

山地城市粮食安全对耕地多功能时空演变的响应研究*

——以重庆主城都市区为例

韦亚^{1,2}, 张虹^{1,2}, 张欣^{1,2}

(1. 重庆师范大学地理与旅游学院; 2. 重庆师范大学地理信息系统应用研究重庆市高校重点实验室, 重庆 401331)

摘要:为促进山地城市的稳定可持续发展,以典型山地城市重庆主城都市区为研究区,解析区域粮食安全对耕地多功能时空演变的响应关系。研究借助 GAZE、InVEST、GIS 等模型,测算了 2000—2020 年研究区耕地的生产、生态、景观游憩和社会保障功能值,并利用热点分析法(Getis-Ord G_i^*)分析了耕地各项功能在时空上的演变特征,然后利用 Pearson 秩次相关系数检验粮食安全对耕地多功能时空演变的响应关系。研究结果显示:1) 2000—2020 年研究区耕地减少了 5 677.76 km²,年均减少 283.9 km²,从耕地各功能空间分布看,各功能空间分布有明显差异;2) 从耕地各功能热点区变化看,耕地生产、生态功能总体呈下降趋势,2000—2010 年降幅较大总体在 14%~22%,2010—2020 年降幅减小总体在 10%;社会保障功能呈先下降后缓慢上升的趋势;景观游憩功能总体呈上升趋势,升幅约为 10%;3) 2000—2020 年研究区粮食安全与耕地生产、生态以及社会保障功能协同发展,但耕地景观游憩功能的无序拓展对粮食安全造成不利影响。上述结果提示:为保障研究区粮食安全,需严守“耕地红线”,防止耕地过度转化;同时也需适当控制耕地景观游憩等“非农化”“非粮化”功能;在确保区域粮食安全前提下,提高山地城市的耕地利用率、提升耕地效益。

关键词:耕地斑块;多功能;粮食安全;相关性分析;重庆主城都市区

中图分类号:X24;F323.211

文献标志码:A

文章编号:1672-6693(2024)01-0037-14

粮食安全指所有人在任何时候既能买得到又能买得起所需要的基本食品,包括粮食质量安全与粮食数量安全;粮食安全事关国民经济与社会发展全局,是保障国家安全的重要基石^[1]。在中国,有关粮食安全的研究多集中于粮食安全重要性、保障区域粮食安全等方面^[2-3];也有学者从地理学、生态学等领域入手,通过分析耕地的数量、质量、生态等基本属性,提出针对性的保障策略^[4-6]。耕地资源是保障粮食安全的核心物质资源,耕地在数量、质量、功能等方面的改变将直接影响粮食安全^[7-8]。耕地除了具有粮食生产等传统商品性生产功能外,还具有包括调节大气组分与气候、景观游憩等其他非商品性生产功能^[9-10];随着农业环境问题日益凸显,从 20 世纪 70 年代起,有关耕地多功能的研究在国际上受到了学者们的关注^[11-12]。到了 20 世纪 90 年代,随着城镇化、农业农村现代化的加速发展,中国的耕地和农村环境保护工作也面临着诸多问题,如耕地需求无序竞争、耕地边际化、耕地生态系统退化等^[13-14]。因此,中国的研究者们也逐步开展了对耕地多功能的研究,且从早期关于耕地多功能的缘起、内涵与类型划分的研究^[9,15]发展到现阶段重点关注耕地多功能的时空变化^[16]、效益评价^[17]、协同权衡^[18]等方面,研究方法则以双约束聚类法、空间自相关、主导功能^[19-20]等为主,空间单元涉及区县、格网等^[21-22]。以上研究为人们深入认识耕地多功能、粮食安全内涵等提供了重要的科学参考,但粮食安全对耕地功能变化的响应关系尚不明晰,需进一步探究。

山地城市耕地资源匮乏、优质耕地少,且因自身特殊地形的影响,区域内耕地利用率低且效益得不到充分发挥。同时,山地城市在城市建设和经济发展过程中因受到地形限制而不得不占用大量耕地,区域内耕地已出现边际化、破碎化问题。此外,受不同时期政策、供给、市场调控等影响,耕地功能也不稳定^[23-24]。因此,探究山地城市耕地多功能时空演变与粮食安全的相互关系,对山地城市的耕地保护以及促进区域粮食安全和稳定可持续发展具有重要意义。重庆主城都市区作为典型的山地城市,集中了重庆市约 45% 的耕地资源;同时,该区域作为

* 收稿日期:2022-09-06 修回日期:2023-03-06 网络出版时间:2024-02-28T21:13

资助项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(No. 41807498);重庆市教育委员会科学技术研究计划项目(No. KJQN201800525);重庆师范大学研究生科研创新项目(No. YKC22021)

