doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.11.065

秦岭东段洛河流域农业生产空间水分供需效应及其管控分区

马泉来[1,2]　杨崇科[1,2]　周　浩[3]　杨延伟[1,2]　路　中[4]　唐正清[5]　吕敏敏[1,2]

(1. 河南省资源环境调查一院, 郑州 450007; 2. 河南省资源环境调查工程技术研究中心, 郑州 450007;
3. 湖南师范大学地理科学学院, 长沙 410081; 4. 黄河勘测规划设计研究院有限公司, 郑州 450003;
5. 河南省豫地科技集团有限公司, 郑州 450016)

摘要: 水分供需失衡是限制农业可持续发展的关键因素,明晰农业生产空间的水分供需效应并由此实现科学灌溉管控分区,对于保障粮食安全及实现水土资源平衡具有重要现实意义。以河南生态治理关键带的秦岭东段洛河流域为研究区,基于土地利用和气象站点等多源水土信息数据,从天然水分供应视角构建水分供需平衡态势评估模型,以揭示 2000—2020 年农业生产空间的水分供需态势,进而综合权衡地块的水分平衡特性、规模积聚效益等目标,实现农业生产空间灌溉管控分区。结果表明:农业生产空间为流域最主要的国土空间用地类型,20 年间面积比例下降 1.90%,空间重心先往东北部再向西部持续迁移。流域地表蒸散量与有效降水量存在显著的时空相异性。南部以及灵宝市西部整体蒸散能力强而中部至东部蒸散能力弱,有效降水量则表现出由南向北逐渐减小的特点。研究期内,农业生产空间盈余区多集中于东部,亏缺区则呈现显著的空间扩张态势,盈亏风险等级历经以中度干旱为主到重度干旱为主的转变趋势。提出的分区方法充分权衡水分平衡特性和地块空间规模积聚效益,依据灌溉需求差异,划分为优先管控区、重点关注区、有序管理区、适度引导区和自适应产区 5 个分区,分区结果可因地制宜地实现农业有序灌溉管理。研究结果可为该流域积极推行以水定地战略及国土资源要素配置提供支持。

关键词: 农业生产空间; 水分供需平衡; 多智能体; 分区; 秦岭东段洛河流域

中图分类号: F301.24　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2025)11-0667-10　　**OSID**:

Water Supply and Demand Effect and Control Zoning of Agricultural Production Space in Luohe River Basin of Eastern Qinling Mountains

MA Quanlai[1,2]　YANG Chongke[1,2]　ZHOU Hao[3]　YANG Yanwei[1,2]　LU Zhong[4]　TANG Zhengqing[5]　LÜ Minmin[1,2]

(1. *The First Institute of Resources and Environment Investigation of Henan Province*, *Zhengzhou* 450007, *China*
2. *Henan Provincial Research Center for Resources and Environment Investigation*, *Zhengzhou* 450007, *China*
3. *School of Geographical Sciences*, *Hunan Normal University*, *Changsha* 410081, *China*
4. *Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd.*, *Zhengzhou* 450003, *China*
5. *Henan Yudi Science and Technology Group Co., Ltd.*, *Zhengzhou* 450016, *China*)

Abstract: Water supply-demand imbalance was identified as a critical factor hindering agricultural sustainability in ecologically sensitive regions. Clarifying the water supply-demand dynamics in agricultural production spaces and implementing scientific irrigation management were crucial for ensuring food security and optimizing territorial spatial planning. Focused on the Luohe River Basin in the eastern Qinling mountains, the land use data (2000—2020), meteorological data, and geospatial datasets were utilized. A water balance assessment model was constructed by integrating the Penman - Monteith equation, FU's formula, and an effective precipitation calculation model to precisely analyze water supply-demand equilibrium at a microscale grid level. A multi-agent spatial optimization model was further developed to delineate irrigation management zones. Key findings included as follows: agricultural

收稿日期: 2025-05-06　修回日期: 2025-06-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(42301300)、河南省科技攻关项目(252102321114、252102320211)、河南省软科学研究项目(252400411068)、河南省豫地科技集团重点科研项目(JTZDKY202404)和河南省高等学校重点科研计划项目(24A630025)

作者简介: 马泉来(1992—),男,工程师,主要从事耕地及国土资源综合利用研究,E-mail: maquanlai0716@163.com

通信作者: 杨崇科(1988—),男,高级工程师,主要从事资源环境效应及优化配置研究,E-mail: 15290851067@163.com

land remained the dominant land use type in the basin, though its area was decreased by 1.90% during the study period, with its spatial center of gravity shifting first northeastward and then westward. Significant spatiotemporal heterogeneity was observed in actual evapotranspiration and effective precipitation. Higher values were detected in the southern basin and western Lingbao City, while weaker values dominated central-eastern areas. P_e exhibited a gradual decline from south to north. The water surplus-deficit in agricultural zones showed an overall decreasing trend, with surplus areas concentrated in the eastern basin and expanding deficit zones. Drought risk escalated from moderate to severe levels over time. The proposed irrigation zoning methodology effectively balanced water equilibrium characteristics and spatial aggregation benefits of farmland, resulting in five management zones, including priority control area, key focus area, orderly management area, moderate guidance area and adaptive production area. Customized irrigation strategies were recommended based on zonal characteristics. These findings provided scientific support for implementing a "water-determined land use" strategy in territorial resource management within the basin.

Key words: agricultural production space; water supply-demand balance; multi-agent model; partition; Luohe River Basin of eastern Qinling mountains

0 引言

水分条件是农业灌溉策略制定的重要依据,揭示区域水分供需状况并明晰农业生产与水分平衡的关系,进而在空间上实现以水定地,对我国粮食生产以及国土空间要素配置具有积极意义[1-2]。秦岭东段洛河流域为我国南北生态屏障核心区,生态条件敏感脆弱,在保障生态文明条件建设上具有特殊地位[3]。该流域也是河南省境内主要的粮食主产区之一,但近年来境内水资源条件偏差且降雨分布不均的环境变化特征,导致当地农业生产出现了不同程度的水土利用失衡、耕地农业生产服务功能趋弱等问题,对粮食供应及农业经济可持续发展造成威胁。因此,揭示当地农业生产空间的水分供需效应,继而实现空间优化,对于保障粮食安全及实现水土资源平衡具有积极意义[4-5]。

