

基于 AgentLA 模型的农田精准灌溉管理分区研究

周浩, 雷国平, 杨雪昕, 马庆, 金平

(东北大学土地管理研究所, 沈阳 110169)

摘要: 依据农田水资源利用与土地资源开发的耦合特性, 开展农田精准灌溉管理分区研究, 划定需灌溉管控的农田利用对象区。以三江平原典型流域挠力河流域为研究区, 基于 Landsat OLI 影像、DEM 数据和气象台站等多源数据为基本信息源, 结合遥感和 GIS 技术定量探讨该流域农田水分盈亏状态, 最后利用多智能体的空间优化配置模型 (AgentLA) 划定出农田灌溉区。结果表明: 与常规的密度分割法相比, AgentLA 模型不仅考虑了农田水分盈亏状态, 也兼顾空间形态属性, 使得所划定的灌溉区既覆盖了高水分亏缺状态农田, 也具备较高的紧凑性, 避免其空间格局过于凌乱和破碎。模型运行结果显示, 在 20% 的农田灌溉目标面积下, 挠力河流域内 83.40% 的中度、99.86% 的重度、0.71% 的正常和 100% 的严重缺水的农田需进行灌溉管控。研究结果为农田精准化灌溉管理提供思路借鉴, 为相关学者研究提供基础。

关键词: AgentLA; 灌溉; 农田; 分区; 水分盈亏; 挠力河流域

中图分类号: S274 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2018)01-0274-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2018.01.043

Study on Precision Irrigation Management Zones in Farmland According Agent-based Model for Optimal Land Allocation

ZHOU Hao, LEI Guoping, YANG Xuexin, MA Qing, JIN Ping

(Institute of Land Management, Northeastern University, Shenyang 110169)

Abstract: Based on the coupling characteristics of farmland water utilization and land resource development, this study sought to define the precision irrigation management zones in farmland according agent-based model for optimal land allocation (AgentLA) in Naoli River Basin, and then determined the farmland utilization area with key irrigation control. All the above analysis used the Landsat Satellite images for OLI sensor, the DEM data and the long-term sequenced meteorological data as fundamental data resources. Remote sensing and GIS technology were used to study quantitatively the water profit and loss of farmland, and finally AgentLA model was utilized to delineate the key farmland irrigation area. The results showed that by comparing with the conventional density division method, AgentLA model not only considered the water profit and loss of farmland, but also took into account the spatial morphological properties, and the key irrigation zones defined by this mode covered the target area suffered high water deficit, had high compactness as well, meanwhile avoided the key irrigation area and its spatial pattern too messy and broken to carry out daily irrigation management. The model running results showed that when the irrigation area of the farmlands was 20% in Naoli River Basin, 83.40% of farmlands with moderate water deficit, 99.86% of farmlands with severe water deficit, 0.71% of normal farmlands and all farmlands with serious water deficit needed to be controlled by irrigation in the future. This study results could be used as references and consultancies for precision irrigation management in the Naoli River Basin, and provide the basis for related scholars.

Keywords: AgentLA; irrigation; farmland; zoning; moisture budget; Naoli River Basin

20 世纪后期以来, 我国北方干旱逐渐趋于常态化, 水资源被认为是该地区农业生产最主要环境限制

性因素^[1-3], 科学合理进行农田灌溉是保证粮食生产的先决条件^[4-5]。三江平原地区是我国重要的农作区

和粮食供应基地,地处中高纬度和欧亚大陆东端,属温带季风气候区,其增温幅度高于全球同期水平,年降水量呈略减少趋势^[6-7],近年来该地区逐渐进入降水减少和干旱多发阶段^[8-11]。受自然、政策以及经济利益的综合驱动影响,自 20 世纪 80 年代末期以来,当地政府大力推行旱改水的农业结构调整政策,大量易涝旱地转变为水田,水田扩张尤其剧烈^[12-14],旱地和水田的时空变化促使水分收支平衡发生改变。如何科学研究该地区农业水资源利用问题,合理地制定农田灌溉措施并保障农业的可持续发展,具有极强的紧迫性与现实性。

