

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.01.035.

黄淇, 牟凤云, 张用川, 等. 基于 ANN-CA 模型的重庆市多级流域耕地景观格局演化及预测[J]. 水土保持研究, 2023, 30(1): 379-387.

HUANG Qi, MOU Fengyun, ZHANG Yongchuan, et al. Evolution and Prediction of Cultivated Land Landscape Pattern in Multi-level Watershed of Chongqing Based on ANN-CA model [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(1): 379-387.

# 基于 ANN-CA 模型的重庆市多级流域耕地 景观格局演化及预测

黄淇<sup>1</sup>, 牟凤云<sup>1</sup>, 张用川<sup>1</sup>, 杨猛<sup>2</sup>, 陈林<sup>3</sup>, 王俊秀<sup>1</sup>, 田甜<sup>1</sup>, 何清芸<sup>1</sup>

(1.重庆交通大学 智慧城市学院, 重庆 400074;

2.重庆市勘测院, 重庆 400020; 3.重庆市地理信息和遥感应用中心, 重庆 401147)

**摘要:**为解决耕地演化的尺度效应问题,研究弥补现有不足,创新性地从多级流域尺度出发,基于 ANN-CA 模型对重庆市 2000—2030 年耕地景观格局演化进行模拟及预测,不仅为山区耕地的研究尺度提供新视角,且有助于解读重庆市耕地利用现状与趋势,为其耕地保护和规划提供参考。结果表明:(1) ANN-CA 模型的模拟结果精度达 89.33%,适用于模拟山区耕地演化研究;(2) 在城市扩张、退耕还林和耕地撂荒多重影响下,2000—2020 年重庆市耕地数量以先慢后快的速度由 40 640.87 km<sup>2</sup>下降至 38 590.33 km<sup>2</sup>,大部分转为城市建设用地,其次是林地、草地;(3) 一级流域下,2000—2020 年耕地规模均值由 0.519 缩减至 0.491,耕地破碎度均值由 0.217 上升至 0.233,耕地不规则度均值由 0.311 上升至 0.336,耕地聚集度均值由 0.657 下降至 0.620;(4) 二级流域下,2000—2020 年耕地规模均值由 0.492 下降至 0.470;耕地破碎度均值由 0.157 上升至 0.164;耕地不规则度均值由 0.302 上升至 0.311;耕地聚集度均值由 0.646 下降至 0.630。重庆市耕地景观格局大致与一级流域相契合,但呈现更精细的空间两极分化特征,“一区”与“两群”内耕地景观格局时空演化的历史规律与未来趋势差异显著。研究结果有助于对耕地进行多级流域尺度分析,破解耕地演化的尺度效应问题,对其演化规律进行跨尺度推绎。

**关键词:**多级流域尺度; 景观格局; 人工神经网络; 元胞自动机; 耕地

中图分类号:S284

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2023)01-0379-09

## Evolution and Prediction of Cultivated Land Landscape Pattern in Multi-level Watershed of Chongqing Based on ANN-CA model

HUANG Qi<sup>1</sup>, MOU Fengyun<sup>1</sup>, ZHANG Yongchuan<sup>1</sup>, YANG Meng<sup>2</sup>,

CHEN Lin<sup>3</sup>, WANG Junxiu<sup>1</sup>, TIAN Tian<sup>1</sup>, HE Qingyun<sup>1</sup>

(1. School of Smart City, Chongqing Jiaotong University,

Chongqing 400074, China; 2. Chongqing Survey Institute, Chongqing 400020, China;

3. Chongqing Geographic Information and Remote Sensing Application Center, Chongqing 401147, China)

**Abstract:** To solve the problem of scale effect of cultivated land evolution, this study made up for the existing shortcomings and innovatively starts from the multi-level watershed scale. The evolution of cultivated land landscape pattern in Chongqing from 2000 to 2030 was simulated and predicted based on Ann-ca model, which could not only provide a new perspective for the research scale of cultivated land in mountainous areas, but also help to interpret the current situation and trend of cultivated land utilization in Chongqing, and provide a reference for its cultivated land protection and planning. The results show that: (1) the accuracy of

收稿日期:2021-09-08

修回日期:2021-12-12

资助项目:重庆市自然科学基金面上项目(cstc2019jcyj-msxmX0626);国家重点研发计划项目(2019YFB2102502, 2019YFB2102503);重庆交通大学研究生科研创新项目(2022S0088)

第一作者:黄淇(1998—),女,重庆奉节人,硕士研究生,主要从事交通经济、国土资源遥感、3S 技术集成与应用。E-mail:422879032@qq.com

通信作者:牟凤云(1979—),女,山东高密人,博士,教授,主要从事交通经济、国土资源遥感、3S 技术集成与应用。E-mail:mfydsd@cqjtu.edu.cn

<http://stbcj.paperonce.org>

Ann-ca model is 89.33%, which is suitable for simulating the evolution of cultivated land in mountainous areas; (2) under the multiple impacts of urban expansion, conversion of farmland to forests, and farmland abandonment, from 2000 to 2020, the amount of cultivated land in Chongqing dropped from 40 640.87 km<sup>2</sup> to 38 590.33 km<sup>2</sup> at a first slow and then fast speed; most of the cultivated land was converted to urban construction land, followed by woodland, grassland; (3) in the first-class watershed, the scale of cultivated land decreased from 0.519 to 0.491, the fragmentation of cultivated land increased from 0.217 to 0.233, the irregularity of cultivated land increased from 0.311 to 0.336, and the aggregation of cultivated land decreased from 0.657 to 0.620; (4) in the secondary watershed, the average scale of cultivated land decreased from 0.492 to 0.470; the mean value of cultivated land fragmentation increased from 0.157 to 0.164; the mean value of cultivated land irregularity increased from 0.302 to 0.311; the mean value of cultivated land aggregation decreased from 0.646 to 0.630; the cultivated land landscape pattern in the secondary watershed was roughly consistent with that in the primary watershed, but presented more refined characteristics of spatial polarization; moreover, the historical law and future trend of temporal and spatial evolution of cultivated land landscape pattern in ‘one area’ and ‘two groups’ were significantly different. To sum up, the multi-level watershed scale analysis of cultivated land is helpful to solve the scale effect of cultivated land evolution and deduce its evolution law across scales.

