

DOI: 10.20103/j.stxb.202404300975

周浩, 覃湘, 马泉来, 胡贤辉. 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. 生态学报, 2024, 44(17): 7604-7614.

Zhou H, Qin X, Ma Q L, Hu X H. 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. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(17): 7604-7614.

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

周 浩¹, 覃 湘¹, 马泉来², 胡贤辉^{1,*}

1 湖南师范大学地理科学学院, 长沙 410081

2 河南省资源环境调查一院, 郑州 450007

摘要: 科学评估我国典型粮食主产区耕地的潜在水分条件状况, 继而“以水定地”实现耕地空间重构布局, 对保障国家粮食安全、促进农业高质量发展具有重要现实意义。以河南沿黄的原阳县等 6 个产粮大县为研究区, 从作物种植视角出发, 基于耕地及作物分布数据、MODIS 数据和长时间序列气象数据, 通过构建区域遥感蒸散模型和水分平衡评价模型, 精准揭示当地水分平衡状况及耕地利用下水分平衡效应, 进而构建多智能体空间优化配置模型来实现耕地作物种植的空间重构。结果表明: (1) 沿黄 6 县耕地面积占土地总面积的比例持续下降, 其中 2020 年冬小麦和夏玉米播种面积分别占耕地总面积的 74.75% 和 48.91%, 种植模式以玉米小麦轮作为主, 夏玉米单一型耕地分布零散且对应田块规模偏小; (2) 地表蒸散量与有效降水量的时空错位引致当地水分平衡状态存在较大差异, 全境缺水且水分亏缺量呈东北高、西南低的分布规律, 应依据作物水分平衡态势的空间差异进行差别化灌溉管理; (3) 耕地空间重构表现出明显的空间尺度性效应, 且县域尺度的优化结果优于单一整体尺度, 在保障粮食安全前提下, 重构后的冬小麦和夏玉米水分亏缺情势均得到一定程度缓解, 田块的空间积聚性和连片性更加有利于作物日常灌溉管理。河南沿黄区需大力推行“以水定地”耕地空间重构战略, 以缓解耕地用水压力、促进农业可持续发展。

关键词: 耕地; 作物; 水分平衡; 以水定地; 粮食安全

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

ZHOU Hao¹, QIN Xiang¹, MA Quanlai², HU Xianhui^{1,*}

1 School of Geographical Sciences, Hunan Normal University, Changsha 410081, China

2 The First Institute of Resources and Environment Investigation of Henan Province, Zhengzhou 450007, China

Abstract: The moisture condition is one of the primary influencing factors in grain production. Scientifically assessing the potential moisture conditions of cultivated lands in China's typical grain-producing regions and subsequently implementing “water-oriented land use” for spatial restructuring hold significant practical importance for ensuring national food security and promoting high-quality agricultural development. The Yellow River region in Henan Province serves as both a core area for ecological protection and high-quality development within the Yellow River Basin, and as a typical area in Henan facing resource scarcity, particularly water. The mismatch between long-term water supply and agricultural production scale has led to severe issues of water overexploitation in the area. Against this backdrop, this study focuses on six major grain-producing counties including Yuanyang County, Fengqiu County, and Yanjin County in the Yellow River region of Henan. From the

基金项目: 国家自然科学基金青年项目 (42301300); 湖南省自然科学基金项目 (2024JJ5263); 河南省豫地科技集团重点科研项目 (JTZDKY202404); 河南省重点研发与推广专项项目 (222102320299)

收稿日期: 2023-04-30; 采用日期: 2024-08-02

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hxh66698@hunnu.edu.cn

perspective of crop cultivation, using data on land use, crop distribution, MODIS data, and long-term meteorological data, the study constructs regional remote sensing evapotranspiration models and water balance evaluation models. These models accurately reveal local water balance conditions and the effects of water balance under cultivated land use. This approach aims to develop multi-agent spatial optimization models to achieve spatial restructuring of crop planting on cultivated land. The results indicate: (1) The proportion of cultivated land in the six counties along the Yellow River is decreasing, with winter wheat and summer maize planting areas in 2020 accounting for 74.75% and 48.91% of total cultivated land, respectively. Crop rotation of maize and wheat dominates, with scattered distribution of summer maize and smaller field sizes; (2) Temporal and spatial disparities between surface evapotranspiration and effective precipitation result in significant differences in local water balance. The entire region faces water scarcity, with higher water deficits in the northeast and lower deficits in the southwest. Differential irrigation management is recommended based on spatial variations in crop water balance, especially in southwestern Yuanyang County, Hua County, and Puyang County; (3) Integrating considerations of cultivated land water balance and scale aggregation benefits, the study proposes spatial restructuring of crop planting. Results show significant spatial scale effects of land restructuring, with county-level optimization outperforming uniform approaches. Post-restructuring, water deficits for winter wheat and summer maize are alleviated to some extent, enhancing the spatial aggregation and contiguity of fields for improved daily crop irrigation management. Henan's Yellow River region should actively implement the “water-oriented land use” strategy for cultivated land spatial restructuring to alleviate water use pressure and promote sustainable agricultural development.

Key Words: cultivated land; crops; moisture balance; water settling land; food safety

破解区域水资源配置与农业生产不相适应的矛盾,是我国长期以来农业发展面临的重大战略问题^[1-2]。2021年10月,习近平在黄河流域生态保护和高质量发展座谈会上强调,要“把水资源作为最大的刚性约束”,以可用水量来决定城市发展布局、耕地种植结构、生活用水习惯、生产用水方式,形成“以水定城、以水定地、以水定人、以水定产”的社会经济发展格局。黄河干流河南段流经的沿黄区,既是河南省推动黄河流域生态保护和高质量发展战略核心区,又是国家主粮供应重点战略区和集中连片区^[3-5]。同时该区也属河南最典型的资源性缺水地区,长期以来的水资源供应与农业生产规模错位,导致当地出现了较为严峻的水资源超载开发利用问题^[6]。在此背景下,科学评估其潜在水分条件状况,继而实现耕地“以水定地”空间重构布局,对保障国家粮食安全、促进农业高质量发展具有重要现实意义。

