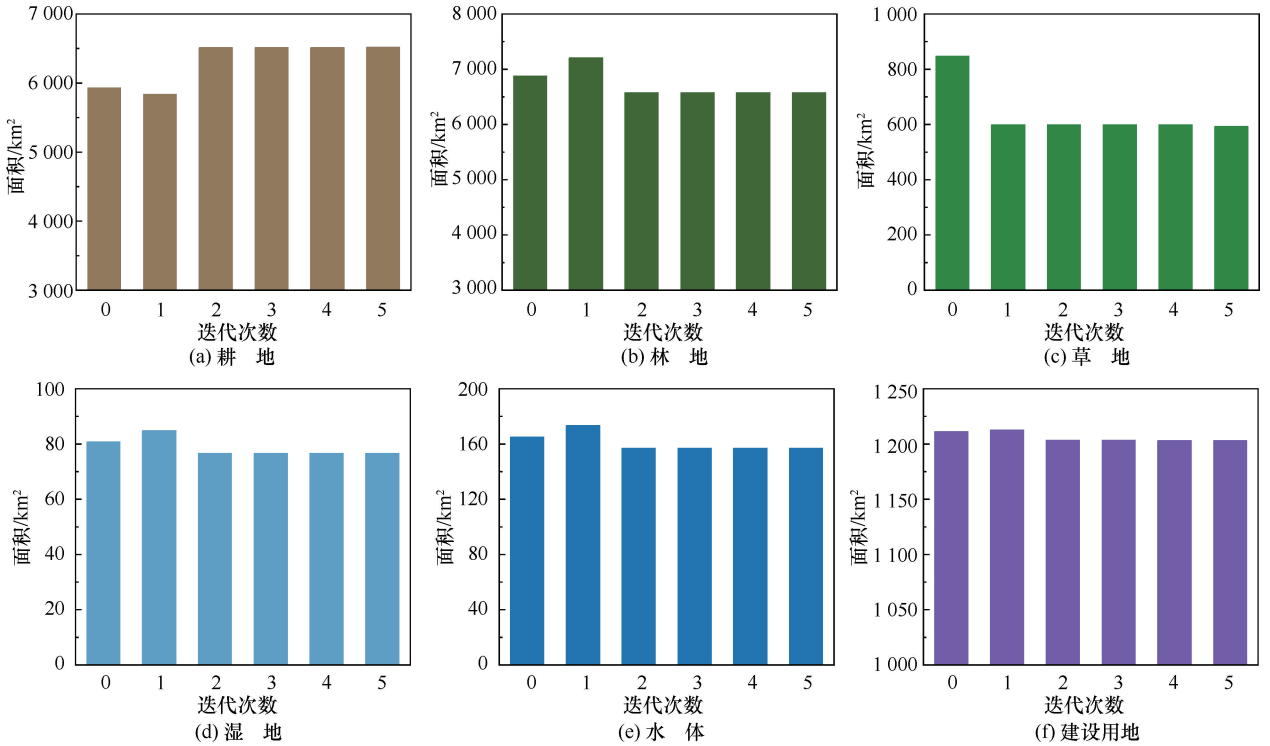


图6 洛阳市土地利用面积迭代过程

Fig. 6 The iterative process of land use area in Luoyang

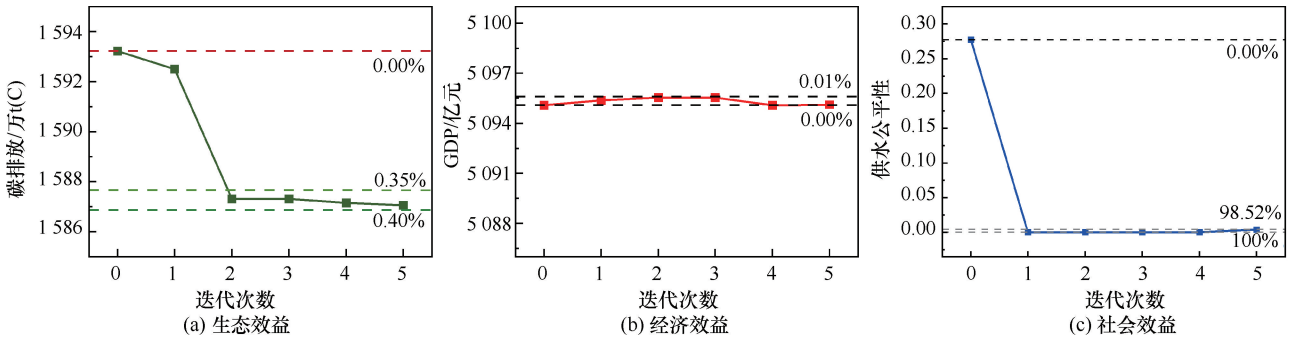


图7 各效益迭代过程

Fig. 7 Iterative process of each benefit

目标, 所以经济效益增长幅度较小。社会效益 f_3 在经过1次优化迭代后, 由现状值0.277降低为0, 并维持稳定, 此时相对供水公平性达到了最优(值越趋近于0, 供水公平性越优); 图7(c)第5次迭代结果显示, 社会效益较上一轮数值增大, 存在了用水户供水不足的情况。

与现有研究相比, 本研究构建了面向生态、经济、社会目标的多目标优化模型, 并耦合了水资源量和土地利用格局的动态互馈过程。其中, 首次迭代结果未经土地模拟模块的循环迭代, 由水土资源联合配置模块直接生成, 其未考虑水土互馈关系, 可视为传统的优化模式。结果对比(见图7)表明, 本框架所获

得的考虑了水土互馈关系的优化结果在生态效益、经济效益和社会效益方面均优于传统的优化结果(即首次迭代结果)。这凸显了在实现水土资源优化配置过程中考虑水土资源动态互馈的重要性。