**Keywords:** multilevel watershed scale; landscape pattern; artificial neural network; cellular automata; cultivated land

耕地是土地资源的重要组成部分,其数量和质量是国家粮食安全的基本保障,耕地变化研究一直是土地利用变化研究的热点之一。近年来,随着我国城市化进程的加速,城市建设用地与农业生产用地之间的矛盾逐渐突显,无序的城市蔓延不仅侵占耕地,减少耕地数量,还使耕地破碎化,降低耕地质量,破坏耕地生态。本研究对重庆市城市扩张背景下耕地景观格局进行时空演化及模拟预测分析,有助于解读重庆市耕地利用现状和未来趋势,为耕地保护与合理规划利用提供科学参考依据,同时为山区耕地的研究尺度提供新视角。

耕地研究往往基于土地利用研究,现阶段国内外土地利用研究已有较多成果。研究方法上,传统土地利用研究多基于历史土地利用数据,运用土地利用动态度、土地利用程度、土地利用转移矩阵等方法量化分析土地利用历史演化规律。近年来,土地利用模拟预测逐渐成为热点,常用模型包括马尔科夫(Marcov)模型<sup>[1]</sup>、元胞自动机(CA)模型<sup>[2]</sup>、CLUE-S模型<sup>[3]</sup>、系统动力学(SD)模型<sup>[4]</sup>等,然而运用单一模型进行土地利用模拟预测往往存在局限,如 Marcov 模型只能预测土地利用数量演化,CA 模型只能预测土地利用空间分布。因此,土地利用模拟预测逐渐从单一方法转向多方法融合,一些组合模型如 CA-Marcov 模型<sup>[5]</sup>、Marcov-CLUES 模型<sup>[6]</sup>、SD-MOP 模型<sup>[7]</sup>、FLUS<sup>[8-9]</sup>模型逐渐流行。黎夏等在 FLUS 模型基础上开发出地理模

拟优化系统(GeoSOS)<sup>[10]</sup>,以解决地理信息系统在过程分析时存在功能不足的难题,目前,GeoSOS 已广泛应用于土地利用变化<sup>[11]</sup>、城市扩张模拟<sup>[12]</sup>、城市开发边界识别<sup>[13]</sup>、城市发展规划<sup>[10]</sup>等地理模拟中,因此本研究基于 GeoSOS 中的 ANN-CA 模型<sup>[14]</sup>对重庆市耕地演化进行模拟预测。研究尺度上,不同空间尺度景观格局的变化过程不是截然分离的,也不是孤立封闭的,小尺度过程受大尺度过程制约,大尺度过程是小尺度景观格局变化及其相互作用累积的结果<sup>[15]</sup>,尺度问题已成为现代生态学的核心问题之一,多尺度空间格局分析是进行尺度效应分析和跨尺度推绎的基础<sup>[16]</sup>。耕地的演化亦随着时空尺度的缩放呈现出不同的规律,现有研究涉及尺度丰富,包括流域<sup>[17]</sup>、城市群<sup>[18]</sup>、省域<sup>[19]</sup>、市域<sup>[20]</sup>、县域<sup>[21]</sup>、镇域<sup>[22]</sup>等,但基于单一尺度揭示耕地演化规律往往受限于尺度效应问题,因此如何破解耕地演化的尺度效应问题成为一个难点。河流分布对农业生产影响重大,河流不仅可以为耕作提供肥沃土壤和灌溉水源,其径流的季节变化带来的水旱灾害也影响着耕作制度,而流域是对河流进行研究和治理的基本单元,不同流域的农业发展程度差异显著,因此流域尺度是研究耕地的重要视角。但现有基于多尺度的耕地景观格局研究多为基于多级行政区划尺度<sup>[23-24]</sup>,少有基于多级流域尺度。鉴于此,本研究创新性地从“一级流域”和“二级流域”两种尺度,对重庆市耕地景观格局展开研究。

综上所述,研究方法上,本研究基于 GeoSOS 已有的 ANN-CA 模型;研究尺度上,为了解决耕地演化的尺度效应问题,本研究创新性地从多级流域尺度出发,对重庆市耕地演化进行模拟预测。

# 1 研究区概况

重庆市位于我国四川盆地东部,境内地形由南北向长江河谷逐级递减,斜贯有巫山、七曜山、大娄山等山脉,渝东北、渝东南分别盘踞有大巴山、武陵山两座山脉,中部主要是以低山和丘陵相间排列的平行岭谷类型组合;境内水系密布,据《重庆市水系流域图》,重庆市一级流域主要包括:岷—沱江水系、嘉陵江水系、长江上渝干流水系、乌江水系、汉江水系、洞庭湖水系;又根据《重庆市国土空间总体规划(2021—2035 年)》,重庆市未来将构建市域“一区两群”协调发展国土空间格局,即主城都市区(包括中心城区和主城新

区)、渝东北三峡库区城镇群和渝东南武陵山区城镇群;截至 2019 年,全市农作物总播种面积 334.57 万  $\text{hm}^2$ ,其中粮食播种面积 199.93 万  $\text{hm}^2$ ,粮食总产量 107.5 万 t,农业总产值 139.75 亿元。综上,本文拟结合重庆市流域分布及最新国土空间规划分析其耕地演化规律及趋势。

# 2 数据及方法

## 2.1 数据获取及处理

本研究涉及的数据包括:(1) 土地利用数据:重庆市 2000 年、2010 年和 2020 年土地利用数据;(2) 适宜性图集数据:重庆市 DEM 栅格数据;重庆市河流、道路、铁路、居民地矢量数据;重庆市 2015 年人口、GDP、降雨量、气温、土壤类型栅格数据;(3) 基础地图数据:重庆市县界区划矢量数据、重庆市一级流域、二级流域矢量数据。以上数据来源见表 1。

表 1 研究数据来源及相关说明

类型	名称	分辨率	格式	来源
土地利用数据	全球地表覆盖数据	30 m	栅格	全国地理信息资源目录服务系统
	全国基础地理信息数据库	1 : 25 万	矢量	全国地理信息资源目录服务系统
	分省 DEM 数据	30 m	栅格	资源环境科学与数据中心
适宜性图集数据	中国 1980 年以来逐年年降水量、逐年年平均气温空间插值数据集	1 km	栅格	资源环境科学与数据中心
	中国 GDP、人口空间分布 km 网格数据集	1 km	栅格	资源环境科学与数据中心
	中国土壤数据集(v1.1)	1 km	栅格	国家青藏高原科学数据中心
	重庆县界数据集(2015 年)	1 : 100 万	矢量	国家地球系统科学数据中心
基础地图数据	中国一级、二级流域分级数据集	1 : 25 万	矢量	国家地球系统科学数据中心