水分供需状况为农业生产的本底要素条件,相关学者已围绕水分供需态势评估及优化利用研究做了大量工作:①供需态势评估方面,学者已从不同时空尺度产出了诸多研究成果[6],一是通过构建基于宏观统计数据的水分供需、水土匹配等模型,测度行政单元尺度下的多年水分平衡条件[7-9],但评估结果难以细致地揭示区域内部时空差异状况[10];二是从微观栅格尺度构建农业干旱评价模型和水分盈亏评价模型,以揭示农业生产管理过程中的水分供求条件[11],然而相关指标侧重从栅格尺度揭示水分平衡的理论状态,未充分结合外部空间要素变化进行过程效应规律探讨,实践价值有必要进一步挖掘。②用地优化方面,通过对不同地块外部水分供需条件的有序安排,实现农业生产空间配置。学者多采用如人工神经网络聚类算法[12]、模糊 c-均值聚类法[13]和模糊 k-均值聚类法[14]等聚类算法,实现空间用地结构的数量目标确定或具体地块安排。另外,基于地块相似水分供需条件的统一化管理以及不同供需条件的先后灌溉位序判定,是实现农业生产空间优化的关键所在,可在水分平衡态势评估基础上,采用科学算法以避免优化结果过于凌乱和破碎[15]。需指出的是,传统如 CLUE-S[16-17]和 FLUS[18]等土地利用优化模型多未充分考虑空间要素选择具有决定性作用的主体行为对土地利用影响[19],而智能体(Agent)系列模型在为不同类型决策者设定相异行为模式的基础上,可通过观察大量微观主体间的相互作用来研究宏观资源要素变化过程,且能充分表达出要素的自组织性和不同利益主体的决策过程[20-21],而农业生产空间用水管控分区,正是针对不同微观水分供需条件及空间要素的宏观决策过程。

在此背景下,基于 2000—2020 年多源水土利用信息数据,本文从微观栅格尺度构建水分供需平衡态势评估模型,以精准揭示秦岭东段洛河流域农业生产空间的水分供需效应,并依托多智能体的空间优化配置模型实现灌溉管控分区,以期为流域内国土空间要素科学配置及灌溉策略制定提供支持。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

研究区位于秦岭山脉东段北部,河南省西部,既是我国南北地理分界区,又是河南省生态保护与修复治理的关键带之一,辖郑州市、洛阳市和三门峡市等地,面积 2.24×10^4 km^2,见图 1。该区属黄河流域地形阶梯的过渡地带,下垫面条件较为复杂,山地占 52.4%,丘陵占 39.7%,平原占 7.9%,整体国土空间可概括为"五山四岭一分川",地势西南高、东北低。研究区为我国暖温带和北亚热带的过渡带,气

候自西南向东北显著递变。其中大部分区域属暖温带季风性气候区，四季分明，年平均气温 13.1 ~ 15.8℃，年降雨量多集中于 6—9 月，约占全年降水量的 62.41%。该流域降水时空异质性以及国土利用条件的多样性，引致水土流失严重、干旱季节性频发，当地亟需以水定地实现农业生产空间优化利用。

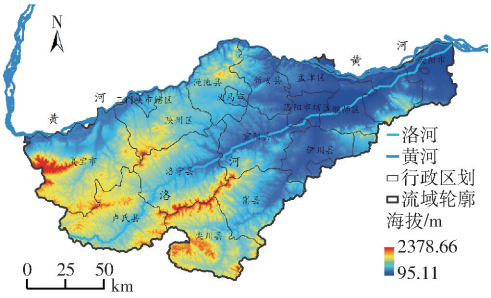


图 1　研究区地理位置示意图

Fig. 1　Location of research areas

1.2　数据来源与预处理

研究涉及农业生产空间数据、气象数据以及基础地理信息数据：①农业生产空间以自然资源为载体，包括水田、水浇地、旱地、果园和茶园等农业类用地，对应于农业生产服务功能。数据来自于资源环境科学数据中心（http://www.resdc.cn）“中国多时期土地利用遥感监测数据集（CNLUCC）（30 m）”产品。该数据集生产制作以 Landsat 影像为基础，在预处理基础上通过人工目视解译生成。基于 2000、2005、2010、2015、2020 年共 5 期该系列数据，通过对土地利用数据归并得到对应年份的农业生产空间数据。②气象数据获取自气象数据共享中心（http://data.cma.cn）“中国地面气象资料日值数据集 V3.0”，涉及流域及周边地区共 26 个地面基准气象站点的气温、降水量、风速等逐日数据。对站点数据格式转换和统计汇总处理，并利用 Python 语言批处理实现站点数据的 IDW 插值处理。③高程数据为 SRTM DEM 数据集（http://srtm.csi.cgiar.org/SELECTION/inputCoord.asp），精度为 30 m，对数据进行拼接、裁剪，其他数据包括行政区划、流域范围等基础地理信息数据。

2　研究方法

基于多年农业生产空间数据并考虑天然状态下的理论供水及耗水，构建面向农业生产空间的水分供需态势评估模型，继而实现农业生产空间的水分供需效应评估，以天然水分供需特点作为农业生产空间灌溉管控分区的适宜性依据，结合用地规模约束、易满足可持续田间管理需求以及空间集聚效应需求，构建多智能体空间优化模型以实现各灌溉类型地块的空间配置。

2.1　水分供需态势评估

2.1.1　有效降水量

有效降水量在理论上可视作流域境内农业生产管理的天然供水来源，与降水特性、土地和土壤特性、土壤水分状况、覆盖状况以及农业耕作管理措施等因素有关。有效降水量通常采用水量平衡法进行计算，即某次降水的有效降水量为总降水量减去地面径流量和深层渗漏量，但由于后两项不易测定，采用在诸多研究中得到较好验证的美国农业部土壤保持局推荐的有效降水量经验公式[22]进行计算，公式为

$$P_e=\begin{cases}P(4.17-0.2P)/4.17 & (P<8.3\ \text{mm/d})\\ 4.17+0.1P & (P\geqslant 8.3\ \text{mm/d})\end{cases} \tag{1}$$

式中　P_e——有效降水量，mm/d

P——天然降水量，mm/d

对逐日有效降水量进行汇总，可得到对应年期的年有效降水量，以表征农业供水来源特征。

2.1.2　地表潜在蒸散量

地表蒸散量反映农业生产过程中天然水分耗散能力或需求水平，是农业灌溉制度制定的关键参数之一。遵循空气动力学原理并充分考虑叶片气孔阻力的 Penman - Monteith 模型，是估算地表潜在蒸散能力精度较高和应用最广的理论模型[23]，公式为

$$ET_0=ET_{rad}+ET_{aero}=\frac{0.408\Delta(R_n-G)+\gamma\dfrac{900}{T+273}U_2(e_s-e_a)}{\Delta+\gamma(1+0.34U_2)} \tag{2}$$

式中　ET_0——地表潜在蒸散量，mm

ET_{rad}——地表蒸散辐射项，mm

ET_{aero}——空气动力学项，mm

R_n——冠层表面净辐射，MJ/(m²·d)