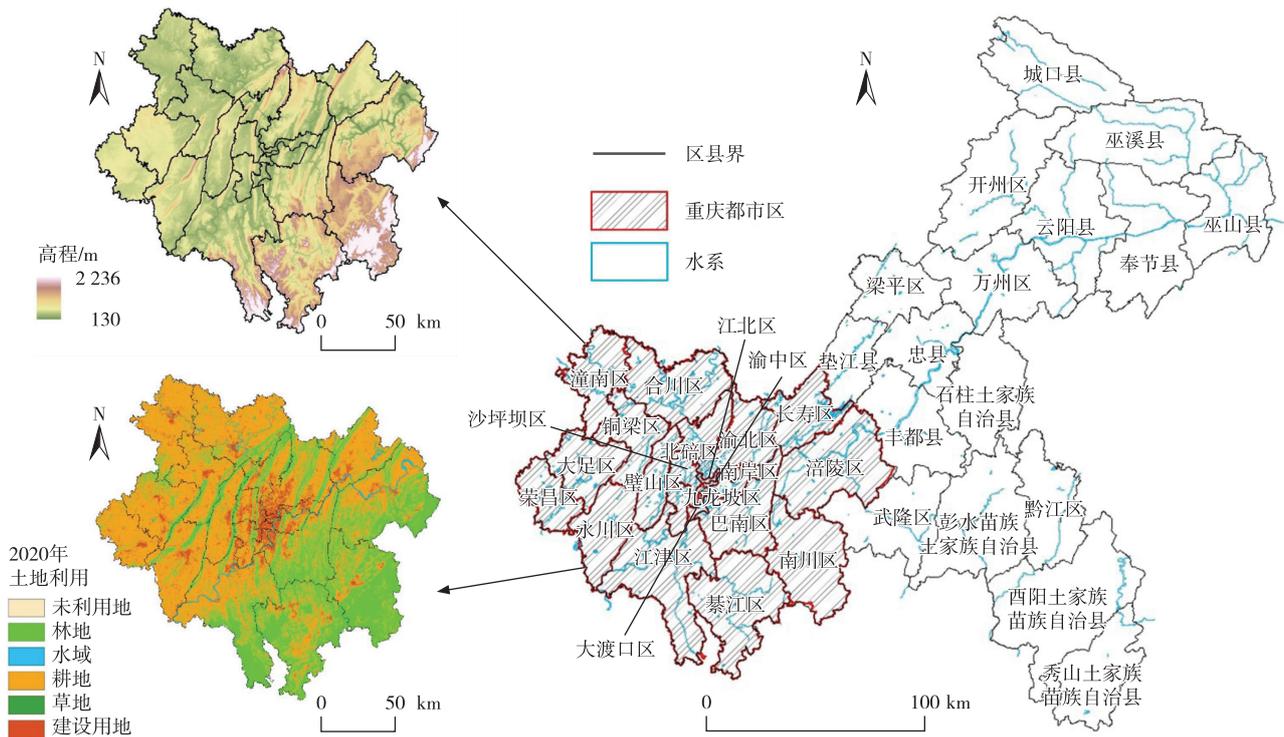
第一作者简介:韦亚,女,研究方向为城乡规划与人居环境,E-mail:1513395004@qq.com;通信作者:张虹,副教授,博士,E-mail:zh_angh@cqnu.edu.cn

网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/50.1165.N.20240228.1321.004

“成渝双城经济圈”的引擎与西部高质量发展的增长极,也需要在建设用地区域扩张、经济发展和耕地保护、耕地粮食生产功能维护之间找到平衡点。本研究以重庆主城区都市区为研究区,以 2000、2010 和 2020 年为研究时间节点,从斑块尺度测算研究区耕地的各项功能,并借助热点分析法(Getis-Ord G_i^*),探究 2000—2020 年研究区耕地的生产、生态、社会保障以及景观游憩功能空间分布特征,通过 Pearson 相关分析探究粮食安全对研究区耕地各功能时空演变的响应关系,以便为提高研究区以及与之类似的山地城市耕地利用率、促进区域粮食安全及稳定可持续发展提供理论依据和参考。

1 研究区概况

研究区位于四川盆地东部、重庆市西部,包含巴南区、南岸区、渝中区、江北区、渝北区、北碚区、沙坪坝区、九龙坡区、大渡口区、涪陵区、长寿区、江津区、合川区、永川区、南川区、綦江区、大足区、璧山区、铜梁区、潼南区、荣昌区等 21 个区,面积 2.87 万 km^2 (图 1)。区域内以平地 and 缓坡为主,约 70% 的地区属丘陵地貌;年降水量在 1 000~1 400 mm 之间,年平均气温约 $18\text{ }^\circ\text{C}$ 。研究区内多云雾,年日照时数在 1 112.6~1 655.8 h,无霜期长,光照较充足,有利于作物光合作用;研究区内水系密布且气候为季风气候、雨热同期,为农作物生长提供了充足的水热保障^[25]。截至 2020 年,研究区内耕地面积达 10 908.97 km^2 ,约占重庆市耕地面积的 45%,且连片性好、农业机械化程度和集约利用度较高^[26];2021 年《重庆统计年鉴》数据显示,2020 年研究区粮食产量达 530 万 t,占重庆市粮食总产量的 49%。研究区内人口密度大、人类活动频繁,区域内耕地在保障粮食生产、农业生态等基本功能的同时,还在一定程度上满足了人们对绿地、景观游憩的需求,从而促进了区域内耕地多功能的发展。



注:底图来源于自然资源部标准地图(<http://bzdt.ch.mnr.gov.cn/index>),审图号:GS(2019)3333号,下同。

图 1 研究区概况

Fig. 1 The overview of the study area

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

耕地的生产、生态、景观游憩和社会保障功能以及粮食安全评价指标的面板数据来源于 2001、2011 和 2021 年出版的《重庆统计年鉴》,其中:生产功能包括耕地数量分布、降水、地形等,生态功能包括气温、土壤、坡度等,景观游憩功能包括路网、城镇空间分布及地块形状等,社会保障功能包括农业产值、夜间灯光、粮食产量等。上

述耕地功能的数据具体说明及来源见表 1。所有空间数据投影均采用 Albers 等积投影,按耕地空间分布数据进行掩膜。

表 1 数据来源与说明

Tab. 1 Data sources and descriptions

数据	来源及描述
农田生产潜力	2000、2010 年数据来源于资源环境科学与数据中心 (https://www.resdc.cn/), 2020 年数据利用耕地、气温、光照、土壤等数据借助 GAEZ 模型生成
植被净初级生产力	来源于美国国家航空航天局官网 (http://reverb.echo.nasa.gov/)
平均降水量、平均气温	来源于重庆市气象局 (http://cq.cma.gov.cn/), 为 2000 年、2010 年以及 2020 年重庆 34 个气象站点年平均降水量数据, 年平均气温数据
2000、2010、2020 年 30 m 耕地	来源于资源环境科学与数据中心 (https://www.resdc.cn/)
2000、2010、2020 年道路	来源于国家地球系统科学数据中心 (www.geodata.cn) 1:25 万道路交通数据集
行政区	来源于地理国情监测云平台 (http://www.dsac.cn/)
2000、2010、2020 年粮食产量、农业产值及农村常住人口	来源于 2001、2011 和 2021 年《重庆统计年鉴》及重庆主城都市区有关区县统计公报, 并参考文献[27]将相关数据空间化
土壤渗透因子	来源于国家冰川冻土沙漠科学数据中心 (http://www.ncdc.ac.cn/portal/) 提取中国土壤数据 (HWSD)
DEM、土壤类型	来源于地理空间数据云 (http://www.gscloud.cn)
土壤侵蚀模型参数 C 、 P 、 SDR_{max} 、 kb 和 ICO 的取值	来源于 InVEST 手册 (https://naturalcapitalproject.stanford.edu/invest/)