同时考虑三个目标函数, 对5次迭代结果进行分析。第1轮迭代结果中, 生态效益、经济效益、社会效益均比现状有了改善, 但生态效益较之后几次迭代的结果较差; 在第2—4轮迭代结果中, 经济效益基本维持稳定, 社会效益均为0, 相对供水公平性达到了最优, 其中在第2轮迭代结果中的生态效益提升的最为显著, 提升了0.381%; 在第5轮迭代结果中, 生态效益比前4轮迭代结果都好, 提升了0.387%,

经济效益维持现状保持不变, 社会效益较现状有了改善, 由 0.277 降低到 0.004, 但不如第 2—4 轮结果好。

因此经综合考虑, 本研究选用第 4 次迭代结果作为最终的水土资源优化配置方案。由图 5 可知, 将再生水和土壤水纳入考虑后, 水资源总量较优化前增加了 0.292 亿 m^3 ; 同时水资源利用效率得到了提高, 各县区的供需水比值等于 1, 需水需求得到满足, 各县区供需水比值优化前后对比如图 8 所示。

对应的土地利用变化如图 9 所示。其中, 耕地面

积增加了 577.95 km^2 , 林地面积减少了 306.97 km^2 , 草地面积减少了 246.99 km^2 , 建设用地的面积减少了 8.15 km^2 ; 建设用地的减少可以使得碳排放量迅速减少, 但同时会导致经济效益的降低, 其经济效益的损失则由单位面积经济效益较高的耕地来填补。对比优化前后的土地利用格局可以直观地看出, 由于洛阳市中西部及中东部区域耕地的适应性概率较强, 而其他用地类型的适应性概率较弱, 所以优化后的耕地面积的增加多集中于此; 同理, 建设用地面积的减少则多集中于中东部区域。