G——土壤热通量，MJ/(m²·d)

e_s——饱和水气压，kPa

e_a——实际水汽压，kPa

Δ——饱和水汽压-温度曲线斜率，kPa/℃

γ——干湿表常数，kPa/℃

U_2——2 m 处风速，m/s

T——气温，℃

另一方面，研究区大部分地区属暖温带季风性气候区，实际蒸散量 ET 与 ET_0 存在正比或互补关系，傅抱璞公式[24]在综合考虑地表下垫面和降水前提下，能较好反映长期性的地表潜在蒸散量与实际蒸散量关系，公式为

$$ET/P=1+ET_0/P-[1+(ET_0/P)^m]^{1/m} \tag{3}$$

式中 m 为表征下垫面透水性、植被状况和地形等特

征的参数,下垫面透水性差、植被少、地形坡度大的地区,地表径流强,m 小;反之,在透水性好、植被覆盖度高、地势平坦的地区,地表径流小,m 大。研究区为“五山四岭一分川”,地貌类型丰富,参考文献[1],将 m 统一取值为 2.5。

2.1.3 供需态势评估

水分平衡量 D 能从理论上反映潜在水分供需状况,可通过 P_e 与 ET 的差值或差值后的比值参数来理论表征[25]。综合考虑二者关系,构建水分盈亏指数(C_{WPLI}),以反映水分有效供给与实际需求量的供需关系,公式为

$$C_{\mathrm{WPLI}} = D/ET = (P_e - ET)/ET \tag{4}$$

式中 D 反映水分盈余或亏缺程度,正值时表示水分盈余,负值时表示水分亏缺。同时,为反映供需程度等级,参照已有等级划分标准[1],将盈亏程度共划分为 5 个风险等级,分别为正常($C_{\mathrm{WPLI}} > -0.15$)、轻度干旱($-0.15 \leqslant C_{\mathrm{WPLI}} < -0.30$)、中度干旱($-0.30 \leqslant C_{\mathrm{WPLI}} < -0.45$)、重度干旱($-0.45 \leqslant C_{\mathrm{WPLI}} < -0.60$)和严重干旱($C_{\mathrm{WPLI}} \leqslant -0.60$)。

2.2 空间优化评价模型

多智能体系列模型中的空间优化配置模型(AgentLA),通过对所有智能体的自适应优化,能实现资源要素的空间布局调整[20]。以 C_{WPLI} 为灌溉管控分区的“适宜性”依据,结合用地规模约束、易满足可持续田间管理需求以及空间集聚效应,实现农业生产空间优化。该模型运行时,随机位置的智能体群由空间单元尺度所决定,每个智能体占据一个网格,通过特定适应度函数辅助决策以选择潜在迁移位置,并通过比较变化前后的位置确定移动合理性。

基于农业生产空间的多年平均水分亏缺风险等级确定配置优先程度,将配置区依次划分为优先管控区、重点关注区、有序管理区、适度引导区和自适应产区,分别对应于严重、重度、中度、轻度干旱和正常等级。迭代过程中,需在水分盈亏指数图层基础上预设智能体数量(500 m × 500 m),同时智能体会根据自身搜索位置搜集多个空间位置信息,然后利用个体的适应度函数 f 评价该位置并找出最佳位置,表达式为

$$f = w_v v + w_c c \tag{5}$$

$$c = \sum_{i \in \Omega} x_i \exp(-d_i/\lambda) \Big/ \sum_{i \in \Omega} \exp(-d_i/\lambda) \tag{6}$$

$$w_v + w_c = 1$$

式中 w_v——适宜性权重

w_c——空间效率权重

c——空间效率,用耕地集中连片程度表示,它促使智能体空间聚集

v——适宜性值,用水分盈亏指数来反映

x_i——二分变量,优化过程中某一位置被智能体占据时取值为 1,反之为 0

Ω——智能体的摩尔邻域(Moore neighborhood)

d_i——邻域内的智能体 i 到中心智能体的欧氏距离,m

λ——补偿系数,取 1 ~ 10

在智能体完成决策后,所形成的管控分区将通过函数 F(位于 0 ~ 1 之间,F 值越高则优化效果越好)进行评价,如果数据波动小于预设阈值时,将停止迭代并输出结果,表达式为

$$F = SV - SL \tag{7}$$

其中

$$SV = \sum_{i=1}^{n} v_i / V_{Sum1} \tag{8}$$

$$SL = (L_{Sum} - L_{Sum2})/(L_{Sum1} - L_{Sum2}) \tag{9}$$

式中 SV——耕地实现水分平衡状态的指数

SL——整体形态特征指数,反映破碎程度

n——智能体数量

V_{Sum1}——高水分盈余地块 C_{WPLI} 指数总和

L_{Sum}——实际模拟结果周长,m

L_{Sum2}——整体格局最紧凑时周长,m

L_{Sum1}——假设全部智能体孤立存在时布局结果周长,m

SV 增加或 SL 减小可提高布局效果。

3 结果分析

3.1 农业生产空间变化

秦岭东段洛河流域为河南省粮食主产区之一,农业生产空间为其最主要的国土空间用地类型,研究期初,农业生产空间用地面积比例达到 47.25%,为区域粮食生产提供了良好空间用地支撑(图 2)。流域同时也是河南省城镇化现象最为突出的地区之一。2000 年以来,受长期高强度开发以及人口城镇化等因素影响,当地农业生产空间出现了不同程度抛荒、废弃化情形,同时因经济发展驱动导致了部分城镇建成区周边的耕地被建设占用,由此综合导致农业生产空间面积持续下降,至 2020 年面积比例已降为 45.35%;秦岭东段洛河流域整体农业生产格局保持稳定,各年份的农业空间分布重心均位于洛阳市洛宁县境内,但从空间迁移来看,农业生产重心逐渐往西偏移。2000—2015 年,流域农业生产重心基本以速度 1.36 km/a 往东北方向缓慢移动,至 2020 年,重心已由 2015 年的(34.39°N,111.55°E)西移至 2020 年的(34.41°N,111.69°E),移动距离达到 12.81 km,农业生产重心转移较为剧烈。