2.2 研究方法

2.2.1 耕地各功能计算

1) 生产功能。生产功能是耕地最基本的功能,反映耕地生产潜力及生产活动的投入产出^[28]。本研究以农田生产潜力表征耕地生产功能,主要是借助 GAEZ 模型测算农田在气候、灌溉、土壤类型以及地形地貌等条件下的生产潜力,具体计算公式如下:

$$Y_{total} = Y_{rain-fed} (1 - I) + Y_{irrigated} \times I, \quad (1)$$

其中: Y_{total} 表示总生产潜力, $Y_{rain-fed}$ 表示雨养条件下的生产潜力, $Y_{irrigated}$ 表示灌溉条件下的生产潜力, I 是灌溉面积与总耕地面积的比值。

2) 生态功能。耕地的生态功能由气候调节、水源涵养、水土保持、生境维持等几项功能构成^[29]。

a) 气候调节功能通过测算耕地生态系统的固碳与释氧能力来表征^[30], 即:

$$C = V(CO_2) + V(O_2) = A \times N \times 1.63 + A \times N \times 1.2, \quad (2)$$

其中: C 为气候调节能力, $V(CO_2)$ 为固碳量, $V(O_2)$ 为释氧量, A 为生态系统面积, N 为净初级生产力。

b) 借助耕地所处坡度状况、土壤的渗水能力、降水等因子综合测算耕地的水源涵养功能^[31], 有:

$$W = (1 - F_{slo}) \times F_{sic} \times N_{mean} \times F_{pre}, \quad (3)$$

其中: W 表示水源涵养能力, F_{slo} 为坡度因子, F_{sic} 为土壤渗流因子, N_{mean} 为植被净初级生产力年平均值, F_{pre} 为年均降水量因子。

c) 利用 USLE 模型基于降水侵蚀力和土壤的可蚀性、粘粒含量、有机质含量等因子测算耕地的水土保持能力^[32]。

d) 耕地的生境维持功能是维持生态系统稳定性的潜在服务,是生态系统提供的维护物种生命周期和多样性的服务,借助 InVEST 模型中的生境维持模块对耕地的生境维持能力进行了测算^[33], 有:

$$Q = H_j \times (1 - D_{xj}^2 / (D_{xj}^2 + K^2)), \quad (4)$$

其中: Q 表示耕地的生境维持能力, H_j 为生境类型 j 的生境适宜度, D_{xj} 为生境类型 j 中栅格 x 的总威胁程度, K 为半饱和常数。

最后, 借助几何平均值法计算耕地的总生态功能, 如表 2 所示。

3) 景观游憩功能。耕地的景观游憩功能体现为耕地作为文化景观而在休闲观光、景观美学、补充城市绿地等方面被加以多样化利用。耕地景观供给指耕地作为自然载体因自身所处的海拔、地形等地理因素而为人们提供的潜在的游憩场所; 耕地景观需求则指社会成员出于自身需要对周边耕地产生的多样性、可达性等需求^[34]。本研究以耕地区位、连片性、斑块形状^[34]等指标来表征耕地景观供给, 有:

$$C_{\text{con}} = \left(\sum_{r=1}^n C_{ijr} / a_{ij} - 1 \right) / (V - 1), \quad (5)$$

$$F_{\text{rec}} = 2 \ln(0.25 P_{ij}) / \ln a_{ij}, \quad (6)$$

其中: C_{con} 表示耕地地块的连通度; C_{ijr} 为景观类型 i 中斑块 j 的像元 r 的邻接值; V 为窗口内全部栅格邻接值之和, 窗口中心和对角线上邻接栅格赋值 1, 与之上下左右相邻的栅格赋值为 2; F_{rec} 表示地块形状; P_{ij} 为景观类型 i 中第 j 个斑块的周长; a_{ij} 为斑块 ij 的面积。

此外, 本研究以景观多样性^[35]、耕地与城镇距离^[36]等指标表征耕地景观需求, 有:

$$S_{\text{hdi}} = - \sum_{i=1}^m (P_i \ln P_i), \quad (7)$$

$$d_{\text{IC}} = \sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^n ((X_{ik} - X_{G,k}) / S_k)^2}, \quad (8)$$

其中: S_{hdi} 为景观多样性指数, P_i 为景观中类型 i 的比例, d_{IC} 表示某系统与目标系统的加权欧氏距离, X_{ik} 表示被评价系统的第 k 个评价指标, $X_{G,k}$ 表示目标系统的第 k 个评价指标值, S_k 代表第 k 个指标值的标准差。

最后, 采用改进序关系法^[37]对上述供需指标加权求和, 具体权重见表 2。

4) 社会保障功能。耕地具有提供居住、确保作物生长、为人类生产生活提供载体的功能^[10]。选取作物复种指数、农业产值比重、人口密度等 3 个指标^[27]来表征耕地的社会保障功能, 其中: 作物复种指数是农作物播种面积与耕地面积的比值, 农业产值比重是农业产值与国内农业生产总值的比值, 人口密度为单位耕地面积上的农村人口数量。通过耕地掩膜落到耕地斑块上, 具体权重见表 2。

表 2 耕地功能的评价指标体系

Tab. 2 Evaluation index system of cultivated land function

一级指标	二级指标	综合方法	权重	一级指标	二级指标	综合方法	权重
生产功能				景观游憩功能	地块形状(供给)		0.16
	生态功能	气候调节	几何平均值法			景观多样性(需求)	加权求和
水源涵养					距中心城镇距离(需求)		0.12
土壤保持					距公路最近距离(需求)		0.18
	生境维持			复种指数		0.36	
景观游憩功能	海拔(供给)	加权求和	0.21	社会保障功能	农业产值比重	加权求和	0.33
	地块连通(供给)		0.13			农村人口密度	