耕地空间重构是一项以空间优化为基础,涉及水分条件、粮食生产、耕作田块等多种要素的耕地再次布局过程^[7]。耕地利用下的水分平衡条件评估,为耕地“以水定地”空间重构提供了基础数据支撑。当前,相关研究主要集中在:(1)耕地水分平衡评估方面,学者已从宏微观尺度产出了诸多研究成果^[8-9],一类是基于各县市社会经济统计年鉴及公报、田间试验数据等,通过构建宏观尺度上的水分供需平衡及水土匹配指数等模型,以测度区域水分或水资源供需特点,但评估结果难以揭示单元内部状况的时空差异^[10-11];二是基于气象监测、遥感影像等数据,遵循农业干旱评价思路,从农田土壤、作物或气候水分平衡等角度,来微观探究内部水分供需差异^[12-14]。然而,考虑到作物种植结构改变是耕地利用内部或子系统变化的重要表征,或换言之耕地的作物种植为耕地利用的最主要体现形式之一^[7],从作物种植视角出发,探究耕地水分平衡态势及其空间重构或优化问题的研究并不多见;(2)空间优化或重构上,相关研究多侧重于单一要素(水资源)属性与耕地调整效益的交互作用,以指导耕地资源配置^[15],或是注重多要素协同作用下的耕地种植结构优化^[12]。值得注意的是,耕地“以水定地”空间重构的关键目的在于通过对耕地水分平衡态势评估基础上,来实现耕地差别化和统一化管理,但如 CLUE-S 模型、FLUS 模型、CA-Markov 模型等传统耕地空间优化配置模型未充分考虑支配耕地用途转变的主体行为,由此导致优化结果易出现凌乱和破碎状态^[16-17]。近年来,智能体 (Agent) 模型已广泛应用于地理及资源决策领域^[18],该系列模型可设定不同类型决策者的相异行为模式,并通过观察大量资源

要素主体之间的相互作用,以及充分考虑资源要素的自组织性和利益决策过程来精准实现要素空间优化配置^[12,16],而耕地的“以水定地”空间重构布局,正是针对不同微观水土要素进行宏观空间决策的过程。

原阳县、封丘县等 6 个县(以下简称“沿黄 6 县”)位于河南沿黄的粮食生产核心区,是河南粮食产量最高的县域集中片区(图 1)。长期以来大规模耕地种植及农业灌溉管理,使得当地水资源处于严重超载状态,并引致一系列如土壤肥力下降、板结盐渍化、地面沉降等次生环境问题^[1]。因此,本文将从作物种植视角出发,基于耕地及作物分布数据、MODIS 数据等,通过构建区域遥感蒸散模型和水分平衡评价模型,来准确揭示当地水分平衡状况及耕地利用下水分平衡效应,进而依据 Agent 模型原理构建的空间优化配置模型(AgentLA)并顾及空间尺度性效应,“以水定地”实现耕地的空间重构。

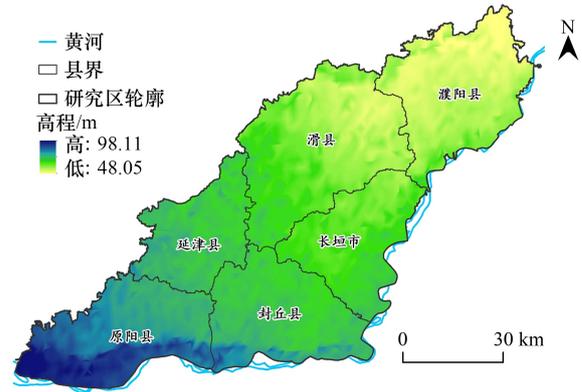


图 1 研究区地理位置示意图

Fig.1 Location of research areas

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

沿黄 6 县包括豫北平原东部的原阳县、封丘县、延津县、长垣市、滑县和濮阳县,总面积 7657.15 km²。沿黄 6 县为典型的温带大陆性季风气候区,冬季寒冷雨雪少、春季干旱,汛期(6—9 月)降水占到全年总量的 60%—70%。该地耕地分布广、连片集中度高,主要耕种类型为小麦和玉米,但人均水资源量仅为河南平均水平的 64.5%、全国的 13.7%^[19],水资源偏少而农业耗水量过高的现实,导致当地已成为我国最典型的资源性缺水地区。为确保粮食生产,当地多依赖开采浅层地下水来满足农业灌溉需求,由此造成地下水严重超采,并已成为河南省最集中的地下水超采区。因此,在相对较小的时空尺度,该地在耕地水分平衡态势研究及其空间重构上具有显著的地域特色和代表性。

1.2 数据来源

主要数据源包括耕地及主要粮食作物数据、MODIS 数据和气象及其他数据:(1)耕地利用数据的信息源来自 Landsat 遥感影像(2000 年和 2010 年采用 TM 影像产品,2020 年为 OLI/TIRS),在大气校正、几何纠正等预处理基础上,进行标准假彩色融合以实现耕地人机交互式目视解译,然后通过实地 GPS 信息样点的比对验证和记录,结合后期室内数据纠正,完成耕地解译数据的精度验证(图 2)^[19]。粮食(冬小麦和夏玉米)作物分布数据来自国家生态科学数据中心(<http://www.nesdc.org.cn/>),该系列数据采用基于时间权重的动态时间规划方法,通过比较已知作物田块和未知地物类型的季节变化曲线的相似程度,得出 30 m 分辨率的作物分布状况,并经过野外调查样本实现数据验证(作物总体精度 89.88%);(2)MODIS 系列数据(2000—2020 年)包括 Albedo 产品(MCD43B3,1 d)、LST 和 Emis 产品(MOD11A2,1 d)、LAI 产品(MCD15A2,8 d),对数据进行拼接、投影与数据格式转换、裁剪、空间范围缺值插补和时间序列缺值插补等处理^[11],同时对分析时段汇总后的数据进行二次地理空间插值,以保证空间分辨率和时间分辨率的一致性;(3)气象数据包括 2000—2020 年研究区及周边 26 个地面基准气象站点的气温、降水、风速、湿度等逐日观测数据,数据来自国家气象数据共享中心(<http://data.cma.cn/>)^[20],对各站点的逐日气象要素数据进行汇总,利用 ArcGIS 10.5 地统计学模块进行点状气候要素的 IDW 插值处理。其他基础地理信息数据包括研究区 2020 年行政区划矢量数据和 DEM 数据(分辨率 30 m),对其进行投影变换和重采样预处理。