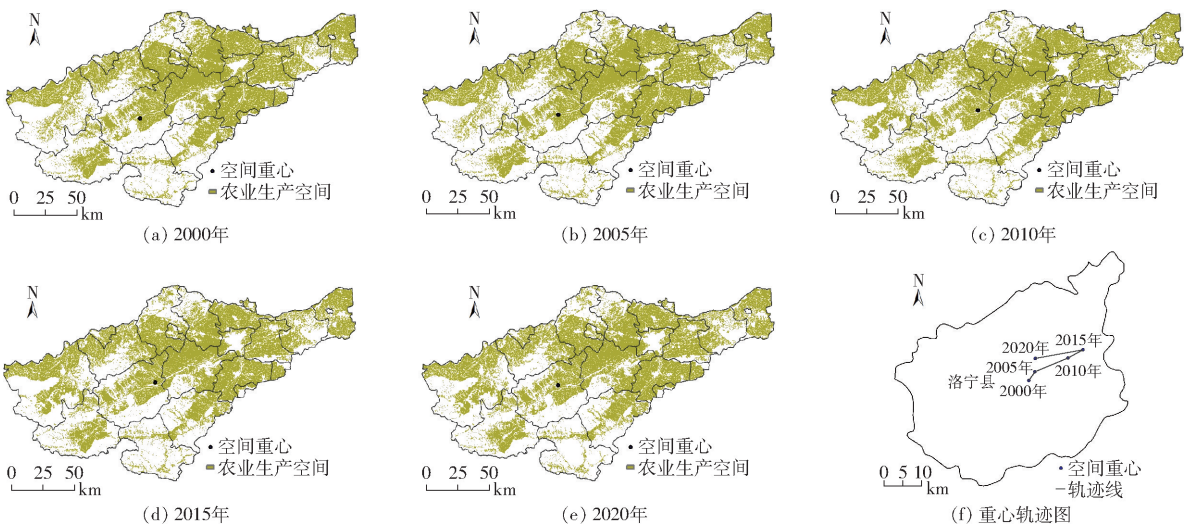


图 2　2000—2020 年秦岭东段洛河流域农业生产空间分布

Fig. 2　Spatial distribution maps of agricultural production in Luohe River Basin of eastern Qinling mountains from 2000 to 2020

3.2　水分供需平衡态势

3.2.1　地表蒸散量与有效降水量

实际蒸散量表征土壤表面蒸发和植物叶片蒸腾作用而形成的地表水分散失程度，为作物生长期的主要耗水来源。研究期内，受气候增温、暖湿化现象加剧等因素影响，实际蒸散能力逐渐增强。2000 年，蒸散强度为 492.57 mm，2020 年已增至 586.08 mm，对应的多年平均地表蒸散量达 538.62 mm，蒸散量范围为 155.06 ~ 1 171.78 mm。同时在空间分布上，流域下垫面条件差异显著，空间上多年平均蒸散量高低值差异大，相对低值区主要分布在流域中部以及东部等地，高值区（557.02 ~ 602.69 mm）则主要集中于流域南部和西北部等地，并在空间上表现出从南部、西部向东北部呈不规则递减规律。有效降水量可视作农业管理期内实际的天然供水来源，与降水、气象、土壤特性、地表覆盖状况等因素有关。研究期内流域有效降水量年际波动较大，2000 年平均有效降水量为 674.53 mm，2010 年降至 609.29 mm，而 2020 年又升为 647.21 mm。从多年平均程度来看，有效降水强度为 643.01 mm，平均低值区（523.27 ~ 605.62 mm）多集中于流域北部，高值区则主要分布在流域南部，并在空间上表现出由南至北持续下降的特点（图 3，为精简图像篇幅，仅列研究期初、末以及多年平均指标分布图）。

3.2.2　水分供需态势

秦岭东段洛河流域各时点的水分盈亏量整体呈下降趋势，灌溉用水情势不容乐观（图 4）。研究期初，盈余量均值为 179.45 mm，且在 2010 年出现较大幅度上升，达到研究期内最高值 196.63 mm，2015 年盈余均值下降至 72.01 mm，下降幅度达 63.27%，

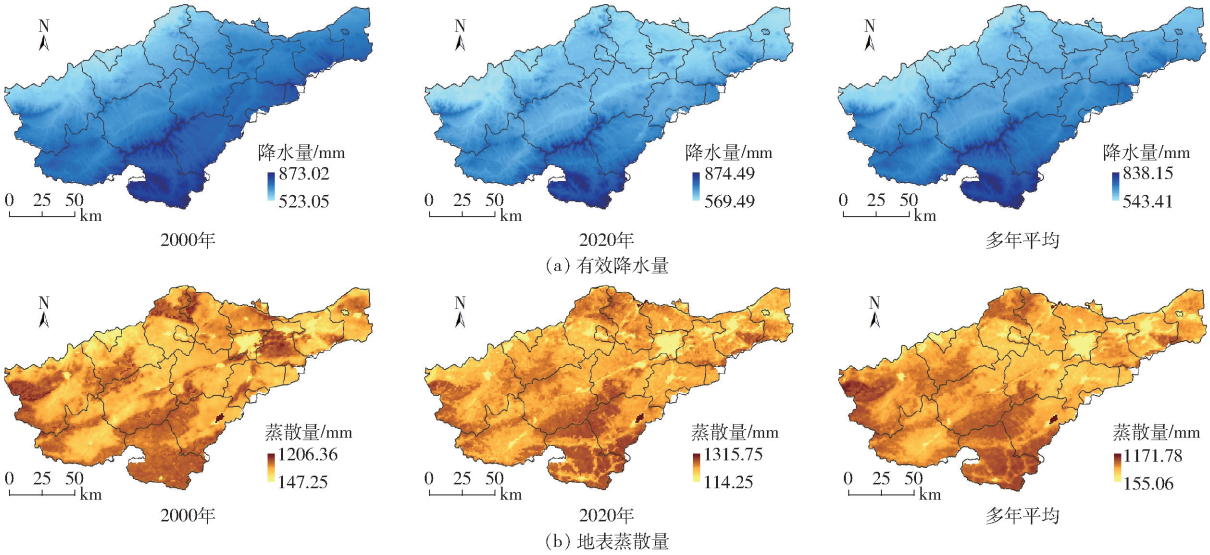


图 3　2000—2020 年秦岭东段洛河流域有效降水量与地表蒸散量分布

Fig. 3　Distribution maps of effective precipitation and surface evapotranspiration in Luohe River Basin of eastern Qinling mountains from 2000 to 2020