2.2.2 耕地功能时空特征分析

引入热点分析法, 识别耕地各功能在不同空间位置上的高值簇(热点区)与低值簇(冷点区), 其中热点区即为耕地对应功能的主导区, 有关公式如下:

$$G_i^* = \sum_{j=1}^n (W_{ij} X_j) / \sum_{j=1}^n W_{ij}, Z = (G_i^* - E(G_i^*)) / \sqrt{V(G_i^*)},$$

其中: G_i^* 为空间单元 i 的集聚指数, Z 为该集聚指数的显著程度, W_{ij} 是以距离定义的空间权重, X_j 为空间单元 j 的属性值, $E(G_i^*)$ 和 $V(G_i^*)$ 分别是 G_i^* 的数学期望和方差。

2.2.3 粮食安全对耕地多功能时空演变的响应分析

根据区域耕地特征,结合已有研究^[38-39],选择与粮食数量安全相关因子即粮食总产量、人均粮食产量和单位耕地面积粮食产量加权求和测算粮食安全指数,以改进序关系法^[37]确定指标权重。以研究区下属各行政区为单位,利用 Pearson 秩次相关系数检验粮食安全对耕地多功能时空演变的响应关系,分析两者的相关性;当两者相关系数为负,且统计学检验结果的 p 值小于 0.05,则两者为权衡关系;当两者相关系数为正,且统计学检验结果的 p 值小于 0.05,则两者为协同关系^[40]。

3 结果与分析

3.1 耕地数量变化分析

2000—2020 年研究区耕地面积由 2000 年的 16 586.73 km² 减少到 2020 年的 10 908.97 km²,20 年间共减少了 5 677.76 km²,年均减少量为 283.9 km²,其中:2000—2010 年研究区耕地面积减少了 31%;2010—2020 年因研究区内推行了基本农田保护、占用耕地补偿制度等一系列的保护政策,区内耕地得到有效恢复和保护,面积仅减少了 4.6%。在 2000—2010 年,随着城镇化建设及退耕还林政策的实施,研究区耕地主要以转变为建设用地及林地方式减少(表 3);而在 2010—2020 年,随着城镇化建设的进一步推进以及国家对生态保护提出了更高要求,研究区耕地转变为建设用地及林地的面积则大幅增加(表 4)。

表 3 2000—2010 年研究区土地利用转移矩阵

Tab. 3 Land use transfer matrix on the study area from 2000 to 2010

km²

2010 年土地利用类型	2000 年土地利用类型						总计
	草地	耕地	建设用地	林地	水域	未利用地	
草地	78.10	2.95	0.03	0.72	0.17	0.00	81.98
耕地	0.72	18 009.28	11.21	42.88	2.11	0.00	18 066.21
建设用地	0.23	463.31	430.23	18.31	0.44	0.00	912.52
林地	0.10	85.80	0.07	9 066.28	1.78		9 154.04
水域	0.04	12.53	0.01	1.12	433.70		447.39
未利用地	0.00	0.01		0.00		0.02	0.02
总计	79.20	18 573.87	441.56	9 129.31	438.19	0.02	28 662.15

表 4 2010—2020 年研究区土地利用转移矩阵

Tab. 4 Land use transfer matrix on the study area from 2010 to 2020

km²

2020 年土地利用类型	2010 年土地利用类型						总计
	草地	耕地	建设用地	林地	水域	未利用地	
草地	79.98	6.63	0.14	2.06	0.34	0.00	89.15
耕地	1.35	17 287.70	18.98	73.13	2.65	0.00	17 383.80
建设用地	0.41	636.95	893.31	16.13	0.82	0.00	1547.62
林地	0.17	119.63	0.06	9 061.22	0.80		9 181.88
水域	0.07	15.09	0.04	1.56	442.78		459.55
未利用地	0.00	0.02	0.00	0.00		0.02	0.04
总计	81.98	18 066.023	912.53	9 154.10	447.39	0.02	28 662.04

3.2 耕地多功能时空演变特征

由式(1)~(8)计算得到研究区耕地的生产、生态、景观游憩及社会保障功能分布格局如图 2 所示;运用热点分析法,获得研究区耕地功能冷热点分布(图 3)、耕地冷热点面积及占比(图 4)和耕地功能变化格局(图 5)。

3.2.1 耕地生产功能时空演变特征

研究区耕地生产功能热点区多集中分布于研究区西部的潼南、合川、大足及中部的渝北、璧山、巴南等地,空

间分布差异明显;研究区耕地生产功能整体呈“西高东低”的空间分布格局(图 2、图 3)。研究区耕地生产功能热点区地形多为河谷平原、方山丘陵,区域内耕地起伏小、坡度低、地块相对完整且连片性高;耕地土壤为黄壤、水稻土、沙土以及紫色土混合分布,土壤肥力较高、透水性强,土地耕作潜力高;区域内水资源丰富,耕地自然条件和立地条件较好,生产潜力强。