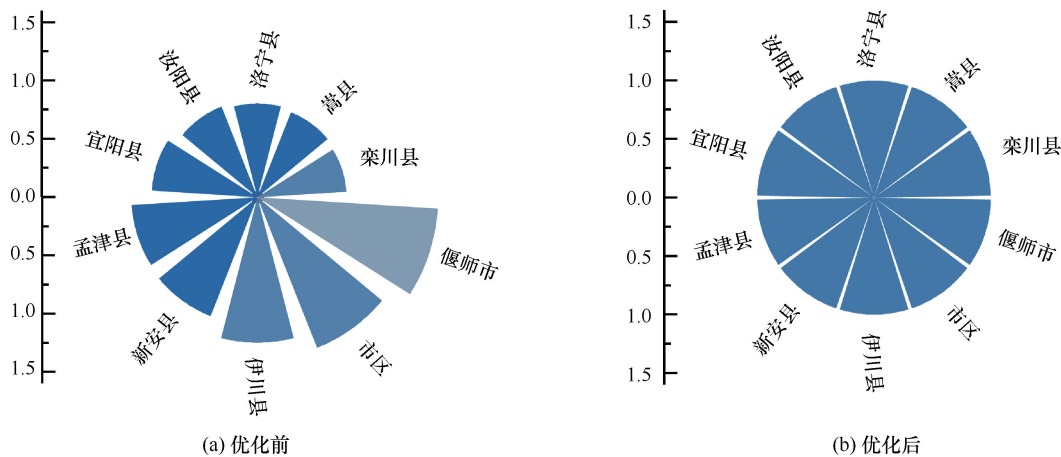


图 8 供需水比值对比

Fig. 8 Comparison of water supply and demand ratio

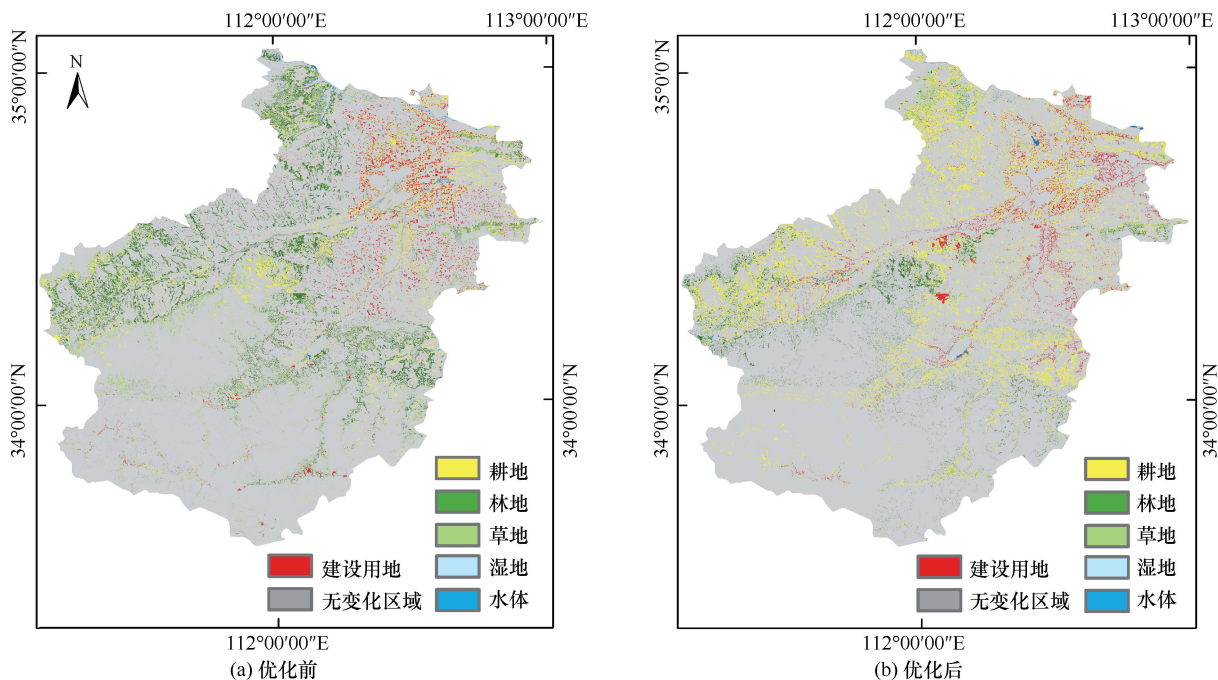


图 9 土地利用变化

Fig. 9 The map of land use change

5 结论

本研究基于“自然-社会”二元水循环理论,综合考虑了水土资源与生态-经济-社会需求之间动态互馈关系,构建了面向生态-经济-社会目标的区域水土资源联合优化配置框架,并将可利用土壤水及再生水纳入水资源供给侧进行考虑。同时,为了解决框架中多目标、多变量、多模块耦合的难题,研究提出了耦合 NLMOP 和 SA 的双层嵌套算法,实现了模型迭代优化求解。以洛阳市为例进行研究,得出以下结论。