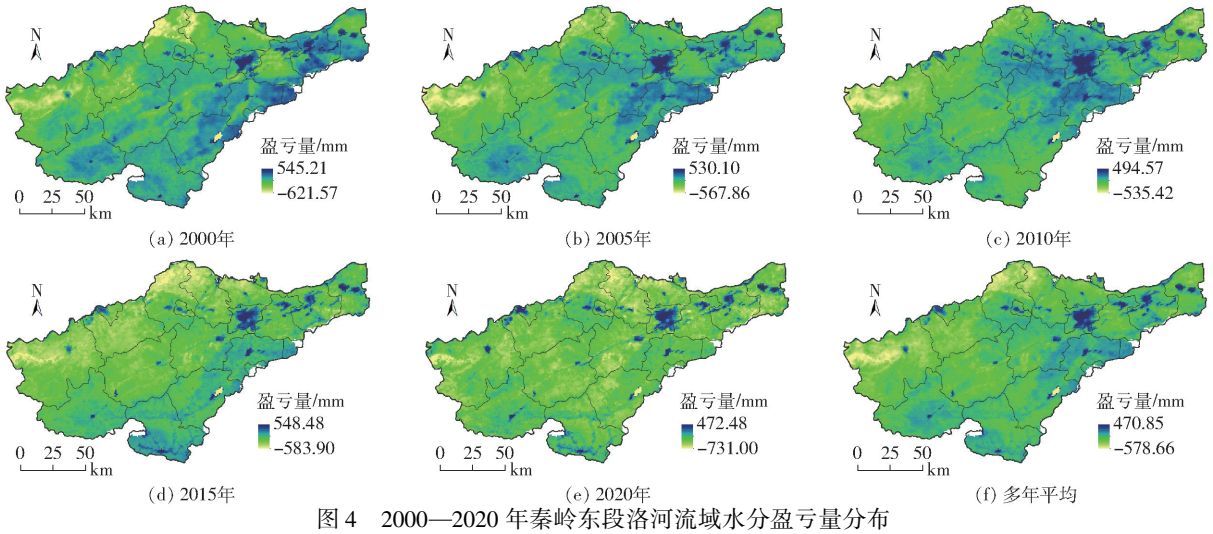


图 4 2000—2020 年秦岭东段洛河流域水分盈亏量分布

Fig. 4 Distribution maps of water surplus and deficit in Luohe River Basin of eastern Qinling mountains from 2000 to 2020

而 2020 年盈余量均值不足研究期初的 40%。从极值来看,盈余极高值出现在 2015 年,亏缺极值则出现在 2020 年,达到 -731.00 mm,区域水分平衡面临较大压力;空间分布上,盈亏状态在年际间表现出显著的分异特点。受流域年际降水倾向性及气候增温等因素影响,流域多年盈余区主要集中于东部,亏缺区则呈显著的空间扩张态势,并至 2020 年亏缺区面积已占流域总面积的 12.46%。但需指出的是,仅北部、西部等部分零星地区的水分亏缺量大于 50 mm,大部分地区的亏缺量均偏小(-59.34 ~ 0 mm),占总水分亏缺区面积的 87.46%。对多年平均水分平衡态势而言,水分亏缺区也主要集中于流域北部和西部,相对面积比例为 6.31%,东部和西南部等地的水分盈余量较大。

3.3 农业生产空间水分供需平衡效应

3.3.1 盈亏程度评价

盈亏程度反映水分有效供给量与实际需求量间的供给余缺关系。年际有效降水量与地表蒸散量的时空波动特点,导致了整个流域农业生产空间的盈亏指数也表现出反复变化特点(图 5a,为精简图像篇幅,仅列研究期初、中及期末盈亏指数分布图)。2000 年盈亏指数均值为 0.41,整体水分供需态势偏好,高值区主要分布在流域东南部的伊川县、嵩县等地,低值区则出现于流域西部的灵宝市以及北部的孟津区、偃师区等地。2005 年,盈亏指数均值轻度降至 0.40,其中高值区在流域东南部以及中部等地进一步扩张。相比 2000、2005 年,2010 年荥阳市等东部市县的水分亏缺态势明显加剧,整体水分盈亏指数均值为 0.55。2015 年后盈亏指数迅速下降,农业生产空间灌溉需求显著增强。其中 2015 年盈亏指数处于 -0.52 ~ 2.41 之间,均值降至 0.15,低值区则逐渐扩张至流域西部、西北部以及北部部分地区,包括灵宝市、陕州区和渑池县等。2020 年,盈亏指数范围为 -0.56 ~ 1.22,均值继续降低至 0.12,高值区的盈亏指数进一步下降,低值区零散分布在流域西部以及灵宝市、新安县、荥阳市等沿黄地区,农业生产空间的水分灌溉情势不容乐观。

3.3.2 干旱风险等级

2000—2010 年,流域农业生产空间的水分盈亏态势以中度、重度和严重干旱等级为主,三者占比之和超过 79%,水分亏缺风险较大。2000 年,处于正常水分供需水平的农业生产空间仅占国土总面积的 1.12%,重度干旱和中度干旱区的面积规模相当,占比分别为 31.62% 和 35.29%,二者主要分布于陕州区、洛宁县、宜阳县、渑池县等地(表 1 和图 5b)。2005 年,严重干旱区在原分布区基础上萎缩并转化为重度干旱区,原重度干旱区大面积转化为中度干旱区,轻度干旱区向周边持续扩张。面积变化上,严重干旱的农业生产空间面积比例降至 13.31%,重度干旱面积比例增至 34.29%。2010 年干旱等级分布与 2005 年相似,严重干旱面积占比已达 17.50%,并表现出向西部扩张的特点,其余干旱类型面积比例则保持稳定;2015 年,大量轻度干旱区和少量中度干旱区转化为严重和重度干旱区,并以宜阳县境内轻度干旱区萎缩最为严重,而正常水分盈亏面积占比仅为 0.19%。2020 年,严重干旱区整体向东部方向转移,伊川县的中度干旱区被重度干旱区替代,重度干旱区在各区域内均有分布。综上,秦岭东段洛河流域的农业生产空间灌溉用水情势不容乐观,当地如新安县、孟津县等地需围绕水分供需评估结果进行适水精准调控,以实现该流域乃至沿黄地区的农业科学灌溉与管理。

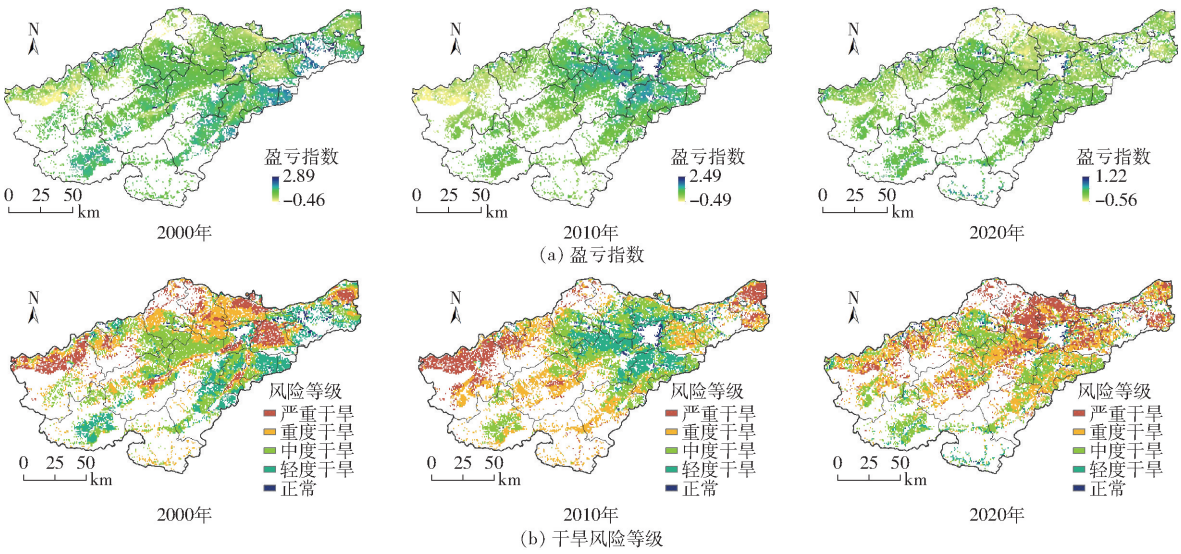


图 5　2000—2020 年秦岭东段洛河流域农业生产空间水分供需平衡效应

Fig. 5　Effect diagrams of water supply and demand balance in agricultural production space in Luohe River Basin of eastern Qinling mountains from 2000 to 2020