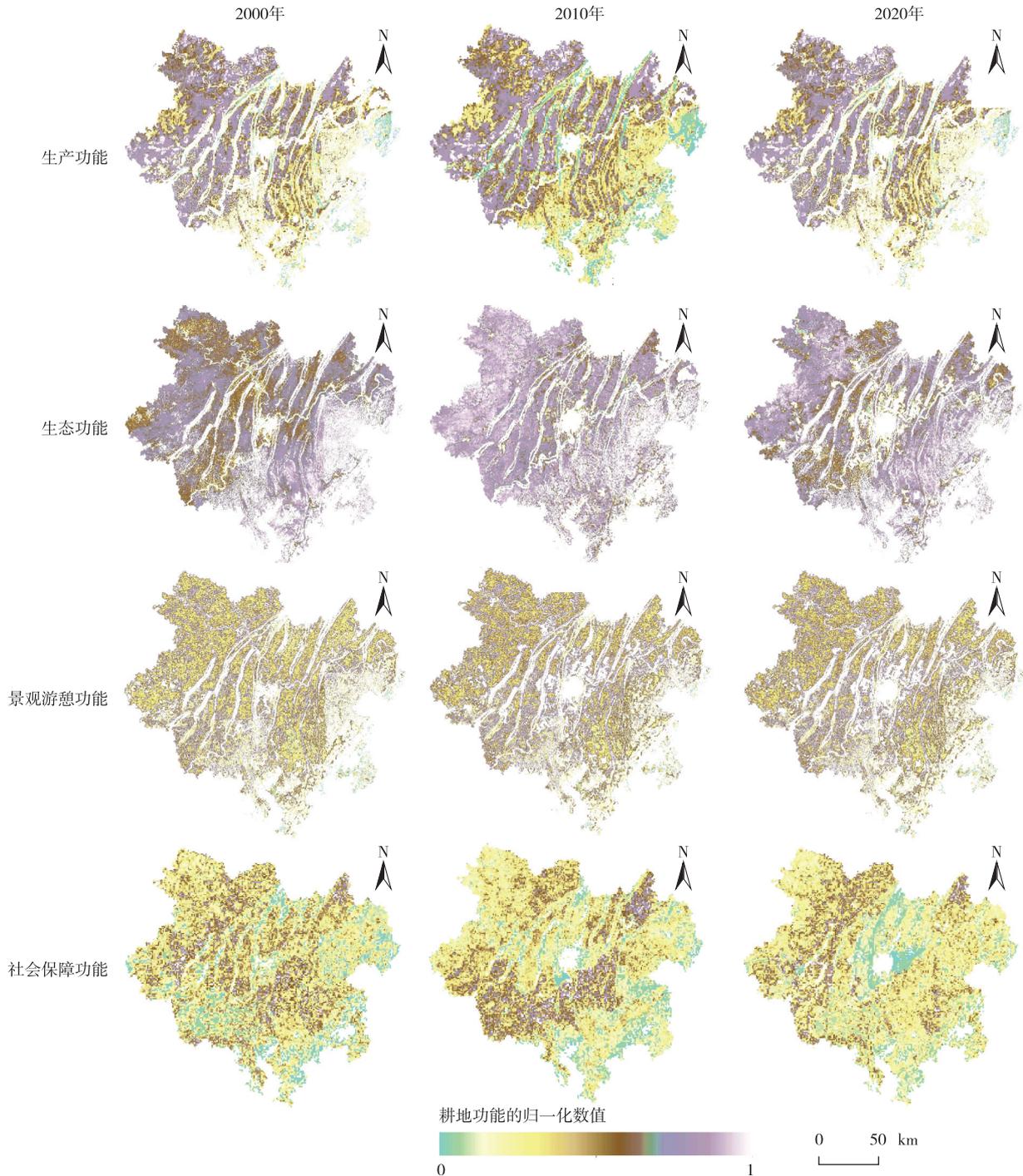


图 2 2000—2020 年研究区耕地功能分布

Fig. 2 Functional distribution of cultivated land in the study area from 2000 to 2020

从功能变化上看,2000—2020 年研究区耕地生产主导功能呈下降趋势,热点区面积减少约 3 000 km²,在 2010 年主要转变为不显著区,在 2020 年则主要转为冷点区,这一变化在空间上呈“西北—东南”走向,且有关变化多集中于铜梁、巴南等地(图 4、图 5)。2000—2010 年,由于城镇化进程加快,研究区耕地被建设用地占用较多,加上该时期频繁的自然灾害,因此部分耕地的质量下降导致生产潜力有所降低;这一时期研究区耕地生产功

能热点区面积减少了约 2%，而不显著区面积增加了约 3%。2010—2020 年，随着“高标准农田建设”“菜篮子工程”“三农”等工作的稳步推进，研究区耕地利用强度上升，加之下属各区严守耕地保护红线，耕地生产潜力增强；这一时期研究区耕地生产功能热点区面积占比达 45%，热点区面积降幅得到了有效控制。