精准农业是当今世界农业发展的新潮流,通过在较精细的空间尺度上获取与农作物生长有关的空间分布信息,结合现代多源信息数据和模型技术,实现可视化背景下农田灌溉效益最佳的水分调控管理。农田精准灌溉管理将最大限度满足区域作物对水分的需求,根据农田作物缺水程度差异实现节水灌溉。依据水资源利用与土地资源开发的耦合特性,将同一地块划分为不同的均质性区域(管理分区)进行管理正成为精准农业的一个研究热点^[15-16]。尽管目前有多种方法进行管理分区定义,但最常用的方法还是聚类算法,如人工神经网络聚类算法^[17]、模糊 C-均值聚类法(FCM)^[18]、模糊 K-均值聚类法^[19]等,对空间位置信息考虑不足。另一方面,差别化和统一化管理是分区的关键目的,分区需避免凌乱和破碎状态,区片性是衡量分区结果好坏的重要指标之一。基于用地单元的农田灌溉管理分区归属于土地资源利用配置管理范畴,即:如何依据用地单元的水分盈亏特性将不同灌溉活动分配到合适的用地单元,这类问题往往因涉及到农田水分盈亏本底状态和形态特征(田块的紧凑性和连通性等)而变得十分复杂。在处理这些问题时,通常会在农田水分盈亏程度测度的基础上,得到栅格格式的农田水分盈亏程度图,但当灌溉目标为“确定一片连续的、合适的区域”进行灌溉管理,仅凭水分盈亏程度图易形成破碎、凌乱的空间格局,难以满足实际应用的要求。特别是对于三江平原地区,农业现代化程度高,灌区规模大而水资源供给保障程度十分有限^[20],在进行该地区农田精准灌溉时,需测度出农田潜在水土资源耦合状态,然后采用科学的分区算法避免分区目标的空间格局过于凌乱和破碎。传统土地利用配置模型(如系统动力学模型、CA 模型)对土地利用过程中支配用地类型转变的主体行为未予以考虑,而这种决策通常对土地利用类型转变具有决定性作用。随着人工智能科学和复杂理论的发展,智能体(Agent)模型在土地利用领域引起广泛重视^[21]。它克服了传统模型的局限性,在

为不同类型决策者设定相异行为模式的基础上,通过观察大量微观主体之间的相互作用来研究宏观土地利用变化过程,能够充分表达出土地利用类型的自组织性和不同利益主体的决策过程。

因此,本文在依据 Agent 模型原理构建的空间优化配置模型(AgentLA)基础上^[21-22],提出农田灌溉分区新思路,以三江平原腹地的挠力河流域为研究区,首先测度出该流域农田潜在水分盈亏状态,然后利用利用多智能体的空间优化配置模型(AgentLA)自动实现农田灌溉管理区的提取。研究可为挠力河流域乃至三江平原地区的农田灌溉提供新思路,为相关学者研究提供基础。

1 数据来源与研究方法

1.1 研究区域与数据

挠力河流域地处三江平原腹地(图 1),是我国重要的粮食垦区,域内共 7 个县(区),农区与垦区并存,易受国家政策制度影响。自 20 世纪 80 年代我国进入经济迅速发展时期后,流域当地出现了大量的湿地开垦为耕地、水利工程修建和农业结构调整等现象,导致湿地大面积丧失、结构破坏和功能退化,同时耕地的空间急剧扩张和水田结构比例持续上升使得农田需水量不断增加,挠力河流域水资源供需缺口越来越大,水分亏缺态势逐渐恶化^[20]。研究区富集了大量的自然、经济、政策制度等信息,具有显著的地域代表性和示范性。本文在挠力河农田水资源利用与土地资源开发的耦合状况评价的基础上,引入 Agent-LA 模型进行农田灌溉管理分区,以实现农田精准化管理,为流域灌溉策略的制定提供支持。