表 1　2000—2020 年秦岭东段洛河流域不同水分亏缺评价等级面积比例统计

Tab. 1　Statistics of different water deficiency assessment levels and areas ratio in Luohe River Basin of eastern Qinling mountains from 2000 to 2020　%

干旱风险等级	占农业生产空间面积比例				
	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年	2020 年
严重干旱	19. 23	13. 31	17. 50	25. 74	25. 89
重度干旱	31. 62	34. 29	32. 36	42. 75	42. 17
中度干旱	35. 29	32. 01	31. 25	28. 34	27. 26
轻度干旱	12. 74	18. 51	17. 39	2. 98	3. 57
正常	1. 12	1. 88	1. 50	0. 19	1. 11

3.4　农业生产空间灌溉管控分区

3.4.1　灌溉分区过程

水分亏缺风险越高则调控优先度越大，风险低则可降低灌溉设施配套程度，并基于粮食生产需求及相应政策进行自适应管理。基于农业生产空间的多年水分亏缺风险确定配置优先程度，将配置区依次划分为优先管控区、重点关注区、有序管理区、适度引导区和自适应产区。分区需在水分盈亏指数图层基础上预设智能体数量，并结合多年亏缺风险等级，分别确定除自适应产区外不同优化分区的智能体数量：优先管控区为 8 177 个、重点关注区为 14 733 个、有序管理区为 12 398 个和适度引导区为 4 439 个。在空间优化配置模型支持下，通过对不同区所对应智能体数目混合叠加模拟（“优先”、“优先 + 重点”、“优先 + 重点 + 有序”和“优先 + 重点 + 有序 + 适度”），以划定不同农业灌溉管控分区。经多次参数调试，当将适宜性权重 w_v 和空间效率权重 w_c 分别确定为 0. 7 和 0. 3 时，其所对应的适应度函数值 F 达到最大。在此参数设置条件下，上述混合叠加模型目标分别经历 146、119、63、58 次迭代，适应度函数值趋于稳定，对应的 F 值依次为 0. 876 2、0. 891 1、0. 830 5 和 0. 884 1，然后通过图层交集求差处理实现灌溉管控分区。

3.4.2　灌溉分区结果

灌溉优先管控区面积占比达 20. 33%，空间上多位于灵宝市北部、新安县南部、孟津区和偃师区境内（图 6），该类型区多位于黄河干流沿线，为流域内农业种植管理相对集中的地区之一，但由于当地水分亏缺风险最高，农业生产多处于“紧平衡”状态，仅依靠天然降水将难以保证粮食连续稳定生产，因此需优先进行农业灌溉管控建设，合理兴建水利及灌溉设施，并保障高标准基本农田建设资金条件。重点关注区面积占比达到最高（36. 64%），为最重要的灌溉管控类型区，多分布在灵宝市南部、洛宁县东北部、宜阳县北部和伊川县等地。相较于优先管控区，该类型区分布更广，水资源灌溉保障程度偏弱，并存在不同程度的地下水沉降、污染等问题，在天然降水条件下该类型区尚可处于水分盈余状态

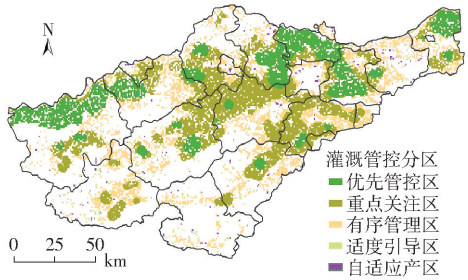


图 6　秦岭东段洛河流域农业生产空间灌溉管控分区

Fig. 6　Zoning map of agricultural production spatial irrigation control in Luohe River Basin of eastern Qinling mountains

(盈余量为 113.06 mm),但倘若出现旱情或处于干旱年气候条件下,当地粮食种植将面临较大风险,因此需重点关注当地人工灌溉设施建设条件,提高农业抗旱水平。有序管理区面积占比为 30.83%,多零散分布在优先管控区以及重点关注区周边地带,多种作物种植模式混合,水分盈余量达 182.54 mm。而由于当地地势以山地丘陵为主,农业耕种的自然条件及可达性一般,因此在天然用水盈余较多条件下,应进行有序农业生产管理,并积极提高农业种植补贴力度,鼓励种粮以防止农业“非粮化”、“非农化”。适度引导区面积占比为 11.04%,零散分布在流域全境,水分盈余量偏高(253.42 mm),考虑到其地块的水分供应条件较好且规模偏小,可对该类型区进行适度引导,并在保证粮食安全前提下,种植适当比例的高耗水经济型作物。自适应产区面积占比仅为 1.16%,空间分布零散且规律性差,应根据当地具体情况进行自适应灌溉管理。总之,本文在充分权衡农业生产空间的水分平衡特性和地块空间规模积聚效益基础上,针对性提出了秦岭东段洛河流域农业生产灌溉管控策略和未来发展方向,分区结果对因地制宜地实现农业有序灌溉具有积极意义。

4 讨论

秦岭东段洛河流域需紧紧抓住黄河流域生态保护与高质量发展的国家级战略契机,积极谋划和推行面向水分供需平衡目标的区域农业可持续利用战略。本文从气候水分平衡角度并基于微观栅格尺度,历史重现了当地气候条件所主导的农业生产空间的水分供需平衡状况以及后续灌溉管控方向,可为流域乃至河南省国土空间要素科学配置及灌溉策略制定提供支持。值得注意的是,受气候增温、降水波动性增大等因素影响,秦岭东段洛河流域整体水分亏缺区不断增大,农业用水供应不足风险愈来愈突出,单纯地利用天然降水已难以保证粮食正常生产,当地政府需在积极考虑外在变化条件下围绕不同干旱区制定更加精细化的农业生产空间利用开发战略;另一方面,本文从单一尺度出发探讨了灌溉管控分区优化问题,但考虑到优化过程存在的空间尺度性效应,倘若采用县市等行政区尺度分别实现各县市的灌溉管控分区模拟,进而归并得到整个流域的灌溉管控分区结果,可能会优于单一尺度的优化结果。因此,后续可进一步验证灌溉管控分区的空间尺度性效应;最后,本文所聚焦的水分供需平衡效应,并非“归因”或“因果”分析范畴,而是侧重于探讨农业生产空间与水分平衡的对应关系,在此基础上可实现农业生产空间的主动适应性调整。同时,由于农业生产管理与气候水分平衡常存在滞后性关系,后续可从滞后一期或多期角度并采用情景回归分析等手段,定量解析农业用地变化与水分平衡的对应关系。