本研究基于重庆市三期历史土地利用数据,首先运用 Fragstats 软件计算重庆市 2000 年、2010 年、2020 年在多级流域尺度下的耕地景观格局指数,从而对比分析重庆市 2000—2020 年在多级流域尺度下的耕地景观格局时空演化规律;再以重庆市 2000 年、2010 年和 2020 年的土地利用数据为历史样本,选取适宜性图集,结合 ArcGIS 软件和 GeoSOS for ArcGIS 插件,运用 ANN-CA 模型对重庆市 2030 年土地利用分布进行模拟预测,并在模拟的重庆市 2030 年土地利用分布预测图基础上,运用 Fragstats 软件计算重庆市 2030 年在多级流域尺度下的耕地景观格局指数,从而讨论研究重庆市未来 2020—2030 年耕地景观格局演化趋势。

## 2.2 研究方法

2.2.1 景观格局指数 耕地景观格局反映了大小、形状不一的耕地斑块在空间上的分布与组合规律。一方面,耕地景观格局的演化受自然环境和社会经济

等因素的综合影响,另一方面,耕地景观格局又可反映出农业生产和社会经济的进步。现代化农业背景下,农业规模化和农业机械化,耕地景观格局逐渐呈现出以下特征:(1) 耕地斑块内部趋于均质化,耕地内部的零星斑块(如草地、林地等)大量消失,田面平坦,形状规则;(2) 耕地廊道结构简单化,明渠被地下暗管、喷灌、滴灌、微灌等节水设施取代,狭窄的田间步道消失,取而代之的是适宜大型农机作业的宽型廊道。基于现代农业化背景下的耕地景观格局特征,结合已有研究的指标选取情况,本文从耕地规模、耕地破碎度、耕地不规则度、耕地聚集度 4 个角度出发,选取四项景观格局指数反映重庆市境内的耕地景观格局,其对应关系如表 2 所示。

2.2.2 ANN-CA 仿真模型 ANN-CA(Artificial-neural-network-based cellular automata)仿真模型即基于人工神经网络的元胞自动机仿真模型,该模型分

为训练和模拟两个阶段,训练阶段是基于历史土地利用数据的样本训练人工神经网络,获得网络权重值,从而挖掘土地利用类型之间的转换规则,模拟阶段是

运用元胞自动机算法对土地利用进行空间模拟,通过人工神经网络得到应转换的类型,判别当前栅格是否可以转换,达到终止条件结束模拟过程。

表 2 景观格局指数选取

表征对象	景观格局指数	公式	表征内容
耕地规模	斑块所占景观面积比例(PLAND)	$PLAND=A/S$	PLAND 为区域内耕地斑块在所有斑块中的面积占比,占比越大则耕地规模越大;A 为耕地斑块面积;S 为景观总面积
耕地破碎度	斑块密度(PD)	$PD=n/A$	$n$ 表示耕地斑块数量;A 表示耕地斑块面积;PD 值越大耕地越破碎
耕地不规则度	景观形状指数(LSI)	$LSI=E/2\sqrt{\pi A}$	$E$ 为耕地斑块边界的总长度;A 为耕地斑块面积;LSI 值越大则耕地形状越不规则越复杂
耕地聚集度	聚集度指数(AI)	$AI=[g/\max\rightarrow g]$	$g$ 为某耕地斑块的邻接耕地斑块数量,反映了耕地板块间的连通性,其值越大耕地斑块越聚集

计算公式:  
 $P(k,t,l)=(1+(\ln\gamma^a))\times P_{\text{ann}}(k,t,l)\times\Omega_k^l\times\text{con}(S_k^l)$   
式中:元胞  $k$  在时刻  $t$  时第  $l$  种土地利用类型转换概率=随机因素  $(1+(\ln\gamma^a))\times$  人工神经网络计算概率  $P_{\text{ann}}(k,t,l)\times$  邻域发展密度  $\Omega_k^l\times$  转换适宜性  $\text{con}(S_k^l)$ 。

基于以上原理,本文首先以 2000 年、2010 年土地利用分布图作为起始、终止数据,同时选取 12 个因子作为适宜性图集,提取重庆市 2000—2010 年各土地利用类型之间的转换规则,其中,设置抽样比例为 5%,邻域窗口大小为 7,模拟总转换量为 7 309 个栅格单元,模拟迭代次数为 100 次,每次迭代转换量为 73 个栅格单元,扩散系数为 1,转换阈值为 0.9,模拟得到重庆市 2020 年土地利用分布图,将其与从 GlobeLand 30 提取的重庆市 2020 年土地利用分布图进行对比,模拟精度达到 89.33%,Kappa 系数达 0.82,证明 ANN\_CA 模型适用于重庆市土地利用演化仿真,且可靠性较高,由此推知,ANN\_CA 模型可用于预测重庆市境内耕地时空演化。

在此基础上,以 2010 年、2020 年土地利用分布图作为起始、终止数据,根据《重庆市土地利用总体规划(2006—2020 年)》中的《重庆市耕地和基本农田重点保护区图(2006—2020 年)》,将其耕地和基本农田重点保护区内的 17 个区县作为限制区,限制其境内耕地向其他用地类型转换,模拟得到重庆市 2030 年土地利用分布预测图,从而预测重庆市 2020—2030 年耕地景观格局时空演化趋势。