(1)在洛阳市水土资源动态互馈的过程中,洛阳市各县区土地利用类型发生变化,水资源量模拟值也随着土地利用格局的改变处于动态变化;在最终优化配置方案中,其水资源总量较现状增加了 0.292 亿 m^3 ,耕地总面积增长了 9.7%,有效保障了粮食安全。

(2)在洛阳市 GDP 得到有效保障的前提下,生态效益指标得到了优化,碳排放量减少了 60 767 t(C)(折合 90 698 t 标准煤),社会效益指标达到了最优值 0。表明合理调整洛阳市水资源分配和土地利用格局,可以减少洛阳市的碳排放量,同时有效保障了各县区间的供水公平性,供水量分配不公的问题得到了有效缓解,所有用水户的需水需求得到了保障。

研究成果能够为提高区域水土资源综合利用效率,促进区域水土资源协同开发利用,保障区域生态-经济-社会可持续发展提供科学支撑。

参考文献(References):

- [1] COSGROVE W J, LOUCKS D P. Water management: Current and future challenges and research directions [J]. *Water Resources Research*, 2015(51): 4823-4839.
- [2] VÖRÖSMARTY C J, MCINTYRE P B, GESSNER M O, et al. Global threats to human water security and river biodiversity [J]. *Nature*, 2010(468): 334-334.
- [3] 李国英. 深入贯彻落实党的二十大精神 扎实推动新阶段水利高质量发展: 在 2023 年全国水利工作会议上的讲话 [J]. *水利发展研究*, 2023, 23(1): 1-11.
- LI G Y. Thoroughly implement the spirit of the 20th National Congress of the Communist Party of China and solidly promote the high-quality development of water conservancy in the new stage: Speech at the National Water Conservancy Work Conference in 2023 [J]. *Water Resources Development Research*, 2023, 23(1): 1-11.
- [4] 李国英. 为以中国式现代化全面推进强国建设、民族复兴伟业提供有力的水安全保障: 在 2024 年全国水利工作会议上的讲话

[J]. *水利发展研究*, 2024, 24(1): 1-10.

- LI G Y. Improved water security for China's efforts to build itself into a stronger country and rejuvenate the Chinese nation on all fronts by pursuing Chinese modernization: Speech at the 2024 National Water Conservancy Work Conference [J]. *Water Resources Development Research*, 2024, 24(1): 1-10.
- [5] DENG X Z, ZHANG F, WANG Z, et al. An extended input output table compiled for analyzing water demand and consumption at county level in China [J]. *Sustainability*, 2014(6): 3301-3320.
- [6] 秦天玲, 吕锡芝, 刘姗姗, 等. 黄河流域水土资源联合配置技术框架 [J]. *水利水运工程学报*, 2022 (1): 28-36.
- QIN T L, LYU X Z, LIU S S, et al. Technical framework for joint allocation of water and soil resources in the Yellow River Basin [J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2022(1): 28-36.
- [7] 严登华, 卢亚静, 秦天玲, 等. 高寒区水土资源联合调配的若干关键问题 [J]. *中国水利*, 2017 (17): 27-30.
- YAN D H, LU Y J, QIN T L, et al. Several key issues for the united allocation of water and soil resources in alpine region [J]. *China Water Resources*, 2017(17): 27-30.
- [8] 严登华, 王浩, 周梦, 等. 全球治水模式思辨与发展展望 [J]. *水资源保护*, 2020, 36(3): 1-7.
- YAN D H, WANG H, ZHOU M, et al. Scientific ideas and development prospects of global water management modes [J]. *Water Resources Protection*, 2020, 36(3): 1-7.
- [9] 夏军, 朱一中. 水资源安全的度量: 水资源承载力的研究与挑战 [J]. *自然资源学报*, 2002, 17(3): 262-269.
- XIA J, ZHU Y Z. The measurement of water resources security: A study and challenge on water resources carrying capacity [J]. *Journal of Natural Resources*, 2002, 17(3): 262-269.
- [10] 付银环, 李新旺, 徐宝同, 等. 不确定性多目标模糊规划在水资源优化配置中的应用 [J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2023, 21(3): 470-479.
- FU Y H, LI X W, XU B T, et al. Application of interval multi-objective fuzzy programming based on uncertainty in optimal allocation of water resources [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2023, 21(3): 470-479.
- [11] 李莱. 基于不确定性分析的农业水土资源多尺度优化配置方法与模型研究 [D]. 北京: 中国农业大学, 2017.
- LI M. Methods and models for agricultural water-land resources multi-scale optimal allocation based on uncertainty analysis [D]. Beijing: China Agricultural University, 2017.
- [12] 黄苏宁, 黄显峰, 方国华, 等. 基于多目标遗传算法的水土资源优化配置研究 [J]. *中国农村水利水电*, 2013(5): 33-36.
- HUANG S N, HUANG X F, FANG G H, et al. Research on water and soil resources optimal allocation based on multi-objective genetic algorithm [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2013 (5):