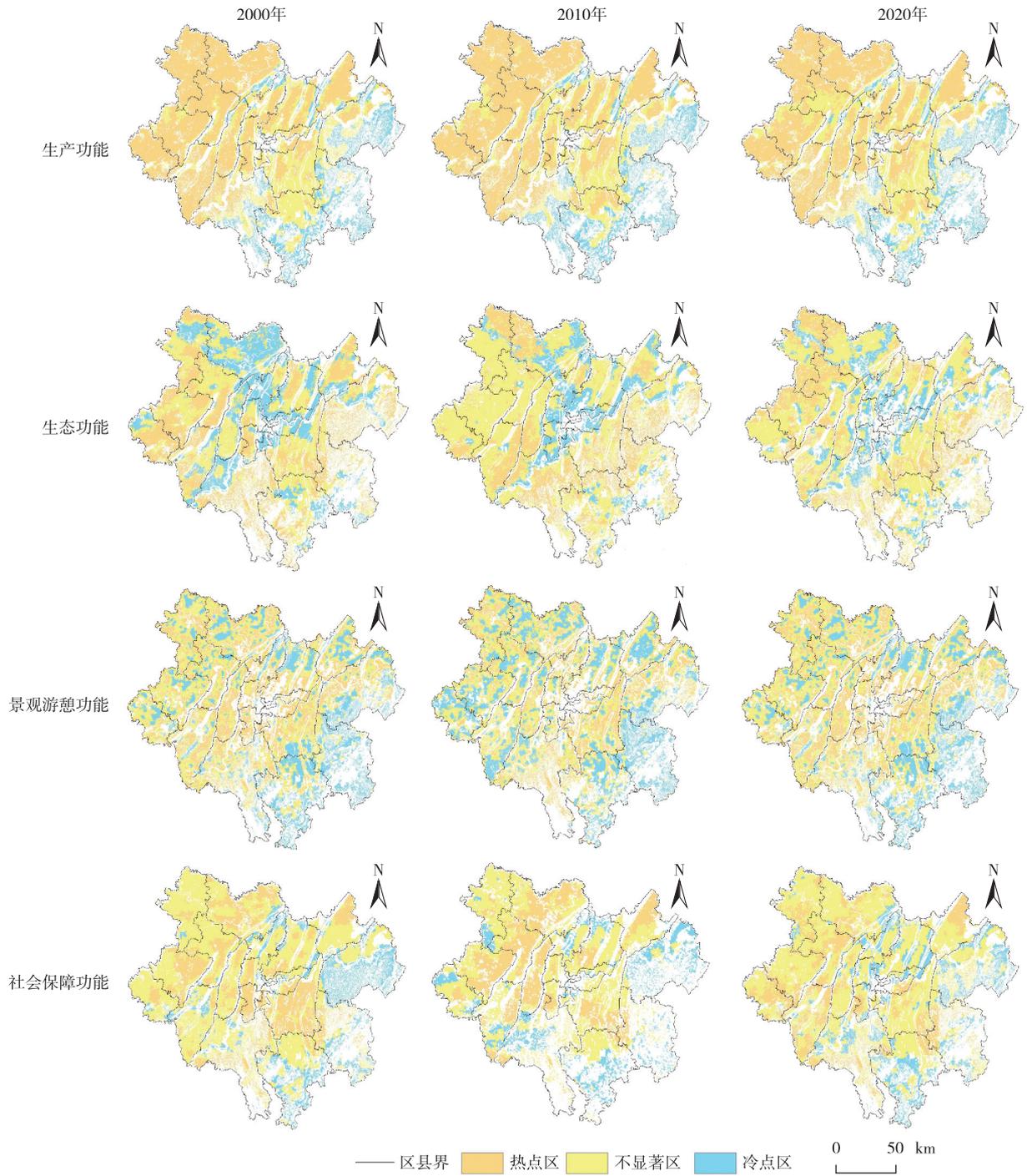


图 3 2000—2020 年研究区耕地功能冷热点分布

Fig. 3 Distribution map of cold and hot spots of cultivated land functions in the study area from 2000 to 2020

3.2.2 耕地生态功能时空演变特征

研究区生态功能热点区面积占比稳定在 30%左右，集中分布于西北部潼南、铜梁和东部綦江、南川等地，研究区耕地生态功能整体呈“中心低、周边高”的空间格局特征(图 2、图 3)。研究区生态功能热点区良好的立地条件为区域作物的生长提供了生产所必须的水源、光照、养分等，作物净初级生产力高；同时，这些区域远离城市繁华地带，一定程度减少了人类活动的干扰、降低了耕地面临的威胁度与生态敏感度^[37]，提高了耕地的生境质量；

此外,上述区域内耕地、林地、草地混合分布,有利于提升耕地涵养水源和保持水土的能力,增强耕地的生态功能。

2000—2020年,研究区耕地生态功能热点区面积呈先减少后增加的趋势:2000—2010年热点区面积减少了约680 km²,降幅达13%;2010—2020年热点区面积则增加了约8%,这一变化在空间上总体表现为“环状变化”即:研究区中心、中心周边和外围主要为冷点区、不显著区和热点区,且热点区主要由不显著区转化而来(图4、图5)。2000—2010年,研究区耕地生态功能有所下降,其中原因一是耕地转化面积减少,二是区域内大量施用农药、化肥及使用农膜等导致农田面源污染较广,田间生物多样性遭到破坏,耕地涵养水源、保持水土的能力下降。2010—2020年,研究区下属各区积极推进土壤酸化及土壤污染的综合治理,开展与水源涵养、维护生物多样性等有关的生态工程,并通过培育良种、加大农产品科技投入来减少农药、化肥等的施用,从而使农业面源污染得以有效遏制,加之生态循环农业模式的推广,故在此期间耕地生态环境得以持续改善。

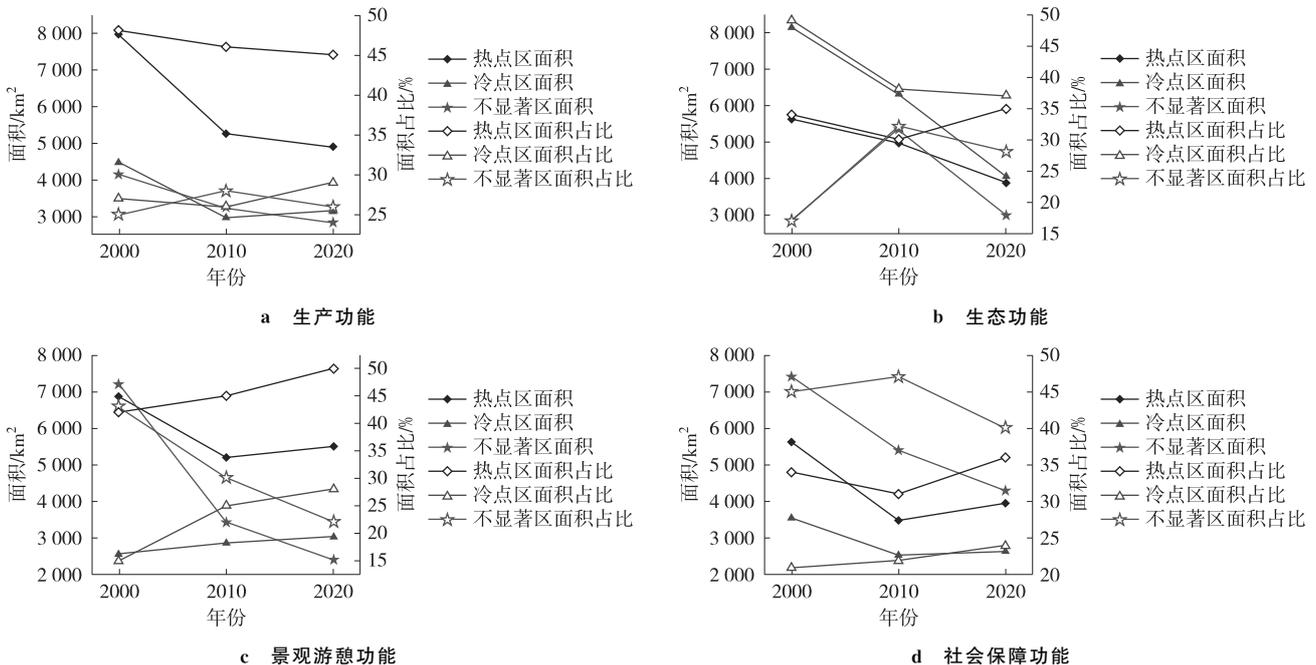


图 4 研究区耕地冷热点面积及占比统计结果

Fig. 4 Statistical results of the area and proportion of cold and hot spots of cultivated land in the study area