3 结果与分析

3.1 重庆市耕地转入转出情况分析

2000 年、2010 年、2020 年重庆市耕地面积分别约为

40 640.87 km<sup>2</sup>, 40 618.32 km<sup>2</sup>, 38 590.33 km<sup>2</sup>; 2000—2010 年,耕地转出约 2 660.67 km<sup>2</sup>,转入约 2 637.79 km<sup>2</sup>; 2010—2020 年,耕地转出约 4 742.73 km<sup>2</sup>,转入约 2 713.48 km<sup>2</sup>(图 1);总体而言,2000—2020 年,重庆市境内耕地数量总体上以先慢后快的速度呈现出下降趋势,分析原因如下:(1) 城市扩张是重庆市耕地数量下降的主要原因。2000—2020 年,重庆市境内城市建设用地呈现出不断扩张的趋势,尤其是作为主城区都市区内增长极的中心城区,因“极化效应”而扩张效果显著,又因“扩散效应”而带动其周围相对落后的主城新区城市建设用地不断扩张。此外,作为渝东北三峡库区城镇群、渝东南武陵山区城镇群各自的交通枢纽,万州区、黔江区的城市建设用地亦显著扩张。随着城市建设用地的大幅扩张,重庆市境内耕地被大量占用,尤其以主城区都市区内耕地被占用的现象最为严重,其次是两大城镇群的交通枢纽城市。(2) 退耕还林、耕地撂荒是重庆市耕地数量下降的次要原因。2000—2020 年,渝东北三峡库区和渝东南武陵山区范围内大量耕地转化为森林,长江上游水系内亦有少量耕地由于长时间撂荒而转化为草地和灌木地,由此可知,退耕还林和耕地撂荒也是重庆市耕地数量下降的不可忽视的因素之一。但在耕地占补平衡制度的制约下,渝东北三峡库区和渝东南武陵山区范围内又有大量森林在此期间被开垦转化为耕地以弥补耕地损失,因此重庆市 2000—2020 年耕地数量总体上虽有所下降,但始终维持在可控范围内。

3.2 重庆市多级流域耕地景观格局时空演化及模拟预测

3.2.1 一级流域耕地景观格局时空演化及模拟预测  
观察重庆市一级流域 2000—2030 年耕地景观格局

演化趋势(图 2),对重庆市一级流域耕地进行景观格局时空演化分析和模拟预测。

(1) 耕地规模。2000—2020 年,耕地规模总体上平均由 0.519 先微小扩张至 0.521 后大幅缩减至 0.491;排名上,各一级流域耕地规模排名稳定,始终

为:岷、沱江水系>嘉陵江水系>长江上渝干流区间>洞庭湖水系>乌江水系>汉江水系;据预测,未来 2020—2030 年耕地规模总体上将小幅缩减,其中以嘉陵江水系、长江上游水系和洞庭湖水系内耕地规模缩减较为显著。

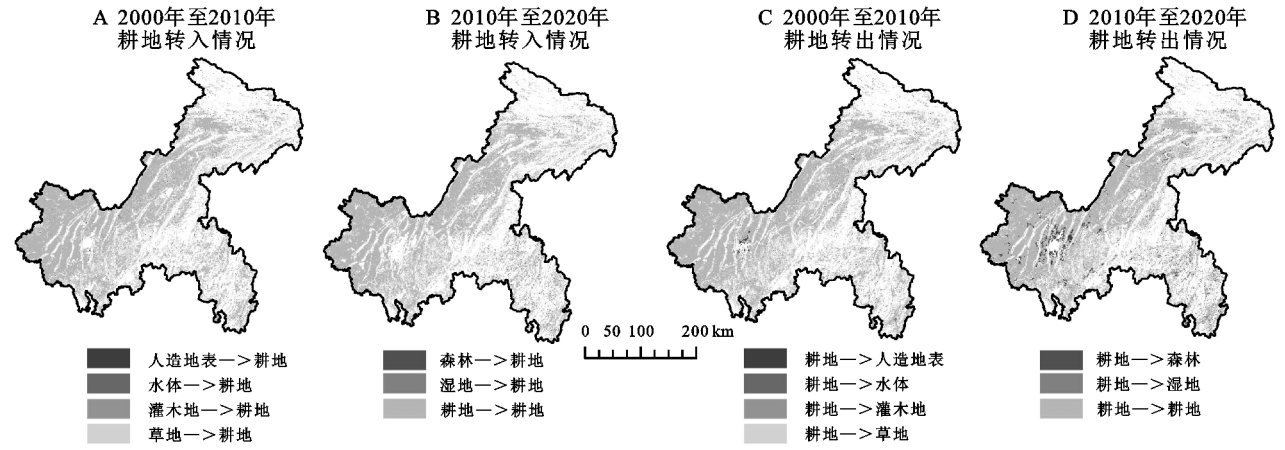


图 1 重庆市 2000—2020 年耕地转入转出情况

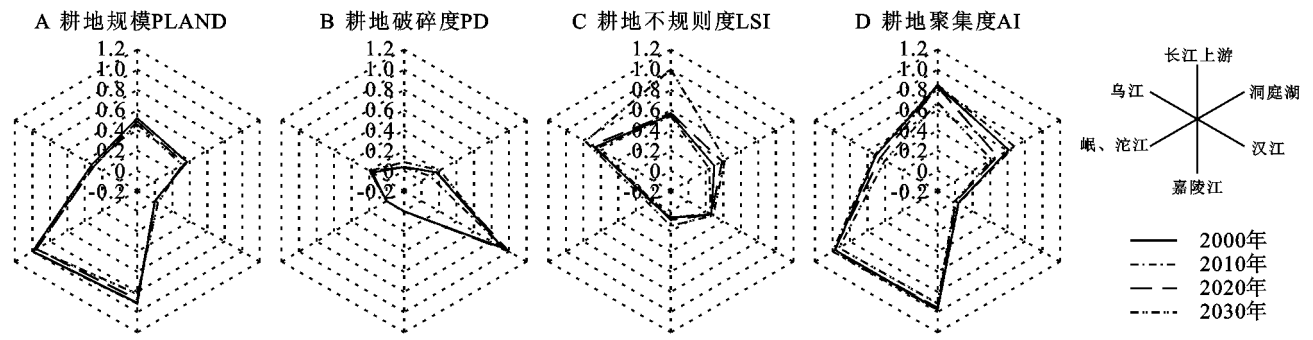


图 2 重庆市一级流域 2000—2030 年耕地景观格局演化趋势

(2) 耕地破碎度。2000—2020 年,耕地破碎度总体上平均由 0.217 先小幅下降至 0.209 后大幅上升至 0.233;排名上,2000 年各一级流域耕地破碎度排名为:汉江水系>洞庭湖水系>乌江水系>长江上渝干流区间>嘉陵江水系>岷、沱江水系,该排名在 2000—2020 年基本稳定不变,仅乌江水系耕地破碎度显著上升,超越洞庭湖水系;据预测,未来 2020—2030 年耕地斑块总体上将进一步破碎化,其中以长江上游水系、洞庭湖水系内耕地破碎化趋势较为显著,而汉江水系耕地破碎化现象将小幅减弱。