1.3 研究方法

基于遥感(MODIS)和常规气象数据来反演逐日(2000—2020 年)潜在蒸散量,继而实现地表常年实际蒸

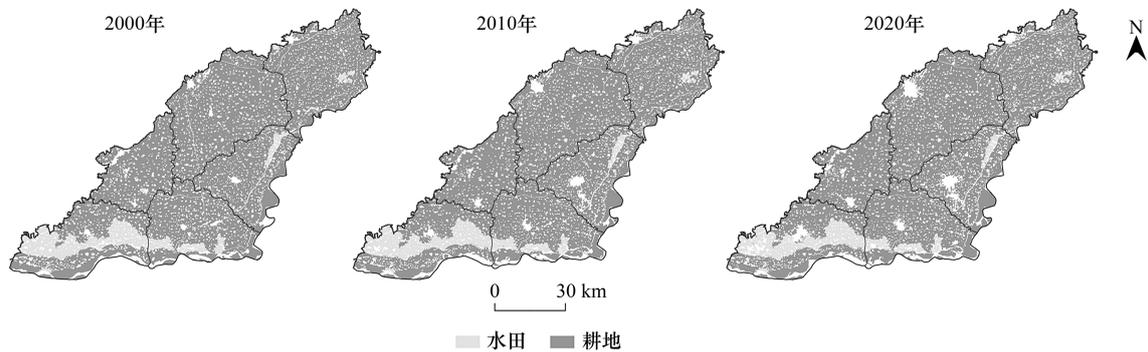


图 2 2020 年河南沿黄 6 县耕地分布图

Fig.2 Distribution maps of cultivated land in 6 counties along the Yellow River in Henan Province in 2020

散信息估算,然后通过构建水分平衡评价模型,从作物种植视角来定量评估耕地水分平衡效应;在粮食安全前提下,综合权衡不同作物种植田块的常年水分平衡状况以及田块的空间集聚效益,采用依据 Agent 模型原理构建的空间优化配置模型并顾及空间尺度性效应,对比县域单元和单一整体模拟尺度优化结果的优劣性,最终实现“以水定地”耕地空间重构。

1.3.1 逐日潜在蒸散量遥感估算

准确地遥感反演逐日潜在蒸散量是水分平衡研究基础。一是 Priestley-Taylor 公式^[21]为常用的无平流条件下潜在蒸散量计算方法,具有物理概念明确、算法简单的优势,选用该方法作为逐日潜在蒸散量遥感反演的基础机制;二是由 Priestley-Taylor 公式反演得到的逐日潜在蒸散量为对应卫星过境时刻瞬时潜在蒸散量,需经时间尺度转换才能得到逐日潜在蒸散量。考虑到一天中瞬时潜在蒸散量变化具有正弦变化特点,本文将采用正弦曲线拟合的方法,实现瞬时潜在蒸散量向逐日潜在蒸散量的转换,公式如下:

$$E_{T0} = \int_{t_{rise}}^{t_{set}} E_{T0}(t) dt = \int_{t_{rise}}^{t_{set}} E_{T0_max} \sin \left[\left(\frac{t - (t_{rise} + 1)}{t_{set} - t_{rise} - 2} \right) \pi \right] dt \quad (1)$$

式中, E_{T0} 为逐日潜在蒸散量,mm; E_{T0_max} 为日最大瞬时潜在蒸散量,mm; t 为具体模拟时刻; t_{set} 和 t_{rise} 分别为日落和日出时间,对应着净辐射值变为负和变为正的时间,可结合当地纬度数据以及具体日期进行计算。

1.3.2 耕地水分平衡评价模型

耕地的水分平衡态势实质反映着水分的供给与需求的余缺规律。综合考虑有效降水量以及地表实际蒸散量关系,将有效降水量视作供水指标,地表实际蒸散量视作需水指标,来构建耕地水分平衡模型。其中有效降水量为天然降水实际补充到耕层土壤中能被作物有效利用的部分。本文利用美国农业部土壤保持局(USDA-SCS)推荐的有效降水量计算方法来进行计算,该方法已得到了很多学者的证明,且在类似地区获得较好应用^[1];地表实际蒸散量与潜在蒸散量间存在正比或者互补的关系,考虑到沿黄 6 县为典型温带大陆性季风区,下垫面和降水量是影响地表实际蒸散的关键因素,因此,选用基于水量平衡法推导出的傅抱璞公式^[22]以实现地表实际蒸散量的估算,公式如下:

$$E_T/P_e = 1 + E_{T0}/P_e - [1 + (E_{T0}/P_e)^m]^{1/m} \quad (2)$$

式中, E_T 为实际蒸散量,mm; P_e 为有效降水量,mm; 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 值小,反之透水性好、植被覆盖度高、地势平坦的地区地表径流小, m 值大。沿黄 6 县属平原地带,下垫面条件较好,参考相关学者研究^[23],将 m 统一取值为 2.5。在此基础上,构建水分平衡指数(C_{WPLI})模型,以反映耕地水分有效供给量与实际需求量之间的供给余缺情况,公式如下:

$$C_{WPLI} = D/E_T = (P_e - E_T)/E_T \quad (3)$$

式中, D 为 P_e 与 E_T 差值, 即水分平衡量, mm/d, 其量值大小反映了水分平衡状况。当 $D > 0$ mm/d, 水分盈余; $D < 0$ mm/d, 水分亏缺; $D = 0$ mm/d, 水分收支平衡。

1.3.3 耕地作物种植“以水定地”空间重构

依据智能体 Agent 原理构建的空间优化配置模型 (AgentLA), 通过对所有 Agent 自适应优化, 能够最大化顾及优化对象的适宜性以及优化格局的紧凑性、连片性需求, 以制定最终的最优布局模式^[16]。基于研究区显著的气候干旱环境特征, 以水分平衡指数作为耕地空间重构依据, 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, 构建 AgentLA 模型以实现不同空间模拟尺度 (县域尺度和单一整体尺度) 的耕地作物种植“以水定地”空间重构。

运行该模型时, 随机位置的智能体群由空间单元尺度所决定 (本文设置为 100 m × 100 m), 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来确定移动合理性, 进而选择最优的空间布局。迭代过程中, 智能体会根据自身搜索位置搜集多个空间位置的信息, 然后利用个体的适应度函数 f 评价该位置并找出最佳的位置, 进而与当前的位置比较来确定是否移动。在所有智能体完成决策后所形成的格局将通过另外一个函数 F (位于 0—1 之间, F 值越高则优化效果越好) 进行评价, 当其数据波动小于预设的阈值时, 将停止迭代并输出结果, 最终确定最优的配置方案, 公式如下:

$$f = w_v v + w_c c \quad (4)$$

$$c = \sum_{i \in \Omega} x_i \exp(-d_i/\gamma) / \sum_{i \in \Omega} \exp(-d_i/\gamma) \quad (5)$$

$$F = SV - SL \quad (6)$$

$$SV = \sum_{i=1}^n v_i / V_{\text{MaxSum}} \quad (7)$$

$$SL = (L_{\text{Sum}} - L_{\text{MinSum}}) / (L_{\text{MaxSum}} - L_{\text{MinSum}}) \quad (8)$$