3.2.3 耕地景观游憩功能时空演变特征

研究区耕地景观游憩功能热点区集中于荣昌、璧山、巴南等地,南川、綦江等地为冷点区,研究区耕地景观游憩功能呈零星分布格局(图2、图3)。从供给角度看,研究区耕地景观游憩功能热点区海拔相对较低,地势平坦且地块完整,耕地斑块间连通性较好,利于形成观光类、休闲类农业景观;从需求角度看,研究区耕地景观游憩功能热点区位于核心城市周边,区内城镇化发展程度较高、人口密集、经济发展水平高,对景观游憩需求高。有关区域的耕地多分布于交通线、城镇周边,且区内耕地周边旅游景点、农家乐等分布较多,增强了人们对景观游憩的可获得性,突显了耕地景观游憩功能。

2000—2020年,研究区耕地景观游憩功能热点区面积呈持续增加趋势,2020年热点区面积占比达50%;热点区的空间变化主要体现在璧山、铜梁等地(图4、图5)。这些区域紧邻重庆市中心城区,人们对景观游憩需求大,且随着城乡一体化、乡村振兴和现代都市农业的快速发展,当地农户逐渐以农家乐、观光农田等经营为主,开展包括农产品采摘体验、亲子游乐园、休闲垂钓等一系列经营活动,从而不断增强耕地的景观游憩功能。

3.2.4 耕地社会保障功能时空演变特征

研究区耕地社会保障功能热点区分布与生产功能热点区趋于一致,总体面积占比约为30%(图2、图3);热点区多为斑块面积大、完整度高且土壤质量好的优质良田区。热点区内耕地生产潜力大,地势平坦且连片分布,利于作物的机械化、规模化和专业化生产。研究区耕地社会保障功能热点区毗邻城市经济发展核心,人口密度大、经济发展水平高,人均收入稳定,有利于稳定农业产值;同时,作为重庆重要的粮食主产区之一,该区域严格

控制耕地的“非粮化”转变,而标准农田的建设进一步稳定了耕地的物质保障功能。

2000—2020 年研究区社会保障功能热点区面积呈先减少后增加趋势:2000—2010 年热点区面积减少了约 2 100 km²,降幅达 38%;2010—2020 年热点区面积逐渐增加,增幅约为 13%;热点区的空间变化集中于研究区西部荣昌、永川、大足等区(图 4、图 5)。2000—2010 年,伴随着重庆市城镇化建设以及退耕还林、还草等政策的实施,研究区耕地面积减少、破碎化程度增加且作物产量不稳定,加上城乡收入差距扩大、农村青壮年流失、农村常住人口快速减少,均在一定程度上削弱了耕地的社会保障功能。2010—2020 年,研究区内经过土地整治后形成了集中连片、设施配套、抗灾能力强且与现代农业生产和经营方式相适应的基本农田,耕地生产力增强,耕地社会保障功能得以强化。