(3) 耕地不规则度。2000—2020 年,耕地不规则度总体上平均由 0.311 先小幅下降至 0.290 后大幅上升至 0.336,耕地形状总体上呈现出先规则化后复杂化的演化规律;排名上,2000 年各一级流域耕地不规则度排名为:乌江水系>长江上游水系>洞庭湖水系>汉江水系>嘉陵江水系>岷、沱江水系,该排名在 2000—2020 年基本稳定不变,仅洞庭湖水系与汉江水系排名交替变化;据预测,未来 2020—2030 年耕

地斑块总体上将进一步复杂化,尤其以长江上游水系最为显著,其后依次是嘉陵江水系、岷沱江水系、乌江水系、洞庭湖水系和汉江水系。

(4) 耕地聚集度。2000—2020 年,耕地聚集度总体上平均由 0.657 先上升至 0.677 后下降至 0.620,耕地斑块总体上呈现出先聚集后离散的演化规律;排名上,2000 年各一级流域耕地聚集度排名为:嘉陵江水系>岷、沱江水系>长江上游水系>洞庭湖水系>汉江水系>乌江水系>汉江水系,该排名在 2000—2020 年基本稳定不变,仅岷、沱江水系排名超越嘉陵江水系;据预测,未来 2020—2030 年耕地斑块总体上将进一步分散化,其中以长江上游水系分散化趋势最为显著,其后依次是洞庭湖水系、岷沱江水系、嘉陵江水系、乌江水系和汉江水系。

3.2.2 二级流域耕地景观格局时空演化及模拟预测  
首先计算各二级流域耕地景观格局指数并制作箱线图(图 3),由箱线图可知,2000—2020 年,耕地规模均值由 0.492 上升至 0.494 又下降至 0.470;耕地破碎度

均值由 0.157 下降至 0.151 又上升至 0.164; 耕地不规则度均值由 0.302 下降至 0.300 又上升至 0.311; 耕地聚集度均值由 0.646 上升至 0.649 又下降至 0.630。再者对重庆市 2000—2030 年耕地景观格局演化进行分析, 二级流域尺度下的耕地景观格局总体上大致与一级流域尺度相照应, 但由于尺度进一步精细化, 耕地景观格局也呈现出更为精细的时空分异特征。

观察重庆市二级流域 2000—2030 年耕地景观格局空间分布(图 4), 可以发现: 二级流域视角下, 重庆市境内耕地景观格局大致以长江、小江为界呈现出显著的空间两极分化特征。由于长江以南、小江以北地区分布着大巴山、巫山、七曜山、大娄山以及武陵山等山脉, 山高坡陡、地形崎岖, 导致耕地斑块破碎化、形状不规则化, 不适宜大规模开垦耕地, 因此该地区的二级流域, 耕地破碎度和耕地不规则度相对较高, 耕地规模和耕地聚集度相对较低; 而长江以北、小江以南地区地形则相对平坦, 更适宜耕地规模化管理, 因此该地区的二级流域, 耕地破碎度和耕地不规则度相对较低, 耕地规模和耕地聚集度相对较高。

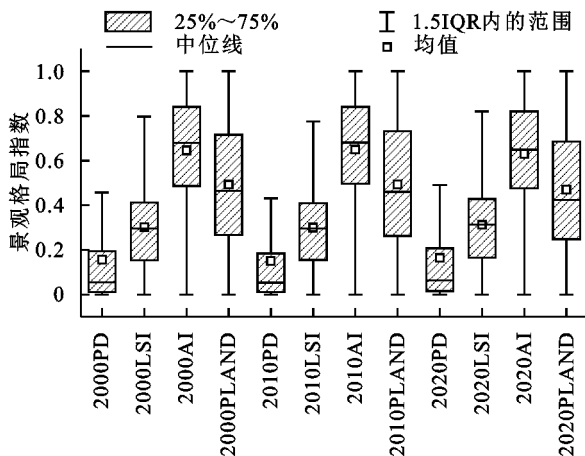


图3 重庆市二级流域 2000年、2010年和2020年耕地景观格局指数整体分布

进一步观察发现, 二级流域视角下: (1) 耕地规模、耕地聚集度与高程呈现出显著的负相关关系, 随高程的逐级上升而呈现出“阶梯型”逐级递减规律, 同时, 又以主城都市区的中心城区为中心沿其四周不断升高, 呈现出显著的圈层结构; 其中以涪江、琼江、平滩河、濑溪、淮远河、小安溪、梅江河等二级流域耕地最为聚集。(2) 耕地破碎度与高程呈现出显著的正相关关系, 随高程的逐级上升而呈现出“阶梯型”逐级递增规律, 以平均海拔最高的大巴山区内任河、州河、东溪河、后溪河等二级流域耕地破碎化最为严重, 以七曜山区内四步河、油草河、马家河、南滨河、龙河等二级流域耕地破碎化次为严重。(3) 耕地不规则度

与高程呈现出一定的正相关关系, 耕地随高程的上升而愈发不规则化, 同时与道路密度、河网密度、居民点密度呈现出负相关关系, 在道路、河网、居民点密集的区域耕地不规则化更为严重。由于长江上游水系、乌江水系、汉江水系和洞庭湖水系内支流繁多, 导致其二级流域内耕地形状大多十分复杂, 长江上游水系内耕地不规则化以长江南岸沿线二级流域最为严重, 汉江水系内耕地不规则化以彭溪沿线二级流域最为严重, 洞庭湖水系内耕地不规则化以酉水、梅江、平江、岑龙河沿线二级流域最为严重。

观察重庆市二级流域 2000—2030 年耕地景观格局空间变化趋势(图 5), 分析重庆市二级流域耕地景观格局在 2000—2020 年期间演化规律和 2020—2030 年演化趋势。