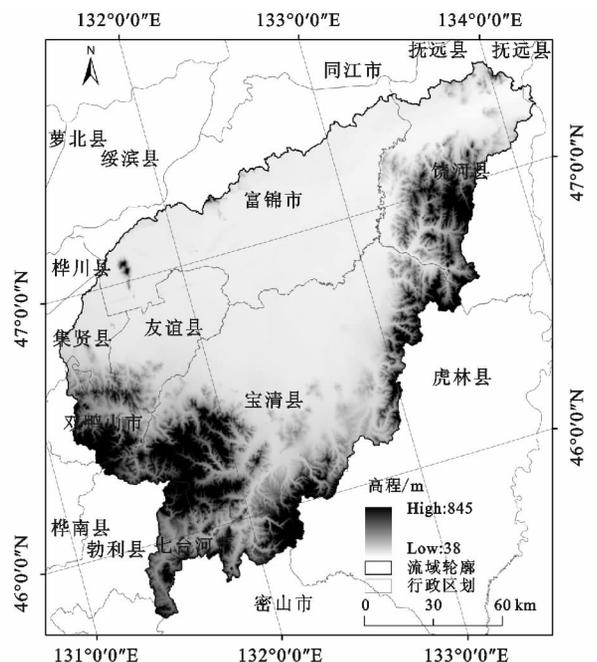


图 1 挠力河流域地理位置示意

本文选取美国陆地资源卫星 2015 年 Landsat OLI

的云量符合标准的耕作期影像为主要数据源,以谷歌地球数据为辅助数据源,影像数据在经过大气校正、几何纠正、图像增强等预处理的基础上,进行 543 波段的标准假彩色融合以便帮助区分旱地和水田,采取人机交互式目视解译方法完成耕地信息识别,最后依托野外实地采集样本点的方式,进行解译结果的验证、纠正,其中耕地的解译正确率为 89.20%;气象数据为流域周边 1971—2010 年共 14 个气象站点逐日观测数据,数据的来源、处理及验证已在前期研究进行了详细阐述^[20];基础地理空间数据源来自数字高程模型 (DEM),精度为 30 m,并利用 ArcGIS 10.2 得到各个栅格点的地理经度、地理纬度、高程和坡度等信息。

1.2 研究方法

1.2.1 农田水分盈亏程度评价

农田灌溉管理分区需预先确定用地单元的水资源与土地资源的耦合特性,可以通过农田水分盈亏程度评价实现该目标。蒸散是农作物生长期土壤主要的水分消耗,农田用水多通过蒸散进行消耗,作物的生理用水相对于蒸散量可忽略不计。农田需水量表征了农田作物需水的理想状态,倘若农田需水量过高而陆面实际蒸散量不足,作物将会出现缺水。本文基于农田作物实际和理想状态下的水分机理构建水分盈亏程度指数 MPLD (Moisture Profit and Loss Degree) 模型进行农田水分盈亏程度评价,计算公式为:

$$\text{MPLD} = \frac{W}{ET} = \frac{E_{\text{农}} - ET}{ET} \quad (1)$$

式中: W 为水分盈亏量 (mm); ET 为陆面实际蒸散量 (mm); $E_{\text{农}}$ 为农田需水量 (mm)。MPLD 值越高,农田水分亏缺问题越突出。

挠力河流域作物 (主要为玉米、大豆和水稻) 一年一熟,水稻面积比例高且蒸散量大,旱作物以天然降水灌溉为主,水稻生育期需水量 (540.7 mm) 显著大于旱作物生育期需水量 (小麦、玉米、大豆依次为 280, 420, 400 mm)。对于水稻而言,可将旱作物和非作物型植物蒸散量用旱作物需水量的平均值替代,根据前期研究推导出的农田需水量计算公式^[20],计算流域农田需水量,计算公式为:

$$E_{\text{农}} = (E_{\text{旱生}} + E_{\text{旱闲}}) \times (1 - \eta) + (E_{\text{水生}} + E_{\text{水闲}}) \times \eta + E_{\text{田间}} \quad (2)$$

式中: $E_{\text{旱生}}$ 和 $E_{\text{旱闲}}$ 为旱作物生育期和休闲期平均需水量 (mm); $E_{\text{水生}}$ 和 $E_{\text{水闲}}$ 为水稻生育期和休闲期平均需水量 (mm); η 为水稻种植比例系数; $E_{\text{田间}}$ 代表相关田间耗水项 (mm)。农作物生育期和休闲期需水量依据三江平原地表蒸发量实测成果、主要作物需水定

额数据和相关学者研究成果^[23]估算得到,田间耗水量主要根据地表径流耗水量进行估算,具体原理及计算过程已在前期研究中进行了详细阐述^[20]。本文采用 1 km × 1 km 大小网格进行旱地和水田的重采样处理,通过计算单个网格水稻种植比例系数 η , 最终得到挠力河流域空间化的农田需水数据。