式中, w_v 和 w_c 分别代表耕地水分平衡指数和 c 的权重指数, $w_v + w_c = 1$ 。 c 为空间效率值, 用耕地集中连片程度表示, 它促使智能体空间聚集; x_i 为二分变量, 当聚类中某一位置被智能体占据时取值为 1, 反之为 0; Ω 表示智能体的摩尔邻域 (Moore Neighborhood); d_i 是邻域内的智能体 i 到中心智能体的欧氏距离; γ 为一个取值范围 [1, 10] 的补偿系数; SV 为衡量重构结果条件下耕地水分平衡状态指标的实现程度; SL 反映重构结果的形态特征, 以此来评价其破碎程度; n 为智能体个数; V_{MaxSum} 是水分盈余用地单元的指数总和; L_{Sum} 表示实际模拟结果的周长; L_{MinSum} 为整体格局最紧凑时的周长; L_{MaxSum} 为假设全部智能体孤立存在、互不相邻时布局的整体周长。 SV 的增加或者 SL 的减小可以提高格局的优化程度。

2 结果与分析

2.1 耕地利用变化分析

沿黄 6 县作为河南核心粮食产区和国家重要商品粮基地之一, 耕地作物种植范围广、强度大, 主要体现在: (1) 受城市化工业化进程影响, 耕地面积占土地总面积的比例持续下降, 由 2000 年的 81.46% 降至 2020 年的 79.34%, 其中各年份旱地占耕地总面积的比例均超过 90% (如 2020 年旱地面积占比为 92.06%), 分布极其广泛, 而水田由于灌溉耗水量大, 集中分布在近邻黄河的原阳县和封丘县等地 (图 2); (2) 该地属传统冬小麦主产区, 2020 年冬小麦播种面积占到耕地总面积的 74.75%, 滑县播种面积更是占该县耕地总面积的 88.03%。夏玉米仅占耕地总面积的 48.91%, 其中封丘县的夏玉米种植范围较广, 播种比例达到了 60.80%, 而原阳县仅为 23.97% (图 3); (3) 种植模式主要包括夏玉米单一型、冬小麦单一型、玉米小麦轮作型和其他种植型共四种类型。2020 年玉米小麦轮作型为最主要的种植模式, 面积占耕地总面积的 45.57%, 对应耕地利用率高、农户种植积极性大, 主要分布于封丘、延津等地。冬小麦单一型表征着农户仅种植冬小麦而不种植其他粮食作物, 其对应耕地面积比例达到 28.71%。但由于该种植行为属隐形非粮化行为, 当地政府需尽量采取政策引导、农补等措施来引导农户实施主粮轮作, 以保障国家粮食供应安全。另需指出的是, 夏玉米单一型耕地面积比例

仅为 3.01%,空间分布零散且对应田块规模偏小,主要原因在于相对冬小麦等其他粮食作物而言,夏玉米全生育期偏短,以粮食种植为主要收入来源的农户将田块闲置过长时间的意愿较低,且其种植受田块规模影响较小,由此导致除部分田间地块外,当地较少有农户在耕地上实施单一夏玉米种植行为。

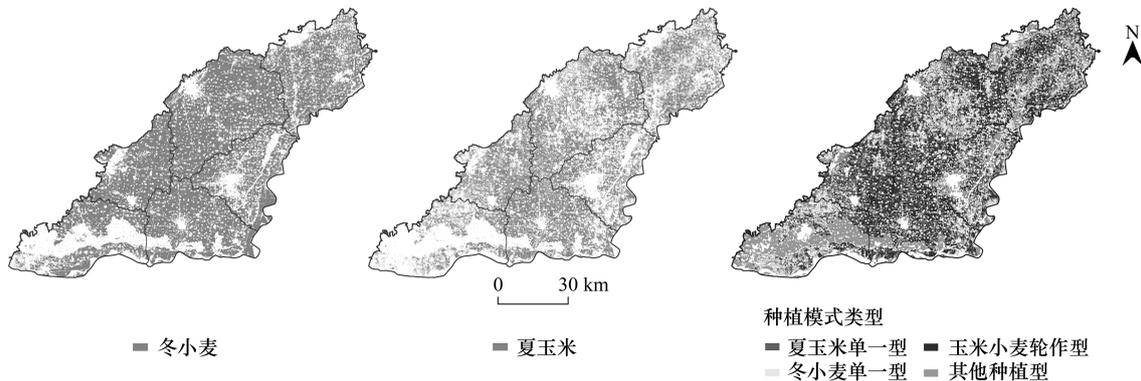


图 3 2020 年河南沿黄 6 县耕地种植及模式分布图

Fig.3 Distribution map of cultivated land planting system in 6 counties along the Yellow River in Henan Province in 2020

2.2 水分平衡评价结果分析

2.2.1 蒸散量与有效降水量分析

2000—2020 年,沿黄 6 县常年潜在蒸散范围为 323.64—1226.3 mm,高值区主要位于滑县、长垣市、濮阳县以及原阳县西南角等地,潜在蒸散量普遍高于 1100 mm,低值区则主要分布在中部的延津县、封丘县和原阳县,团聚性分布特征较为明显;地表实际蒸散量为当地作物种植的主要耗水源,其蒸散范围为 346.92—622.82 mm,高值区主要分布在濮阳县西部以及原阳县西南角,对应的作物种植需水量高,低值区则零散分布在原阳县中部、延津县西部等地,但整体分布差异偏小;有效降水量为耕地作物种植的主要供水来源,研究区有效降水较少且偏均质分布,多年平均有效降水量处于 208.54—238.56 mm 之间,相对高值区主要位于原阳县西南角以及封丘县的东部。值得一提的是,下垫面条件、土壤类型乃至地下水的分布差异能够影响地表实际蒸散能力,进而改变着区域耕地作物种植的水分平衡态势,如沿黄 6 县中原阳县、封丘县和长垣市等地毗邻黄河,土壤类型以带状潮土为主,通气透水性大,导致其蒸散能力偏强,而濮阳县、滑县和延津县的土壤类型多为棕壤,蓄水能力较好,由此导致蒸散能力偏弱,耕地需水量偏少。总之,受气候、地表下垫面、土壤等因素差异影响,沿黄 6 县各地区地表蒸散能力存在一定区别,并由此导致地表蒸散量与有效降水量存在一定程度的时空错位(图 4)。