首先聚焦于重庆市主城都市区内的中心城区和主城新区, 2000—2020 年, 随着重庆市城市化进程的不断加速, 其境内城市建设用地得到大幅扩张, 尤其是主城都市区内的城市建设用地扩张最为显著, 导致主城都市区内二级流域的耕地规模和耕地聚集度大幅下降, 耕地破碎度和耕地不规则度大幅上升。其中, 2000—2010 年, 由于城市化进程较慢, 仅中心城区内二级流域(梁滩河、璧南河、梅江河、花溪河、竹溪河、清溪河等)的耕地规模和耕地聚集度小幅下降, 耕地破碎度和耕地不规则度小幅上升; 而 2010—2020 年, 由于城市化进程加速, 以上趋势加速扩散至其周围的主城新区内部分二级流域(濑溪河、临江河、御临河、大溪河等), 耕地规模和耕地聚集度均大幅下降, 耕地破碎度和耕地不规则度均大幅上升; 据预测, 未来 2020—2030 年, 在城市建设用地的进一步侵占下, 中心城区内二级流域的耕地规模和耕地聚集度将呈更大幅的下降趋势, 但由于受到耕地占补平衡机制的制约, 其周围主城新区内二级流域的耕地规模和耕地聚集度将不降反升, 用以弥补中心城区内二级流域所损失的耕地。此外, 在城市建设用地的干扰下, 主城都市区内二级流域的耕地斑块将进一步破碎化, 但在未来农业规模化管理下, 中心城区及其周围部分主城新区内二级流域的耕地形状不规则化现象将得到有效遏制, 耕地形状将逐渐倾向于规则化, 但主城新区内二级流域的耕地规模化管理还有待时日, 部分二级流域内耕地形状仍趋向于不规则化。

再聚焦于渝东北三峡库区城镇群和渝东南武陵山区城镇群, 2000—2020 年, 万州区、黔江区作为渝东北三峡库区城镇群和渝东南武陵山区城镇群的交通枢纽城

市,城市建设用地不断扩张,导致其内二级流域(磨刀溪、普里河、中井河、阿蓬江、细沙河等)的耕地规模大量缩减,但总体而言,由于主城都市区内二级流域的耕地规模不断缩减,为维持耕地占补平衡,渝东北三峡库区城镇群和渝东南武陵山区城镇群内大多数二级流域的耕地规模均产生扩张,其中 2000—2010 年,梁平区、忠县、垫江县和丰都县内二级流域(妆溪河、甘井河、渠溪河、大沙河、龙溪河等)的耕地规模扩张最为显著,与此同时耕地斑块愈发聚集,耕地形状愈发规则化;2010—2020 年,大巴山区内二级流域(任河、州河、东溪河、后溪河、洋溪河、马渡河等)的耕地规模扩张最为显著。尽管渝东北城镇群和渝东南城镇群内

二级流域的耕地规模迅速扩张,但是粗放的扩张无法保证耕地质量,导致位于渝东北、渝东南城镇群内,尤其是大巴山、巫山、七曜山和武陵山区内的二级流域内耕地破碎度、耕地不规则度变化十分显著,在空间上呈现出“上升”和“下降”交替分布现象,这可能是由于在新旧耕地的交替演化中,一些原有的耕地在农业现代化管理下逐渐聚集、破碎度减小,形状亦趋于规则化,而另一些新增的耕地由于尚未得到良好管理,呈现出分散化、破碎化和不规则化现象。而据预测,未来 2020—2030 年,在农业现代化管理下,这些二级流域内的耕地破碎度将显著下降,聚集度亦将显著上升,但耕地形状总体上却将进一步不规则化。