挠力河流域长期实际蒸散量采用傅抱璞公式^[24]计算得到,计算公式为:

$$\frac{ET}{Q} = 1 + ET_0/Q - [1 + (ET_0/Q)^m]^{1/m} \quad (3)$$

式中: Q 为降水量 (mm); m 为表征下垫面透水性、植被状况和地形等特征的参数。流域农田大部分位于平原地带,下垫面条件较好,参考相关学者研究成果^[25-26],将其统一取值为 2.5; ET_0 为多年平均参考作物蒸散量 (mm/d), 利用 Penman-Monteith 公式^[20]计算得到。

1.2.2 运用 AgentLA 进行农田灌溉管理分区

AgentLA 将每个智能体视作一个独立的决策个体,它负责确定对应用地单元的空间位置,并通过循环迭代最终在空间上产生聚集而形成对应的空间配置方案。定义智能体在空间上的聚集斑块为聚类,处于聚类边界上的智能体为边界智能体,处于聚类内部的智能体为非边界智能体^[22]。AgentLA 开始运行时,会根据数据的分辨率和预设的空间配置面积产生对应数目的智能体,智能体的空间位置随机给出。迭代过程中,智能体会根据自己的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之后所形成的格局将通过另外一个函数 F 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 (图 2)。

本文兼顾用地单元的水分盈亏状态及其空间形态,将最终的优化目标确定为田块的水分盈亏状态和空间形态两部分,因此智能体的适应度函数 f 由 MPLD 指数和空间形态效益 c 构成,计算公式为:

$$f = w_{\text{MPLD}} \text{MPLD} + w_c c \quad (4)$$

式中: w_{MPLD} 和 w_c 分别表示 MPLD 和 c 的权重指数, $w_{\text{MPLD}} + w_c = 1$ 。MPLD 可通过农田水分盈亏程度图层获得, c 则由公式 (5) 确定,它促使智能体空间聚集。

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

式中: 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 是补偿系数,取值范围为 [1, 10]。

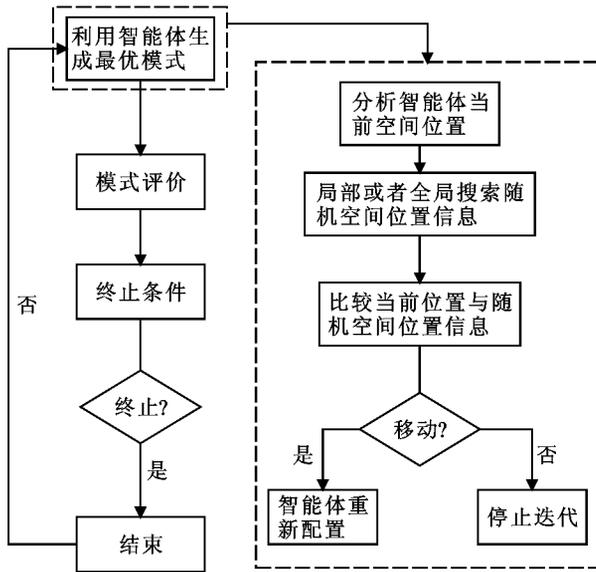


图 2 AgentLA 模型运行原理

智能体通过收集局部信息和全局信息移动到适应度值高的位置。局部信息指以当前位置为中心的领域位置信息,在该领域范围内找出适应度值最高的位置,用 $PosL$ 表示。然而仅仅依靠局部信息会使结果陷入局部最优,尤其是当输入的水分盈亏数据存在多个数值高峰区情形时,因此还需要全局信息来辅助智能体的决策。通常情况下,农田水分亏缺程度值高的地区,其邻近的单元程度值也比较高。因此在为智能体提供全局信息时,随机选择一个边界智能体并找出该边界智能体的邻域中适应度最高且保持当前空闲位置,用 $PosG$ 表示,比较 $PosL$ 和 $PosG$ 的适应度值的高低,较高者作为最终的目标位置 $PosT$ 。最后,若 $PosT$ 的适应度高于当前位置,通过公式(6)比较 $PosT$ 和当前位置的适应度差值与原地适应度值的情况,确定最终移动到目标位置的概率。

$$P = \exp(\Delta) / \exp(1) \quad (6)$$

式中: Δ 表示 $PosT$ 与当前位置的适应度差值。利用一个取值范围为 $[0, 1]$ 的随机数 r 作为指针,若 r 大于 P ,则智能体移动到目标位置;反之则驻留在原地。