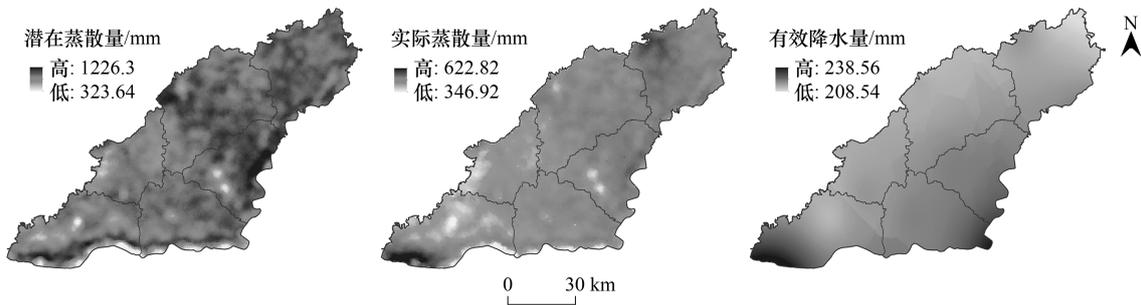


图 4 2000—2020 年河南沿黄 6 县平均蒸散量与有效降水量分布图

Fig.4 Distribution maps of average evapotranspiration and effective precipitation in 6 counties along the Yellow River in Henan Province from 2000 to 2020

2.2.2 水分平衡态势分析

天然降水已不能满足沿黄 6 县的耕地种植需求,需通过抽取地下水或渠道引水以保证农作物正常生长发育(图 5)。从常年水分平衡量来看,全境耕地均处于水分亏缺状态(平衡均值为 -324.21 mm),亏缺量呈东北高而西南低的分布特点,原阳县南部、封丘县、滑县东部以及濮阳县的水分亏缺量处于较高水平,耕地灌溉压力较大,延津县以及滑县的西部、原阳县中北部的的水分亏缺量偏小。然而,由于沿黄 6 县的环境要素差异较小,且各年份的盈亏水平存在一定互补性,由此导致水分平衡量的内部差异较小。同时,原阳县西南部以及东北部滑县、濮阳县等地的平衡指数均处于较低水平,对应灌溉需求较大,应依据不同地区的耕地缺水状况进行差别化灌溉管理,特别是对于原阳县西南部、滑县、濮阳等地而言,应特别保障其耕地灌溉用水需求;作物种植方面,由于水分在空间上的盈亏互补性,使得除其它种植型外,作物及其对应种植模式的水分平衡均值处于同一水平,平衡量和平衡指数分别为 -356 mm 和 -0.60 ,但各作物及其种植模式的内部水分条件存在较大差异,需通过以水定地来重构当地耕地作物种植格局。

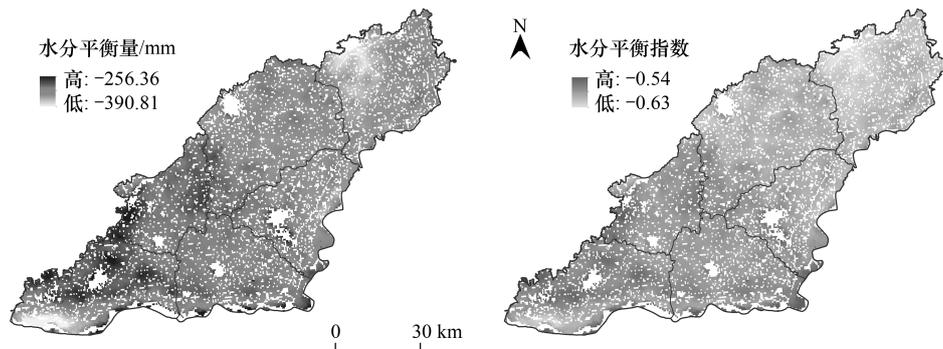


图 5 2000—2020 年河南沿黄 6 县平均耕地水分平衡状态分布图

Fig.5 Distribution maps of average cultivated land moisture balance in 6 counties along the Yellow River in Henan Province from 2000 to 2020

2.3 耕地作物种植“以水定地”空间重构

2.3.1 作物空间重构结果分析

为应对季节性干旱、缺水问题,提高耕地作物种植的适水性,在综合考虑耕地作物种植田块的水分平衡性和空间集聚效率基础上,实现沿黄 6 县的作物空间重构:(1)重构过程需预设各作物的优化数量目标,在保障粮食产量不下降前提下,将优化数量目标设置为基期年所对应的作物数量。在此基础上,通过对水分平衡指数的标准化处理以及对作物分布数据的重采样处理,来预设智能体数量,即待优化作物的栅格数量(冬小麦和夏玉米分别为 450713 个和 294891 个)。考虑到水分平衡指数权重 w_p 的取值对 F 函数有较大影响,即影响到最终重构结果,因此需预先进行 w_p 检验以得到最佳配置结果。经过多次参数调试,冬小麦和夏玉米的水分平衡指数权重 w_p 均在 0.7—0.8 之间时, F 函数值最大(表 1),表明在此区间时的重构结果最佳,因此确定 w_p 为 0.75;(2)考虑到重构过程的空间尺度性效应,采用 Kappa 系数(即优化后对应作物保留区的面积比例)分别对单一整体和县域单元尺度的模拟结果进行优劣对比。结果显示,县域单元尺度的模拟结果明显优于单一整体尺度。对于单一整体尺度而言,冬小麦优化后的 Kappa 系数为 66.58%,即通过重构后 33.42% 面积比例的冬小麦将出现空间调整,夏玉米优化后的 Kappa 系数仅为 44.18%。而对于县域单元模拟结果而言,21.80% 的冬小麦将出现空间调整,对应 Kappa 系数达到 78.20%,夏玉米重构后的 Kappa 系数也达到了 64.02%。因此,本文将选用县域单元尺度进行最终的耕地作物种植“以水定地”空间重构。

沿黄 6 县作物经空间重构后,与当前水分平衡状态表现出较高的空间适配性(图 6)。重构后的冬小麦水分亏缺均值为 322.19 mm,亏缺量显著小于重构前的 356.01 mm,且平衡指数均值也由重构前的 -0.60 增至重