5 结论

(1)受长期水土流失、高强度利用开发以及人口城镇化等因素影响,流域农业生产空间面积缓慢下降,20 年间其面积比例共下降 1.90%,空间上重心先往东北部再往西部进行移动。

(2)地表实际蒸散量与有效降水量存在显著的时空相异性,南部以及灵宝市西部的整体蒸散能力较强,中部至东部蒸散能力偏弱,有效降水量表现出由南至北逐渐减小的特点。

(3)各时点农业生产空间的盈亏量整体呈下降趋势,盈余区多集中于研究区东部,亏缺区则呈现显著的空间扩张态势,盈亏风险等级历经了以中度干旱为主到重度干旱为主的转变。

(4)提出的综合权衡农业生产空间水分平衡特性和地块规模积聚效益的管控分区方法,能精准地实现农业有序灌溉管理。分区结果显示,秦岭东段洛河流域拥有较高的空间精准灌溉与分区重构需求。将当地农业生产空间划分为 5 种灌溉区,其中优先管控区、重点关注区和有序管理区面积占比分别为 20.33%、36.64% 和 30.83%,并应积极采取不同的灌溉管控策略。

参 考 文 献

[1] 周浩,覃湘,马泉来,等. 河南沿黄区“以水定地”耕地空间重构研究——基于作物种植视角[J]. 生态学报, 2024, 44(17): 7604 - 7614.
ZHOU Hao, QIN Xiang, MA Quanlai, et al. Study on the spatial layout of cultivated land with the principles of water settling land in the Yellow River Basin of Henan Province: from the perspective of crop planting[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(17): 7604 - 7614. (in Chinese)

[2] 马泉来,吕敏敏,杨延伟,等. 河南省耕地粮食生产时空演变及功能分区[J]. 地域研究与开发, 2024, 43(2): 161 - 167.
MA Quanlai, LÜ Minmin, YANG Yanwei, et al. Spatial-temporal evolution of cultivated grain production capacity and functional zoning in Henan Province[J]. Areal Research and Development, 2024, 43(2): 161 - 167. (in Chinese)

[3] 佟涛,颜俊君,王亚星,等. 秦岭东段洛河流域土地利用变化的地形梯度效应研究[J]. 湖南师范大学自然科学学报, 2024, 47(3): 10 - 18.

TONG Tao, YAN Junjun, WANG Yaxing, et al. Study on the terrain gradient effect of land use changes in the Luohe River Basin of the eastern Qinling Mountains[J]. Journal of Natural Science of Hunan Normal University, 2024, 47(3): 10 - 18. (in Chinese)

[4] 周浩,金平,夏卫生,等. 耕地利用下挠力河流域水分平衡效应研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(7): 313 - 322.
ZHOU Hao, JIN Ping, XIA Weisheng, et al. Cultivated land change induced water balance effect in Naoli River Basin[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(7): 313 - 322. (in Chinese)

[5] 宫兴龙,付强,关英红,等. 土地结构改变对水土资源平衡的影响分析[J]. 农业机械学报, 2018, 49(4): 319 - 329.
GONG Xinglong, FU Qiang, GUAN Yinghong, et al. Influence of land structure change on balance of soil and water resources[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 319 - 329. (in Chinese)

[6] 张佳运,马淑梅,余常兵,等. 长江流域旱地多熟模式水分供需平衡特征与水分生产效益[J]. 作物学报, 2022, 48(11): 2891 - 2907.
ZHANG Jiayun, MA Shumei, YU Changbing, et al. Characteristics of water supply-demand equilibrium and water production benefits of the dryland multiple cropping patterns in the Yangtze River Basin[J]. Acta Agronomica Sinica, 2022, 48(11): 2891 - 2907. (in Chinese)

[7] 马维兢,王耀辰,寇敬雯,等. 沿黄九省(区)水-耕地-粮食协同关系情景分析[J]. 地球科学进展, 2023, 38(12): 1243 - 1258.
MA Weijing, WANG Yaochen, KOU Jingwen, et al. Scenario analysis of water - land - food synergy in nine provinces along the Yellow River[J]. Advances in Earth Science, 2023, 38(12): 1243 - 1258. (in Chinese)

[8] 刘统兵,方瑜,黄峰,等. 中国广义农业水土资源匹配及利用状况动态评价[J]. 农业工程学报, 2023, 39(10): 56 - 65.
LIU Tongbing, FANG Yu, HUANG Feng, et al. Dynamic evaluation of the matching degree and utilization condition of generalized agricultural water and arable land resources in China[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(10): 56 - 65. (in Chinese)

[9] 孙宝娣,于德湖,崔东旭. 流域生态系统服务和水土资源匹配研究进展[J]. 生态学报, 2023, 43(10): 4308 - 4318.
SUN Baodi, YU Dehu, CUI Dongxu. A review of ecosystem services and water-land matching for the river basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(10): 4308 - 4318. (in Chinese)

[10] 张雯,刘倩倩,王慧,等. 基于水足迹的山东省农业水土资源匹配特征及短缺压力分析[J]. 生态学报, 2023, 43(12): 4943 - 4953.
ZHANG Wen, LIU Qianqian, WANG Hui, et al. Analysis of matching characteristics and scarcity of agricultural water and land resources in Shandong Province based on water footprint[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(12): 4943 - 4953. (in Chinese)

[11] 陆玟,朱永华,吕海深,等. 淮北平原冬小麦农业干旱时空变化规律[J]. 灌溉排水学报, 2024, 43(11): 74 - 81, 106.
LU Wen, ZHU Yonghua, LÜ Haishen, et al. Spatiotemporal variation in droughts during winter wheat growing season in the Huaibei Plain[J], Journal of Irrigation and Drainage, 2024, 43(11): 74 - 81, 106. (in Chinese)

[12] 吉珊珊. 基于神经网络树和人工蜂群优化的数据聚类[J]. 南京师大学报(自然科学版), 2021, 44(1): 119 - 127.
JI Shanshan. Neuron network tree and artificial bee colony optimization based data clustering algorithm[J]. Journal of Nanjing Normal University(Natural Science Edition), 2021, 44(1): 119 - 127. (in Chinese)

[13] HESAN I, AJITH A. Fuzzy C-means and fuzzy swarm for fuzzy clustering problem[J]. Expert Systems with Application, 2011, 38(3): 1835 - 1838.