每次迭代结束后由智能体聚集而成的格局,使用综合考虑农田水分盈亏状态和形态的函数 F (公式(7))评价分区的可行性,并认为二者具有同样的重要性。 F 值越高(取值范围 $[0, 1]$),则该分区效果越好。

$$F = SV - SL \quad (7)$$

$$SV = \sum_{i=1}^n v_i / V_{MaxSum} \quad (8)$$

$$SL = (L_{Sum} - L_{MinSum}) / (L_{MaxSum} - L_{MinSum}) \quad (9)$$

式中: n 为智能体个数; V_{MaxSum} 为高水分亏缺用地单元的指数总和; $\sum_{i=1}^n v_i$ 为模拟结果的盈亏程度指数总和; SV 用来衡量分区下 $MPLD$ 指标的实现程度; SL 反映分区结果的周长特征,以此来评价其破碎程度。在分区面积

给定的情况下,圆形是最紧凑、周长最短的形态。因此,根据灌溉管理分区的面积,可计算出当整体格局最紧凑时的周长 L_{MinSum} 。相反,当每个智能体都作为孤立智能体存在,整体格局的周长最长,用 L_{MaxSum} 来表示。 L_{Sum} 表示实际模拟结果的周长。简而言之, 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 农田水分盈亏程度分析

2.1.1 农田用地类型状况 20 世纪 90 年代以来,挠力河流域旱改水农业结构调整导致水田扩张极其剧烈,水田化系数(即水田占总耕地的面积比例)持续增加,至 2015 年水田面积达到 $5\,532.42 \text{ km}^2$,对应水田化系数为 35.51% 。相对于旱地而言,水田对坡度条件、灌溉保障程度等要素条件的要求较高,多分布于地势平坦和沟渠供水条件较好的地带,2015 年挠力河流域水田主要集中于 3 个地区:一是挠力河干流的下游北岸,该地区以国营农场(主要为七星农场、创业农场、红卫农场和胜利农场)为主,农业现代化程度较高;二是内外七星河流域的腹地以及友谊县境内,尽管该地区水田分布非常广,但水田的空间形态较为破碎,其行政管理属性主要为地方,家庭农场和农户个体为主要的水田管理对象,难以形成大规模的水田灌溉管理模式;三是挠力河干流的中段东岸,该地区的行政管理属性主要为八五二和八五三农场,坡度和灌溉保证程度的要素条件优越。挠力河流域旱地面积为 $10\,048 \text{ km}^2$ (占总耕地面积的 64.49%),主要集中于流域的南部平原地区和内七星河的上游周边地带,空间分布零散(图 3)。

2.1.2 农田水分盈亏程度评价结果 挠力河流域的水田需水量(657.70 mm)远大于旱地需水量(456.33 mm)^[20],当地大量低洼旱地改造为水田导致农田需水量急剧增加。依据公式(1)、公式(2)和公式(3),基于 ArcGIS 10.2 平台得到挠力河流域农田水分盈亏程度指数的栅格数据,依据前期研究成果^[20],划分出不同程度的水分盈亏状态:当 $MPLD \leq 0.15$ 时,表示流域农田水分满足程度为正常缺水;当 $0.15 < MPLD \leq 0.30$ 时,表示轻度缺水;当 $0.30 < MPLD \leq 0.45$ 时,表示中度缺水;当 $0.45 < MPLD \leq 0.60$ 时,表示重度缺水;当 $MPLD > 0.60$ 时,表示严重缺水,最终得到挠力河流域农田水分盈亏程度评价图(图 3)。

2015 年,挠力河流域的农田 $MPLD$ 指数范围为 $(-0.13) \sim 0.61$,平均值 0.13 ,尽管整体上该流域大部分农田处于正常缺水状态,但是仍有部分地区农田的水分亏缺处于极其严峻的状态,各水分盈亏评价等级的农田数量以及空间分布差异较大。处于正常