33-36.

- [13] 卢亚静. 高寒地区水土资源相互作用机制与联合调控: 以青藏高原那曲流域为例[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2017.
- LU Y J. Interaction and joint regulation between water and soil resources in the alpine region: A case study in the Naqu River basin of the tibetan plateau [D]. Beijing: China Institute of Water Resources & Hydropower Research, 2017.
- [14] 童芳, 赵静, 金菊良, 等. 区域水土资源联合优化配置理论框架体系探讨[J]. 人民黄河, 2017, 39(7): 92-95.
- TONG F, ZHAO J, JIN J L, et al. Study on framework of regional integrated water and land resources optimal allocation [J]. Yellow River, 2017, 39(7): 92-95.
- [15] 张展羽, 司涵, 冯宝平, 等. 缺水灌区农业水土资源优化配置模型[J]. 水利学报, 2014, 45(4): 403-409.
- ZHANG Z Y, SI H, FENG B P, et al. An optimal model for agriculture water and soil resources configuration in water shortage irrigation area [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(4): 403-409.
- [16] CHENG H M, JIANG X C, WANG M L, et al. Optimal allocation of agricultural water and land resources integrated with virtual water trade: A perspective on spatial virtual water coordination[J]. Journal of Environmental Management, 2023(347): 119189.
- [17] 郭萍, 单宝英, 郭珊珊. 基于 Pareto 解集的多目标农业水土资源优化配置模型[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2019, 52(10): 1008-1016.
- GUO P, SHAN B Y, GUO S S. A multi-objective programming model for irrigation water and planting structure optimization based on Pareto set [J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2019, 52(10): 1008-1016.
- [18] 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 P, PAN Q, YUE Q, 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.
- [19] LU H Y, LI H P, WANG J, et al. Optimal water and land resource allocation in pastoral areas based on a water-land forage-livestock balance: A case study of Otog Front Banner, Inner Mongolia, China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020(27): 10328-10341.
- [20] GEBRE S. L, ORSHOVEN J. V, CATTRYSSSE D. Optimizing the combined allocation of land and water to agriculture in the Omo-Gibe River Basin considering the water-energy-food-nexus and environmental constraints[J]. Land, 2023, 12(2): 421.
- [21] WANG Y Y, XIE Y L, CAI Y P, et al. Considering economic-environmental joint benefits of water-land resources allocation for supporting sustainable agricultural system development in Northeastern China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022(29): 41093-41109.
- [22] WANG J W, QIN T L, LV X Z, et al. Study of optimal and joint allocations of water and land resources for multiple objectives[J]. Water Resources Management, 2023(37): 1241-1256.
- [23] 卢娜, 张佳明, 苏承国, 等. 考虑水土互馈关系的区域水土资源联合优化配置[J]. 水科学进展, 2024, 35(2): 208-219.
- LU N, ZHANG J M, SU C G, et al. Joint optimal allocation of regional water and land resources considering mutual feedback relationship[J]. Advances in Water Science, 2024, 35(2): 208-219.
- [24] 王浩, 牛存稳, 赵勇. 流域“自然-社会”二元水循环与水资源研究[J]. 地理学报, 2023, 78(7): 1599-1607.
- WANG H, NIU C W, ZHAO Y. Natural-artificial dualistic water cycle in river basins and water resources research [J]. Acta Geographica Sinica, 2023, 78(7): 1599-1607.
- [25] 裴源生, 许继军, 肖伟华, 等. 基于二元水循环的水量-水质-水效联合调控模型开发与应用[J]. 水利学报, 2020, 51(12): 1473-1485.
- PEI Y S, XU J J, XIAO W H, et al. Development and application of the water amount, quality and efficiency regulation model based on dualistic water cycle[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(12): 1473-1485.
- [26] REN H R, LIU B, ZHANG Z R, et al. A water-energy-food-carbon nexus optimization model for sustainable agricultural development in the Yellow River Basin under uncertainty[J]. Applied Energy, 2022(326): 120008.
- [27] FENG T T, LIU B, REN H R, et al. Optimized model for coordinated development of regional sustainable agriculture based on water-energy-land-carbon nexus system: A case study of Sichuan Province [J]. Energy Conversion and Management, 2023(291): 117261.
- [28] SUN J X, YANG Y L, QI P, et al. Development and application of a new water-carbon-economy coupling model (WCECM) for optimal allocation of agricultural water and land resources [J]. Agricultural Water Management, 2024(291): 108608.
- [29] WU H, GUO S S, GUO P, et al. Agricultural water and land resources allocation considering carbon sink/source and water scarcity/degradation footprint[J]. Science of the Total Environment, 2022, 819: 152058.
- [30] DAI L Y, ZHANG C. Research on the scheme of multi-objective planning water resources optimization system based on network model [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1881: 042045.
- [31] LIU X P, LIANG X, LI X, et al. A future land use simulation model