[14] 郭燕,田延峰,吴宏海,等. 基于多源数据和模糊 k-均值方法的农田土壤管理分区研究[J]. 土壤学报, 2013, 50(3): 441 - 447.
GUO Yan, TIAN Yanfeng, WU Honghai, et al. Zoning of soil management based on multi-sources data and fuzzy k-means[J]. Acta Pedologica Sinica, 2013, 50(3): 441 - 447. (in Chinese)

[15] 宋戈,张红梅. 东北典型黑土区耕地轮作休耕的空间重构[J]. 自然资源学报, 2022, 37(9): 2231 - 2246.
SONG Ge, ZHANG Hongmei. Spatial reconstruction of farmland rotation and fallow in the typical black soil region of Northeast China[J]. Journal of Natural Resources, 2022, 37(9): 2231 - 2246. (in Chinese)

[16] 王端睿,毛德华,王宗明,等. 东北地区土地覆被格局变化模拟:基于 CLUE - S 和 Markov - CA 模型的对比分析[J]. 地理科学, 2024, 44(2): 329 - 339.
WANG Duanrui, MAO Dehua, WANG Zongming, et al. Simulation of land cover pattern change in Northeast China: a comparative analysis based on CLUE - S and Markov - CA models[J]. Geographical Science, 2024, 44(2): 329 - 339. (in Chinese)

[17] 李衡,陈国银,王世晶,等. 基于 CLUE - S 情景模拟的挠力河流域耕地适宜性评价研究[J]. 农业机械学报, 2023, 54(10): 329 - 339.
LI Heng, CHEN Guoyin, WANG Shijing, et al. Suitability evaluation of cultivated land in Naoli River Basin based on CLUE - S scenario simulation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(10): 329 - 339. (in Chinese)

[18] 孙博,吴雨珂,闫白冰,等. 1990—2020 年淮河生态经济带耕地资源分布变化特征与驱动机制[J]. 农业工程学报, 2023, 39(23): 247 - 258.
SUN Bo, WU Yuke, YAN Baibing, et al. Spatiotemporal variations and impacts on cultivated land resources in Huaihe Eco-

Economic Belt during 1990—2020[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(23): 247 - 258. (in Chinese)
[19] 王越,宋戈,吕冰. 基于多智能体粒子群算法的松嫩平原土地利用格局优化[J]. 资源科学, 2019, 41(4): 729 - 739.
WANG Yue, SONG Ge, LÜ Bing. Optimization of land-use pattern based on multi-agent particle swarm optimization in the Song-Nen Plain region[J]. Resources Science, 2019, 41(4): 729 - 739. (in Chinese)
[20] 周浩,雷国平,杨雪昕,等. 基于 AgentLA 模型的农田精准灌溉管理分区研究[J]. 水土保持学报, 2018, 32(1): 274 - 279,285.
ZHOU Hao, LEI Guoping, YANG Xuexin, et al. Study on precision irrigation management zones in farmland according agent-based model for optimal land allocation[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(1): 274 - 279, 285. (in Chinese)
[21] 陈逸敏,黎夏,刘小平,等. 基于耦合地理模拟优化系统 GeoSOS 的农田保护区预警[J]. 地理学报, 2010, 65(9): 1137 - 1145.
CHEN Yimin, LI Xia, LIU Xiaoping, et al. Coupling geosimulation and optimization (GeoSOS) for zoning and alerting of agricultural conservation areas[J]. Acta Geographica Sinica, 2010, 65(9): 1137 - 1145. (in Chinese)
[22] 张莹,雷国平,张弘强,等. 微观尺度分析挠力河流域耕地利用水土资源匹配时空动态[J]. 农业工程学报, 2019, 35(8): 185 - 194.
ZHANG Ying, LEI Guoping, ZHANG Hongqiang, et al. Spatiotemporal dynamics of land and water resources matching of cultivated land use based on micro scale in Naoli River Basin[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(8): 185 - 194. (in Chinese)
[23] 胡金虎,丁建丽, 张子鹏,等. 近 30 年吐鲁番哈密地区植被生态需水估算[J]. 生态学报, 2024, 44(19): 8699 - 8715.
HU Jinhu, DING Jianli, ZHANG Zipeng, et al. Estimation of vegetation ecological water demand in Tuha area in the past 30 years[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(19): 8699 - 8715. (in Chinese)
[24] 赵建刚. 土地利用变化对横排头流域蒸散发的影响研究[J]. 中国农村水利水电, 2015(9): 68 - 72,76.
ZHAO Jiangang. Research on the effect of land use change on evaporation of Hengpaitou watershed[J]. China Rural Water and Hydropower, 2015(9): 68 - 72, 76. (in Chinese)
[25] 周浩,胡凌,陈藜藜,等. 衡邵干旱走廊耕地种植结构水分供需评估及其优化[J]. 资源科学, 2024, 46(5): 1032 - 1044.
ZHOU Hao, HU Ling, CHEN Lili, et al. Evaluation of water supply and demand and optimization under the planting structure of cultivated land in the Hengshao Arid Corridor[J]. Resources Science, 2024, 46(5): 1032 - 1044. (in Chinese)

(上接第 657 页)

[20] BABAK O, DEUTSCH C V. Improved spatial modeling by merging multiple secondary data for intrinsic collocated coKriging [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2009, 69: 93 - 99.
[21] GHADERMAZI J, SAYYAD G, MOHAMMADI J, et al. Spatial prediction of nitrate concentration in drinking water using pH as auxiliary coKriging variable[J]. Procedia Environmental Sciences, 2013, 3: 130 - 135.
[22] YANG Q Y, JIANG Z C, MA Z L, et al. Spatial prediction of soil water content in Karst area using prime terrain variables as auxiliary coKriging variable[J]. Environmental Earth Sciences, 2014, 72(11): 4303 - 4310.
[23] ZENG C Y, YANG L, ZHU A X, et al. Mapping soil organic matter concentration at different scales using a mixed geographically weighted regression method[J]. Geoderma, 2016, 281: 69 - 82.
[24] 孙波,宋歌,曹尧东. 丘陵区水稻土 Cu 污染空间变异的协同克里格分析[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(5): 865 - 870.
SUN Bo, SONG Ge, CAO Raodong. CoKriging analysis of spatial variability of Cu pollution in paddy soils in a hilly region[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2009, 28(5): 865 - 870. (in Chinese)
[25] CHAPLOT V, DARBOUX F, BOURENNANE H, et al. Accuracy of interpolation techniques for the derivation of digital elevation models in relation to landform types and data density[J]. Geomorphology, 2006, 77(1 - 2): 126 - 141.
[26] YAMAMOTO J K. Correcting the smoothing effect of ordinary Kriging estimates[J]. Mathematical Geology, 2005, 37(1): 69 - 94.