缺水状态的农田面积为 10 015.91 km², 占总面积的 64.28%; 其次为处于中度和重度缺水状态的农田, 分别表示了 在现有作物结构及水资源供给条件下, 存在中度和重度的缺水风险, 水分处于中度和重度亏缺状态, 二者面积依次为 2 243.32, 1 669.45 km², 面积占比分别为 41.40% 和 10.71%, 其中中度缺水区主要集中于 挠力河干流的东部和内、外七星河下游地区, 流域中部偏南地区也分布有少量的中度缺水区, 而重度缺水地区则主要集中于流域西部的内七星河地区; 处于轻度缺水状

态的农田面积为 1 650.21 km², 面积比例 10.59%, 主要分布于挠力河下游的北部地区, 农田存在轻度的缺水风险; 2015 年挠力河流域少量农田处于严重缺水状态, 其面积仅为 2.33 km², 占农田总面积的 0.01% (表 1)。

表 1 2015 年挠力河流域不同水分亏缺评价等级面积统计

指标	正常缺水	轻度缺水	中度缺水	重度缺水	严重缺水
面积/km ²	10015.91	1650.21	2243.32	1669.45	2.33
比例/%	64.28	10.59	14.40	10.71	0.01

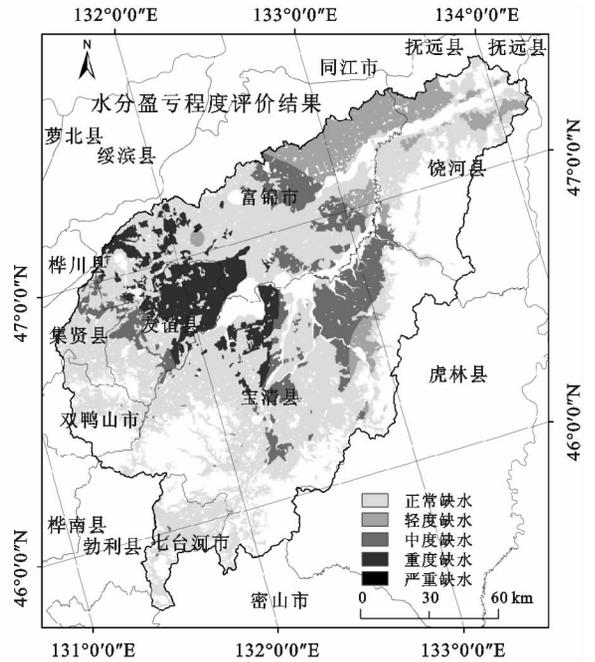
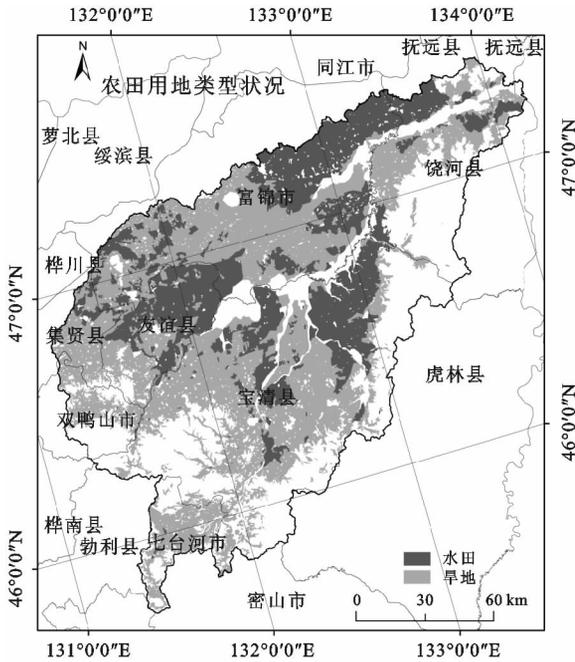


图 3 2015 年挠力河流域农田用地类型分布状况及水分盈亏状态的空间分布

2.2 农田灌溉管理分区结果

农田灌溉管理分区需预设目标区的面积, 本文以 试验区农田数量的 20% 为例, 运用 AgentLA 对不 同盈亏程度的农田进行迭代配置。考虑到权重 ω_{MPLD} 的取值对 F 函数值有较大影响, 即影响到最终分区