构后的-0.59,因此,可认为经 AgentLA 模型重构后,各县域冬小麦的水分亏缺情形将能得到显著缓解。但值得注意的是,由于冬小麦覆盖范围广,重构后的水分平衡高低值差额仍维持在较高水平;夏玉米重构后的水分平衡状态也得到了较好缓解,其亏缺均值为 319.95 mm,显著小于重构前的 356.35 mm,平衡指数更是增长至 -0.58。相对于冬小麦而言,沿黄 6 县的夏玉米分布更为零散,优化模型在综合权衡夏玉米水分平衡状态和空间集聚性基础上,将夏玉米水分平衡范围由-373.80—-265.81 mm 调整至-349.17—-256.36 mm,水分平衡高低值的差更大,但与之对应的是夏玉米分布零散性劣势能够得到较好缓解。

表 1 运用 AgentLA 模型重构作物布局的关键试验参数

Table 1 Optimize key experimental parameters for crop layout using the AgentLA model

实验参数 Experimental parameters		耕地水分平衡指数的权重系数 Weight coefficient of cultivated land moisture balance index								
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
冬小麦	迭代次数/次	103	87	79	99	62	110	97	107	71
Winter wheat	F 值	0.9438	0.8128	0.8526	0.9398	0.9180	0.9365	0.9597	0.9496	0.9339
夏玉米	迭代次数/次	124	95	84	104	92	115	121	110	107
Summer maize	F 值	0.9061	0.9154	0.8209	0.8736	0.9355	0.9156	0.9488	0.9577	0.9273

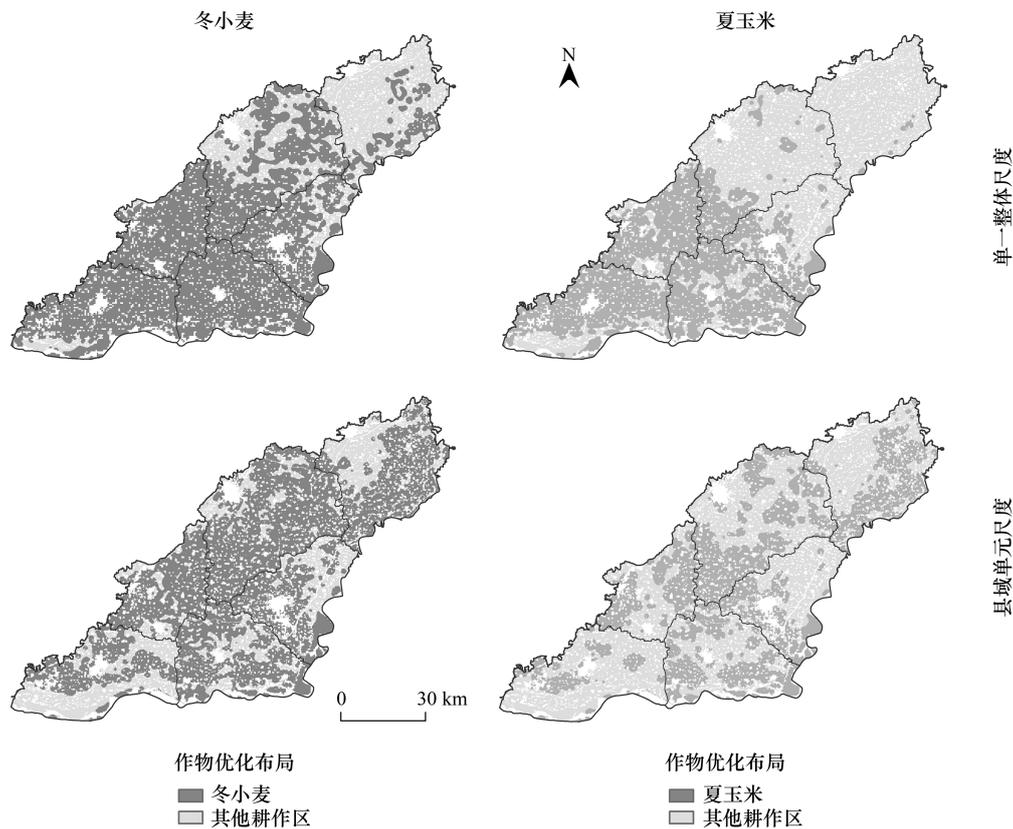


图 6 基于 AgentLA 模型的河南沿黄 6 县作物优化布局图

Fig.6 Crop optimization layout maps of 6 counties along the Yellow River in Henan Province based on AgentLA model

2.3.2 种植模式重构分析

经种植模式重构,单一型作物模式所对应的耕地将显著萎缩,其中冬小麦单一型的面积比例减少 6.78 个百分点,由重构前的 28.71%减至 21.94%,空间积聚性以及连片性特征显著增强。从种植模式调整来看,冬小麦单一型的流入用地主要为轮作型,其对应面积占耕地总面积的 10.51%,流出用地也主要为轮作型和其他型,二者面积比例依次是 12.47%和 10.03%;夏玉米单一型耕地分布零散且对应的田块规模偏小,不利于农业

生产经营管理,经空间重构,其所对应的耕地面积比例将由 3.09%变为 0.04%,同时分析其流出源可知,夏玉米单一型绝大部分流出为其他种植型和轮作型;轮作型为当地农业生产管理最主要的耕作类型,对应耕地利用率高、农户种植积极性大,当地政府需努力强化生产经营管理效率,缓解自然水分亏缺态势。经空间重构,其所对应的耕地呈缓慢萎缩态势,相对面积比例由重构前的 45.57%降至 41.94%,空间上该种植模式将重构聚集于水分条件相对优良的地区,空间团聚性和连片性特征显著增强,同时从模式调整来看,主要流出模式为其他型和冬小麦单一型,流入型也绝大部分为冬小麦单一型和其他型;其他耕作型所对应的耕地利用形式更加丰富,可进行水稻以及其他农副产品的种植,经空间重构其所对应的耕地显著扩张,相对面积比例由重构前的 22.63%增至 36.08%,在原阳县、长垣市和濮阳县的连片性、团聚性分布特征尤为显著,主要流入类型为冬小麦(图 7)。