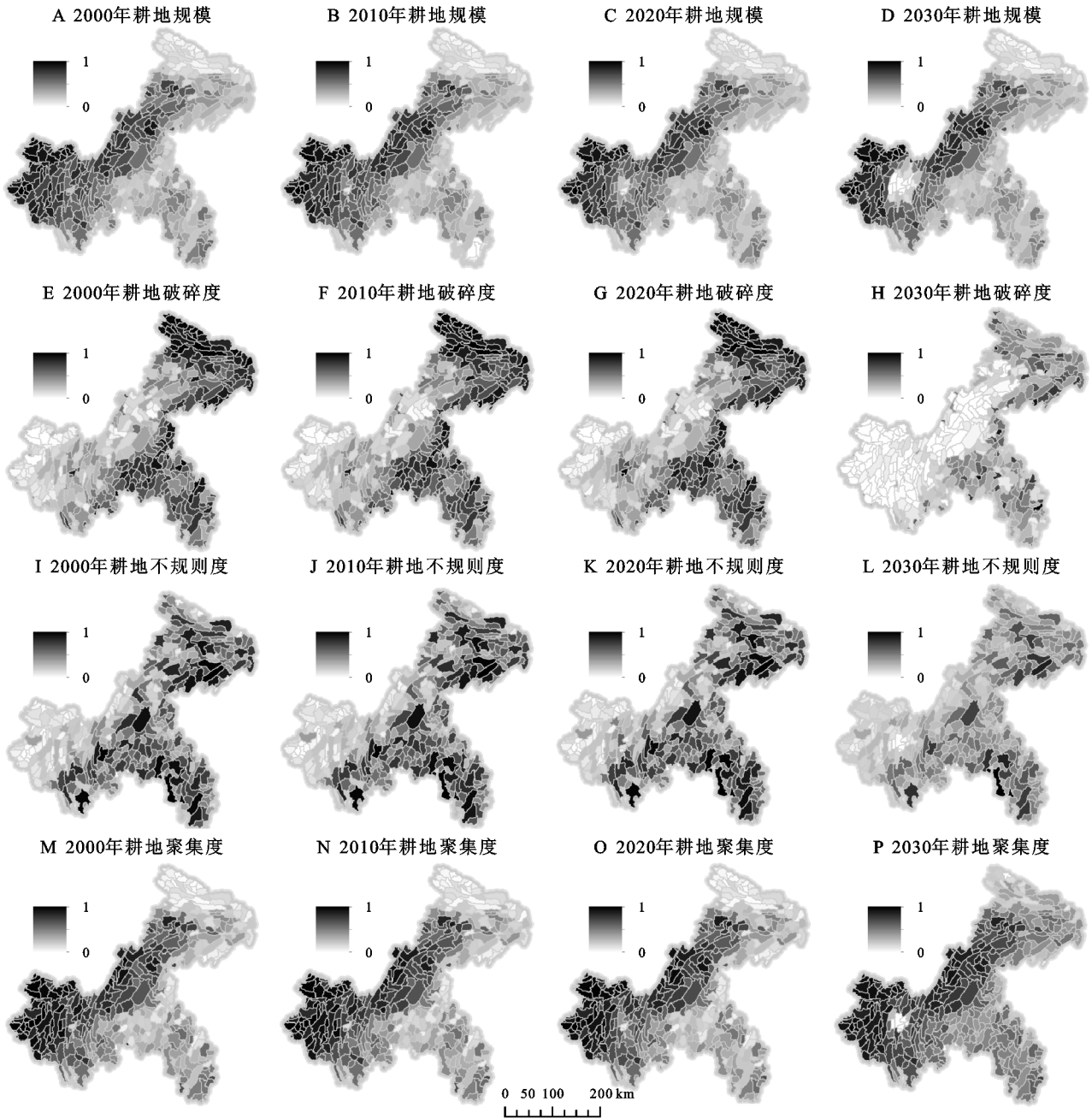


图 4 重庆市二级流域 2000—2030 年耕地景观格局空间分布

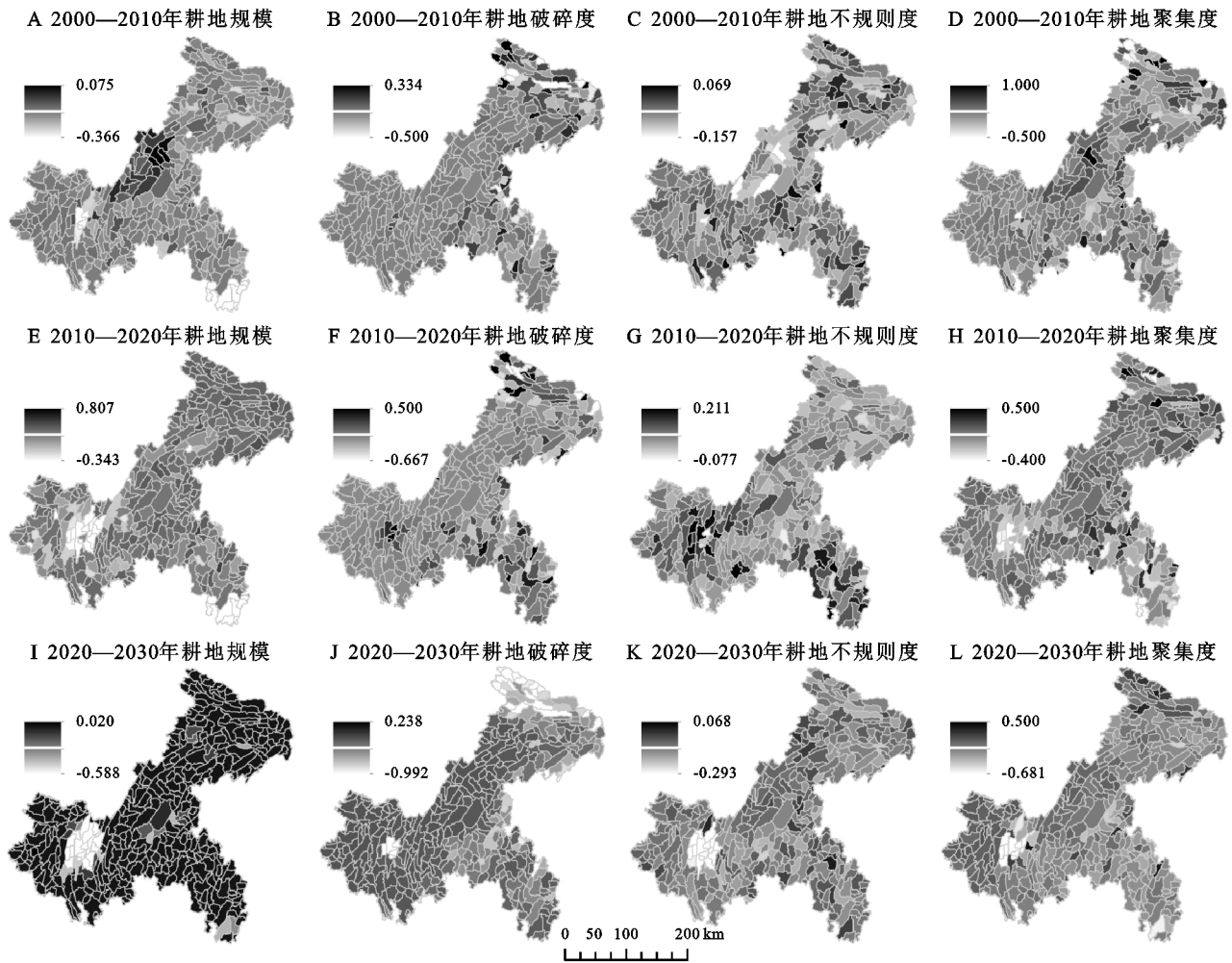


图 5 重庆市二级流域 2000—2030 年耕地景观格局空间变化趋势

4 结论与展望

(1) 2000—2020 年,在城市扩张、退耕还林和耕地撂荒的综合影响下,重庆市境内耕地数量由 40 640.87 km<sup>2</sup> 以先慢后快的速度下降至 38 590.33 km<sup>2</sup>,多转为城市建设用地,其次是林地、草地,但在耕地占补平衡制约下始终维持在可控范围内。

(2) 2000—2020 年,一级流域下,耕地规模均值由 0.519 先微小扩张至 0.521 后大幅缩减至 0.491,耕地破碎度均值由 0.217 先小幅下降至 0.209 后大幅上升至 0.233,耕地不规则度均值由 0.311 先小幅下降至 0.290 后大幅上升至 0.336,耕地聚集度均值总体上平均由 0.657 先上升至 0.677 后下降至 0.620;二级流域下,耕地规模均值由 0.492 上升至 0.494 又下降至 0.470;耕地破碎度均值由 0.157 下降至 0.151 又上升至 0.164;耕地不规则度均值由 0.302 下降至 0.300 又上升至 0.311;耕地聚集度均值由 0.646 上升至 0.649 又下降至 0.630。耕地景观格局大致与一级流域相契合,但以长江、小江为界呈现出更精细的空间两极分化特