结果, 因此需预先进行 ω_{MPLD} 检验以得到最佳配置 结果。通过多次试验发现 (表 2), ω_{MPLD} 在 0.7~0.8 时 F 函数值达到最大, 表明 ω_{MPLD} 在此区间时优化结果 最佳, 因此确定 ω_{MPLD} 为 0.75, 最终生成挠力流域 农田灌溉管理分区图 (图 4)。

表 2 运用 AgentLA 模型进行挠力河流域灌溉管理分区的关键试验参数

参数	ω_{MPLD}								
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
迭代次数	184	130	118	148	92	177	139	178	106
F 值	0.9373	0.8072	0.8467	0.9333	0.9117	0.9301	0.9547	0.9431	0.9275

图 4 为采用常规密度分割法获取的农田灌溉区 (数量比例为 20%), 该分区方法依据农田水分盈亏 程度高低排序进行区域划分, 但分区结果仅考虑了农 田水分盈亏程度。进一步统计了两种方法的结果差异 发现 (表 3), 尽管依据盈亏程度高低划定的灌溉区 覆盖了具有最高水分亏缺特性的用地单元, 但斑块数 目过多 (169 个), 平均斑块面积和紧凑度低 (分别为 17.47 km² 和 0.22), 空间格局破碎。相反, 利用 AgentLA 得到的农田灌溉区斑块较少, 平均斑块面 积和紧凑度较高, 与密度分割法得到的结果相比, 更

加有利于农田的日常灌溉管理。

表 3 运用 AgentLA 模型与依据密度分割法的分区结果对比

计算方法	MPLD	斑块	平均斑块	紧凑度
	指数平均值	个数/个	面积/km ²	
AgentLA	0.43	86	34.37	0.26
密度分割法	0.45	169	17.47	0.22

基于 AgentLA 模型划分的挠力河流域农田灌溉管 理分区结果显示, 在灌溉 20% 的农田数量前提下, 83.40% 的中度缺水农田需进行灌溉管理, 约占总灌溉面 积的 44.26%; 在现有作物结构及水资源供给条件下, 重

度缺水农田存在非常大的水资源亏缺风险,同时该类型农田的集中连片度较高,大部分该类型农田需进行灌溉管理(占总重度缺水农田面积的 99.86%),占到总灌溉面积的 53.48%;挠力河流域境内的外七星河下游北岸

存在少量的严重缺水农田,该地区需全部进行灌溉管理;部分正常缺水农田周围环绕有大量的高水分亏缺状态的农田,易遭受同化作用而转变为高水分亏缺农田,约 0.71%的正常缺水农田需进行灌溉管理。