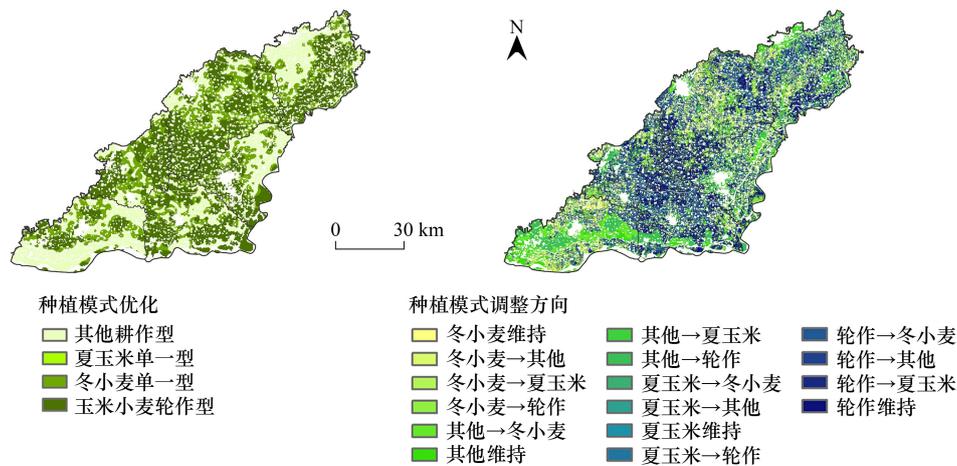


图 7 基于 AgentLA 模型的河南沿黄 6 县作物种植模式优化图

Fig.7 Optimization maps of crop planting patterns in 6 counties along the Yellow River in Henan Province based on the AgentLA model

综上,沿黄 6 县耕地作物种植的水分平衡态势严峻,当地政府需采取“以水定产,量水而行”的措施,在保障粮食安全前提下,开展耕地重构布局并制定更为科学的农业生产经营管理办法,并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平衡目标的区域农业可持续利用战略。研究表明,AgentLA 模型能够充分权衡作物水分平衡状态和田块规模积聚效益,作物重构结果既能保证粮食产量供应安全(总粮食作物种植面积不减少),又能进一步减轻耕地灌溉用水压力,同时空间的积聚性和连片性更加有利于作物日常灌溉管理。另需指出的是,由于沿黄 6 县的水分平衡状况不同,导致各县市的调整模式存在差异,如对于毗邻黄河干流的原阳县而言,水分条件相对较好,因此在原有的作物布局基础上,其适水调控幅度较大,面积调整比例将达到 60.55%,主要的调整类型为其其他种植型→轮作型和冬小麦型→轮作型(图 7),而封丘县的水分条件处于适中水平,种植模式适水调控需求较小,全县调整比例为 49.66%。研究充分揭示了河南沿黄典型粮食主产区的水分平衡需求状况以及后续种植调控方向,可为沿黄 6 县乃至整个河南沿黄区耕地布局调整以及农业可持续发展提供理论支持。

3 讨论与结论

3.1 讨论

水资源短缺及其时空分布不均是我国基本国情,对于水分“紧平衡”或“失衡”区而言,科学地种植模式调整及实现“以水定地”耕地空间重构,是促进农业节水、水分条件平衡和耕地休养生息的重要途径^[24-26]。各地政府在下达种植结构调整指标时往往难以精准兼顾水土资源禀赋内部差异、粮食供需和田块形态等实际情况,导致出现了如作物需水错配,空间管理效率差和种植规模不合理等次生问题^[27-29]。基于以上背景,本文

从作物种植视角出发,立足于耕地科学管理的目标,基于有效降水量与地表实际蒸散量来科学评估河南沿黄典型粮食主产区常年水分平衡状况及耕地利用下水分平衡效应,进而综合考虑水分平衡态势和耕作田块规模的积聚效益来实现耕地空间重构。需指出的是,尽管本文在顾及空间尺度性效应后,通过对比单一整体和县域单元尺度的模拟结果优劣性,确定了县域单元的耕地空间重构优化路径,但从最终重构结果来看,各县的作物种植模式调整幅度均较大,种植模式调整幅度最小的封丘县也达到了 49.66%。由此可见,作为我国最典型的资源性缺水地区,河南沿黄粮食主产区“以水定地”耕地空间重构的潜在需求大。后续可继续尝试细化优化单元,从更小层次的村镇管理单元出发,来更为精准地实现整个地区的作物种植优化布局。

蒸散量是水分平衡测算的关键数据,对其准确估算需要大量的气象要素数据及其它参数资料。本文基于遥感(MODIS)和常规气象数据来反演逐日潜在蒸散量,然后采用傅抱璞公式来估算实际蒸散信息^[30-31]。然而,一方面通常认为农田的实际蒸散量与土壤水分供给乃至养分供给有关,而土壤水分供给与地下水埋深是否有通过毛管补充以及灌水定额有关,另一方面,农田实际蒸散能力也与种植制度以及产量水平有关,不同地区的耕作制度、产量水平不同,其农田实际蒸散量也存在差别,因此相关研究可尝试在明晰区域地下水、灌溉情况数据乃至产量水平基础上,明晰基于地学条件与地表覆盖特征分析的土地生态系统水分运行特点,进而提出基于地学条件的种植制度和耕地作物种植空间布局优化建议。

3.2 结论

从作物种植视角出发,通过构建区域遥感蒸散模型和水分平衡评价模型,精准揭示沿黄 6 县水分平衡状况及耕地利用下水分平衡效应,进而构建多智能体空间优化配置模型来“以水定地”实现耕地作物种植的空间重构。结果表明:(1)沿黄 6 县耕地面积占土地总面积的比例持续下降,至 2020 年该比例已降到 79.34%,其中各年份旱地占耕地总面积的比例均超过 90%,而从种植制度来看,以玉米小麦轮作状态的模式分布面积最广,占耕地总面积的 45.57%,冬小麦单一型也占到 28.71%,夏玉米单一型耕地空间分布极为分散且对应田块规模偏小;(2)地表蒸散量与有效降水量存在一定程度的时空错位情形,由此导致水分平衡状态存在较大差异。研究区全境处于水分亏缺状态,且整体呈东北高而西南低的分布特点,应依据不同地区的作物缺水状况进行差别化灌溉管理,特别是对于原阳县西南部、滑县、濮阳等地而言,应特别保障其作物灌溉用水需求;(3)综合考虑耕地水分平衡态势和规模积聚效益对研究区耕地作物种植进行空间重构,可以发现耕地空间重构表现出明显的空间尺度性效应,且县域尺度的优化结果显著优于单一整体。经县域尺度耕地空间重构后,当地冬小麦和夏玉米的水分亏缺情势均得到一定程度缓解,重构结果既能保证粮食供应安全,又能进一步减轻农业用水压力,同时耕作田块的空间积聚性和连片性更加有利于作物种植以及日常灌溉管理。本文科学揭示了整个沿黄 6 县的水分平衡态势以及后续种植调控方向,可为该地区乃至整个河南沿黄区耕地的“以水定产,量水而行”以及农业可持续发展提供理论支持。