征,且主城都市区与渝东北三峡库区城镇群、渝东南武陵山区城镇群内耕地景观格局时空演化的历史规律与未来趋势差异显著,主城都市区内二级流域耕地不断缩减、分散化、破碎化、不规则化,两大城镇群内二级流域耕地不断扩张,位于大巴山、巫山、七曜山和武陵山区内二级流域的耕地破碎度、耕地不规则度在空间上呈显著的升降交替分布现象。

(3) 未来 2020—2030 年,一级流域视角下,重庆市耕地规模将小幅缩减,耕地斑块将进一步分散化、破碎化、规则化;二级流域视角下,中心城区内二级流域的耕地规模将进一步缩减,耕地趋于分散化、破碎化、规则化,主城新区内二级流域的耕地规模将反之扩张,耕地趋向于聚集化、破碎化、不规则化,而两大城镇群内二级流域内耕地规模亦将扩张,破碎度将显著下降,耕地将趋向于聚集化、不规则化。

本文弥补现有研究不足,创新性地从多级流域尺度出发,揭示了重庆市耕地景观格局演化规律及趋势,在解决耕地演化的尺度效应问题上作出了有益尝试,可为山区耕地的研究尺度提供新视角;同时运用

ANN-CA 模型模拟、预测了重庆市 2020 年、2030 年土地利用,精度达 89.33%,证明该模型较为可靠。但研究亦存在不足之处,如仅就耕地一级类型进行了讨论,未将耕地细化至水田、旱地和水浇地等二级类型纳入分析,这些问题仍需在未来深入探讨。

参考文献:

[1] 郭碧云,张广军.基于 GIS 和 Markov 模型的内蒙古农牧交错带土地利用变化[J].农业工程学报,2009,25(12): 291-298,403.

[2] 刘敬杰,夏敏,刘友兆,等.基于多智能体与 CA 结合模型分析的农村土地利用变化驱动机制[J].农业工程学报, 2018,34(6):242-252.

[3] 张丁轩,付梅臣,陶金,等.基于 CLUE-S 模型的矿业城市土地利用变化情景模拟[J].农业工程学报,2013,29 (12):246-256,294.

[4] 宋蕾,曹银贵,周伟,等.基于 SD 模型的三峡库区快速城镇化地区耕地利用模拟研究[J].长江流域资源与环境, 2018,27(4):818-827..

[5] 李亚楠,多玲花,张明.基于 CA-Markov 和 InVEST 模型的土地利用格局与生境质量时空演变及预测:以江西省南昌市为例[J].水土保持研究,2022,29(2): 345-354. DOI:10.13869/j. cnki. rswc.20210930.001.

[6] 刘甲红,胡潭高,潘骁骏,等.基于 Markov-CLUES 耦合模型的杭州湾湿地多情景模拟研究[J].生态环境学报, 2018,27(7):1359-1368. DOI: 10.16258/j. cnki. 1674-5906.2018.07.021.

[7] 田桐羽.基于 SD-MOP 模型的城市土地利用结构情景模拟研究:以呼和浩特市为例[J].国土与自然资源研究, 2018(6):5-12

[8] 赵轩,彭建东,樊智宇,等.“双评价”视角下基于 FLUS 模型的武汉大都市区土地利用模拟和城镇开发边界划定研究[J].地球信息科学学报,2020,22(11): 2212-2226.

[9] Liu X, 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.

[10] Li X, Shi X, He J, et al. Coupling simulation and optimization to solve planning problems in a fast-developing area[J]. Annals of the Association of American

Geographers, 2011,101(5):1032-1048.

[11] 刘朋俊,李茜楠,李凯,等.基于 ANN-CA 的土地利用变化模拟应用研究[J].地理空间信息,2020,18(10): 20-24,27,4.

[12] 马晶,徐月,冯云飞,等.GeoSOS 在城市扩展中的应用[J].测绘通报,2018(7):116-120.

[13] 马世发,黎夏.地理模拟优化系统(Geo SOS)在城市群开发边界识别中的应用[J].城市与区域规划研究, 2019,11(1):79-93.

[14] 颜扬翰,郭子坚,王文渊,等.基于 ANN-CA 模型的港口城市景观格局变化与预测研究:以胶州湾西岸区为例[J].长江流域资源与环境,2020,29(7):1507-1514.

[15] 吴健生,王政,张理卿,等.景观格局变化驱动力研究进展[J].地理科学进展,2012,31(12):1739-1746.

[16] 张娜.生态学中的尺度问题:内涵与分析方法[J].生态学报,2006,26(7):2340-2355.

[17] 李赛博,徐丽萍,方曼曼,等.玛河流域耕地景观细碎化与利用效率的关联性探析[J].水土保持研究,2017,24(1): 311-316. DOI:10.13869/j. cnki. rswc.2017.01.041.

[18] 刘殿锋,周泊远,何建华,等.空间交互视角下中国城市群耕地变化影响因素分析[J].农业工程学报,2019,35 (16):274-283.

[19] 陈正发,史东梅,何伟,等.1980—2015 年云南坡耕地资源时空分布及演变特征分析[J].农业工程学报,2019, 35(15):256-265.

[20] 李志刚,王梦雨,牛继强,等.基于空间自相关分析的市域耕地空间格局演变分析:以洛阳市为例[J].信阳师范学院学报:自然科学版,2021,34(3):415-421.

[21] 钱凤魁,于洋,孙福军,等.不同地貌区县域耕地质量与耕地景观格局关联性特征分析[J].土壤通报,2020,51(6): 1282-1289. DOI:10.19336/j. cnki. trtb.2020.06.04.

[22] 陈爽,李阳兵,李明珍.镇域尺度的规模农地演变特征及其驱动机制研究:以重庆奉节县为例[J].山地学报, 2021,39(1):101-116. DOI: 10.16089/j. cnki. 1008-2786.000579.

[23] 郭莎莎,胡守庚,瞿诗进.长江中游地区多尺度耕地景观格局演变特征[J].长江流域资源与环境,2018,27 (7):1637-1646.

[24] 张荣天,陆建飞.长江经济带耕地集约利用多尺度时空特征与影响因素分析[J].农业工程学报,2019,35(24): 271-278.