(FLUS) for simulating multiple land use scenarios by coupling human and natural effects[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2017, 168: 94-116.

[32] CAI Z C, KANG G D, TSURUTA H, et al. Estimate of CH₄ emissions from year-round flooded rice fields during rice growing season in China[J]. *Pedosphere*, 2005, 15 (1): 66-71.

[33] 何勇. 中国气候、陆地生态系统碳循环研究[M]. 北京: 气象出版社, 2006.

HE Y. Carbon cycle of climate and terrestrial ecosystem in China [M]. Beijing: China meteorological Press, 2006.

[34] 方精云, 郭兆迪, 朴世龙, 等. 1981—2000年中国陆地植被碳汇的估算[J]. *中国科学(D辑: 地球科学)*, 2007(6): 804-812.

FANG J Y, GUO Z D, PU S L, et al. Estimation of terrestrial vegetation carbon sink in China from 1981 to 2000[J]. *Science in China Series D-Earth Sciences*, 2007(6): 804-812.

[35] 赖力, 黄贤金, 刘伟良, 等. 基于投入产出技术的区域生态足迹调整分析: 以2002年江苏省经济为例[J]. *生态学报*, 2006

(4): 1285-1292.

LAN L, HUANG X J, LIU W L, et al. Adjustment for regional ecological footprint based on input-output technique: A case study of Jiangsu Province in 2002 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006(4): 1285-1292.

[36] 段晓男, 王效科, 逯非, 等. 中国湿地生态系统固碳现状和潜力[J]. *生态学报*, 2008(2): 463-469.

DUAN X N, WANG X K, LU F, et al. Carbon sequestration and its potential by wetland ecosystems in China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008(2): 463-469.

[37] 吴丰昌. 我国水体污染控制与治理成效、科技支撑与展望[J]. *水利发展研究*, 2023, 23(12): 1-8.

WU F C. Effectiveness, scientific and technological support, and prospects for water pollution control and management in China[J]. *Water Resources Development Research*, 2023, 23(12): 1-8.

(责任编辑 王海锋)