参考文献(References):

- [1] 周浩,马泉来,杨崇科,万小强,曹艳杰. 基于 MODIS 的沿黄粮食主产区耕地利用水分盈亏特征分析. 农业工程学报, 2023, 39(7): 119-127.
- [2] 路中,雷国平,郭晶鹏,王居午,马鑫鹏,李松泽. 松嫩平原北部黑土区水土资源平衡效应研究. 中国土地科学, 2018, 32(3): 59-67.
- [3] 陈帅,侯孟阳,李园园,邓元杰,姚顺波. 黄河流域水资源、能源与粮食生产的时空匹配及阻尼效应. 农业工程学报, 2022, 38(18): 246-254.
- [4] 陈美景,王庆日,白中科,谢立军,张冰松,郝森. 黄河流域资源型城市土地利用转型及其对生态系统服务价值的影响. 生态学报, 2023, 43(22): 9459-9470.
- [5] 王乐,朱求安,张江,刘佳,朱超凡,瞿莉莎. 黄河流域植被格局变化对水分利用效率的影响. 生态学报, 2023, 43(8): 3103-3115.
- [6] 白芳芳,齐学斌,乔冬梅,韩洋,赵宇龙,陆红飞. 黄河流域九省区农业水资源利用效率评价和障碍因子分析. 水土保持学报, 2022, 36(3): 146-152.
- [7] 宋戈,张红梅. 东北典型黑土区耕地轮作休耕的空间重构. 自然资源学报, 2022, 37(9): 2231-2246.
- [8] 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. 生态学报, 2023, 43(10): 4308-4318.

- [9] 杨宏轶, 赵华甫. 耕地结构变化下水土资源匹配时空特征效应分析——以黑龙江省为例. 自然资源学报, 2022, 37(9): 2247-2263.
- [10] 王佳月, 辛良杰, 戴尔阜. 中国典型山区农业水土资源匹配格局变化——以太行山区、横断山区、黔桂喀斯特山区为例. 地理研究, 2020, 39(8): 1879-1891.
- [11] Zhang S L, Yang X Y, Lovdahl L. Soil management practice effect on water balance of a dryland soil during fallow period on the Loess Plateau of China. *Soil and Water Research*, 2016, 11(1): 64-73.
- [12] 周浩, 马泉来, 邹朝晖. 挠力河流域水稻生育期水分供需特征研究. 地理科学, 2021, 41(3): 534-543.
- [13] 张金鑫, 葛均筑, 马玮, 丁在松, 王新兵, 李从锋, 周宝元, 赵明. 华北平原冬小麦-夏玉米种植体系周年水分高效利用研究进展. 作物学报, 2023, 49(4): 879-892.
- [14] 宿婷婷, 韩丙芳, 马红彬, 马非, 赵菲, 周瑶, 贾希洋. 水平沟整地措施对黄土丘陵区草原土壤水分动态平衡的影响. 农业工程学报, 2019, 35(21): 125-134.
- [15] Shi X Y, Zhao J, Jia H, Zhao J C, Lu J, Zhao M Y, Chu Q Q. Seeking sustainable pathway of crop production by optimizing planting structures and management practices from the perspective of water footprint. *Science of the Total Environment*, 2022, 843: 157091.
- [16] 周浩, 雷国平, 杨雪昕, 马庆, 金平. 基于 AgentLA 模型的农田精准灌溉管理分区研究. 水土保持学报, 2018, 32(1): 274-279, 285.
- [17] 马世发, 蔡玉梅, 念沛豪, 庄立. 土地利用规划模型研究综述. 中国土地科学, 2014, 28(3): 34-38, 51.
- [18] 刘耀林, 仝照民, 刘岁, 黄丹. 土地利用优化配置建模研究进展与展望. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(10): 1598-1614.
- [19] 杨崇科, 马泉来, 周浩, 万小强, 曹艳杰. 基于时序过程的沿黄粮食主产区土地利用分异研究. 农业机械学报, 2023, 54(8): 171-179.
- [20] 黄辉, 郑昌玲, 张劲松, 孟平. 1980—2019 年南太行地区气候变化趋势. 应用生态学报, 2022, 33(8): 2139-2145.
- [21] Priestley C H B, Taylor R J. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Review*, 1972, 100(2): 81-92.
- [22] 尹铎皓, 范云鹤, 周君华, 刘铁刚. 基于傅抱璞模型的岷江上游流域实际蒸散研究. 中国农村水利水电, 2016(2): 33-36.
- [23] 曹文旭, 张志强, 查同刚, 王盛萍, 郭军庭, 许行. 基于 Budyko 假设的潮河流域气候和植被变化对实际蒸散发的影响研究. 生态学报, 2018, 38(16): 5750-5758.
- [24] 黄峰, 杨晓琳, 方瑜, 王素芬, 康绍忠. 适应水土资源条件的华北地区农业种植布局研究. 中国工程科学, 2022, 24(5): 89-96.
- [25] 陈秧分, 王介勇, 张凤荣, 刘彦随, 成升魁, 朱晶, 司伟, 樊胜根, 顾善松, 胡冰川, 李先德, 于晓华. 全球化与粮食安全新格局. 自然资源学报, 2021, 36(6): 1362-1380.
- [26] 周浩. 挠力河流域耕地利用下水土资源平衡效应研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2022.
- [27] 戈大专, 龙花楼, 乔伟峰. 改革开放以来我国粮食生产转型分析及展望. 自然资源学报, 2019, 34(3): 658-670.
- [28] 陈展图, 杨庆媛. 中国耕地休耕制度基本框架构建. 中国人口·资源与环境, 2017, 27(12): 126-136.
- [29] Li Q F, Liu W, Du G M, Faye B, Wang H Y, Li Y K, Wang L, Qu S J. Spatiotemporal evolution of crop planting structure in the black soil region of Northeast China: a case study in Hailun County. *Land*, 2022, 11(6): 785.
- [30] 范云鹤, 尹铎皓, 周君华, 刘铁刚. 基于互补理论的岷江上游流域蒸散模型研究. 灌溉排水学报, 2015, 34(S2): 122-125.
- [31] 周浩, 金平, 夏卫生, 雷国平. 三江平原挠力河流域主要作物水分盈亏时空变化特征. 农业工程学报, 2020, 36(14): 159-166.