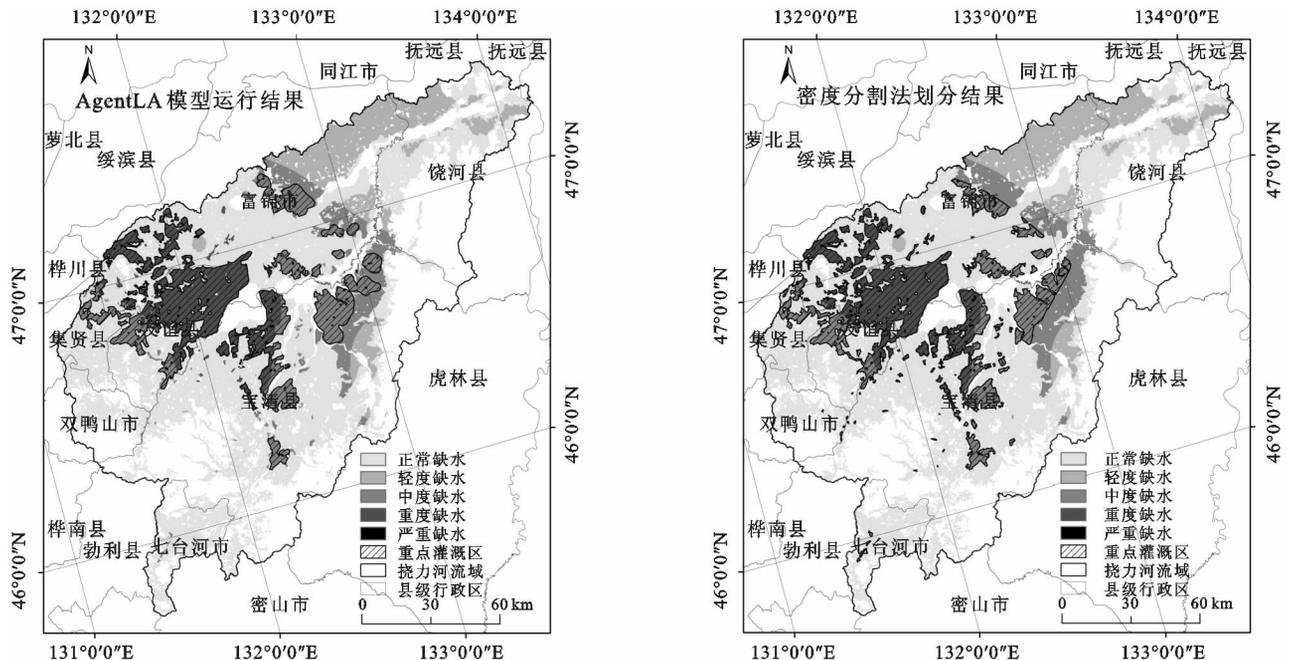


图 4 挠力河流域农田灌溉区域划分

3 结论

确保粮食安全是关乎国计民生的首要任务,而农田是粮食生产的基本载体。位于黑龙江省东北部的三江平原在保障我国粮食安全上起着巨大的作用。近三十年来,“气候—政策—开垦”的有机链促使该地区垦殖由南向北、由西向东不断推进,造成耕地大量扩张,水田化现象剧烈,导致当地农田需水量急剧增加,水分亏缺出现不同程度加剧情形,如何差别化的制定农田灌溉策略并实现农田灌溉管理分区具有重要的现实意义。本文提出农田灌溉分区的新思路,以三江平原腹地的挠力河流域为试验区,利用模拟、GIS 等手段,最终实现农田精准灌溉管理分区的目的。

首先利用多源数据,基于农田作物实际和理想状态下的水分机理构建水分盈亏程度评价模型进行流域农田水分盈亏程度评价,划分出正常、轻度、中度、重度和严重 5 种水分盈亏程度类型区,然后基于多智能体的空间优化配置模型(AgentLA)自动生成农田灌溉管理区。与常规的密度分割法相比,该模型不仅考虑农田水分盈亏程度状况,也兼顾了空间形态属性,使得所产生的灌溉管理区既覆盖了优质的农田,也具备较高的紧凑性,避免保护区空间格局过于凌乱和破碎而难以进行日常管理和维护。挠力河流域农田灌溉管理分区结果显示,在灌溉 20%的农田数量前提下,中度缺水区和重度缺水区是主要的农田灌溉管理对象区,二者分别总灌

溉面积的 44.26%和 53.48%。

参考文献:

- [1] 杨晓光,李茂松.中国南方季节性干旱特征及种植制度适应[M].北京:气象出版社,2014.
- [2] 严登华,翁白莎,王浩.区域干旱形成机制与风险应对[M].北京:科学出版社,2014.
- [3] 胡实,莫兴国,林忠辉.未来气候情景下我国北方地区干旱时空变化趋势[J].干旱区地理,2015,38(2):239-248.
- [4] 胡琦,潘学标,张丹,等.东北地区不同时间尺度下气温和无霜期的变化特征[J].中国农业气象,2015,36(1):1-8.
- [5] 刘彦随,甘红,张富刚.中国东北地区农业水土资源匹配格局[J].地理学报,2006,61(8):847-854.
- [6] 杨艳昭,张伟科,封志明,等.土地利用变化的水土资源平衡效应研究:以西辽河流域为例[J].自然资源学报,2013,28(3):437-449.
- [7] 高继卿,杨晓光,董朝阳,等.气候变化背景下中国北方干湿区降水资源变化特征分析[J].农业工程学报,2015,31(12):99-110.
- [8] 张耀存,张录军.东北气候和生态过渡区近 50 年来降水和温度概率分布特征变化[J].地理科学,2005,25(5):51-56.
- [9] 卢洪健,莫兴国,孟德娟,等.气候变化背景下东北地区气息干旱的时空演变特征[J].地理科学,2015,35(8):1051-1059.
- [10] 吴海燕,孙甜田,范作伟,等.东北地区主要粮食作物对气候变化的响应及其产量效应[J].农业资源与环境学报,2014,31(4):299-307.