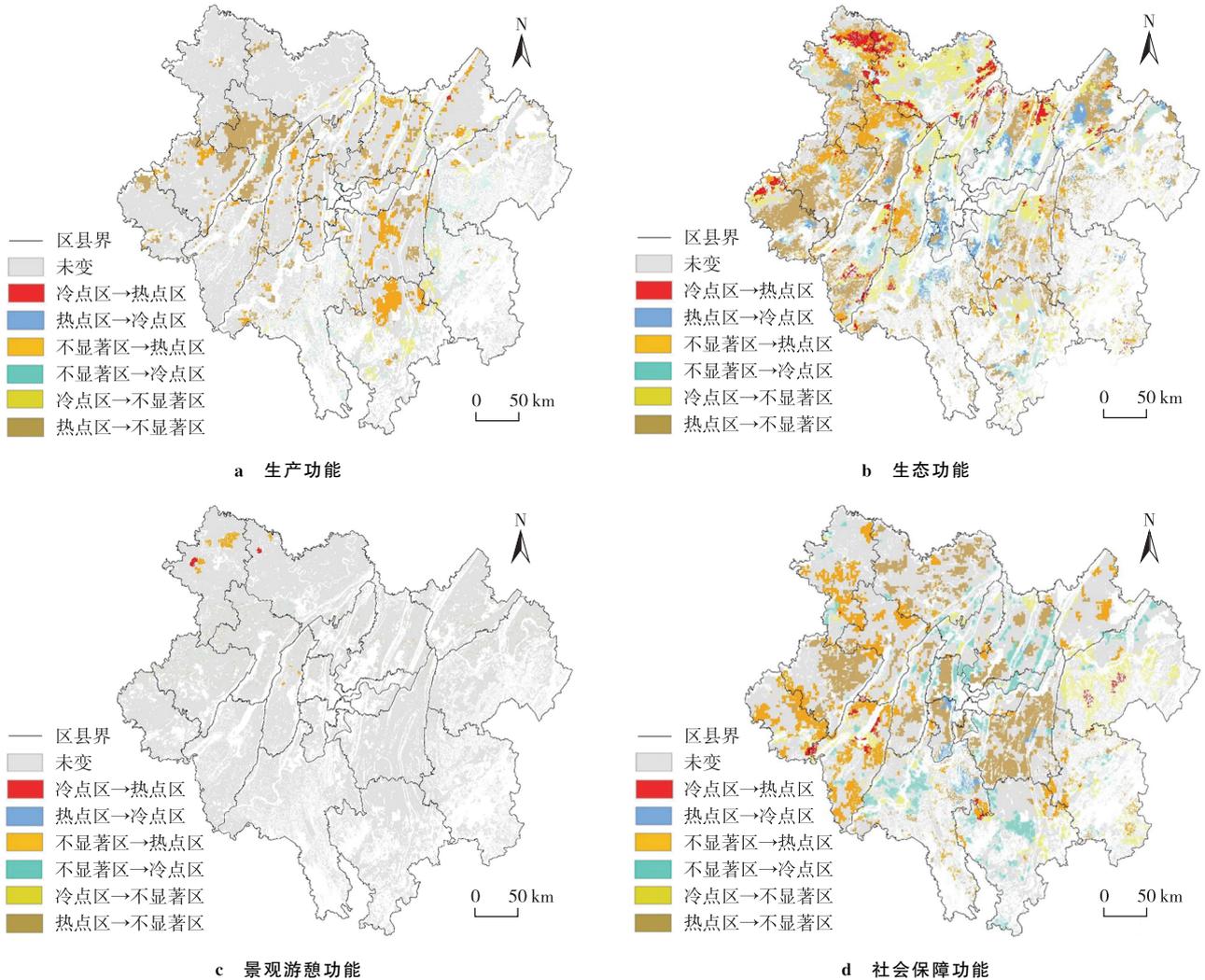


图 5 2000—2020 年研究区耕地功能变化分布

Fig. 5 The distribution of cultivated land function in the study area from 2000 to 2020

3.3 粮食安全对耕地多功能时空演变的响应

2000—2020 年研究区粮食总产量呈减少趋势,在 2000、2010 和 2020 年分别为 682、588 和 530 万 t,在此期间减少了约 152 万 t。2000 年研究区人均粮食产量为 7.3 t,2010 年人均粮食产量下降为 5.8 t,而到 2020 年人均粮食产量为 5 t。由此可见,2000—2020 年研究区人均粮食产量逐年下降,在 2000—2010 年降幅达 20%,在 2010—2020 年降幅有所减小,为 13%。研究区粮食安全指数总体呈下降趋势,其中 2000—2010 年降幅较大为 7%,2010—2020 年降幅较小为 5%。2000—2010 年,由于种粮收益低且“基层轻农”现象突出,研究区粮食播种面积减少,粮食安全受到一定威胁^[41];2010—2020 年,随着国家高标准农田建设工作的开展,研究区内实施了坡地平整,并改善土壤酸化、提高耕地质量,从而增强了农田生产力,区域内基本能实现粮食自给、粮食产量也得以

稳定。

进一步探究研究区粮食安全对耕地多功能时空演变的响应,鉴于渝中区是一个以第三产业为主,基本没有农业的地区,故选取其余 20 个区的相关数据进行分析,其中研究区耕地各项功能值为这 20 个区内单位耕地各项功能的平均值(表 5)研究区耕地各项功能与粮食安全间的相关关系如表 6 所示。2000—2020 年,研究区粮食安全与耕地生产、生态及社会保障功能均呈统计学意义上的正相关关系($p < 0.05$),说明研究区耕地的这 3 项功能与粮食安全协调发展。2000—2010 年,研究区耕地生产、生态及社会保障功能值均呈下降趋势,降幅分别为 33%、13%及 38%,粮食安全指数降幅为 7%;2010—2020 年,研究区耕地生产功能值及粮食安全指数持续下降,但生态及社会保障功能值有所增加,增幅分别为 7%和 13%(表 5)。粮食安全指数与耕地生产、生态及社会保障功能总体一致呈下降趋势。

表 5 2000—2020 年研究区粮食安全指数与耕地各项功能值的变化

Tab. 5 Changes in food security index and cultivated land functional values in the study area from 2000 to 2020

指标	2000 年	2010 年	2020 年	指标	2000 年	2010 年	2020 年
粮食安全指数	0.44	0.43	0.39	景观游憩功能值	0.41	0.40	0.42
生产功能值	14 516.80	22 075.8	20 805.02	社会保障功能值	83.48	81.44	57.01
生态功能值	292.35	546.40	400.00				

2000—2020 年,研究区粮食安全与耕地景观游憩功能均呈负相关关系,且 2010、2020 年两者的相关关系具有统计学意义($p < 0.05$)(表 6)。2000 年,研究区景观游憩功能主导区面积为 3 854 km²,粮食总产量为 682 万 t;到 2020 年,研究区景观游憩功能主导区面积增加了 15%,但粮食总产量减少了 22%。这一结果表明研究区耕地景观游憩功能的无序拓展会对区域内粮食安全造成不利影响。

表 6 2000—2020 年研究区粮食安全与耕地多功能相关分析

Tab. 6 Correlation analysis between food security and multifunctional cultivated land in the study area from 2000 to 2020

年份	指标	粮食安全指数	生产功能值	生态功能值	景观游憩功能值
2000	生产功能值	0.667**			
	生态功能值	0.665*	0.889**		
	景观游憩功能值	-0.191	0.643	-0.011	
	社会保障功能值	0.925**	0.638**	0.609**	-0.166
2010	生产功能值	0.815**			
	生态功能值	0.730**	0.750**		
	景观游憩功能值	-0.590**	-0.677**	-0.487*	
	社会保障功能值	0.915**	0.800**	0.622**	-0.601**
2020 年	生产功能值	0.835**			
	生态功能值	0.813**	0.896**		
	景观游憩功能值	-0.547*	-0.592*	-0.588**	
	社会保障功能值	0.641**	0.683**	0.681**	-0.535*

注:“*”“**”分别表示 Pearson 相关分析结果在 $p < 0.05$ (双侧)和 $p < 0.01$ (双侧)水平上具有统计学意义。

4 结束语

本研究以重庆主城区都市区为研究区,通过对 2000—2020 年研究区内耕地资源数量变化、耕地多功能时空演变特征和粮食安全对耕地多功能时空演变的响应进行分析,得到以下结果。

1) 研究区耕地总面积由 2000 年的 16 586.73 km² 减少至 2020 年的 10 908.97 km²,年均减少 283.9 km²;

从生产、生态、景观游憩、社会保障等方面构建耕地多功能评价指标体系,测算研究区耕地各项功能值,得到耕地各功能的空间分布状况,结果显示研究区耕地各项功能的空间分布有明显差异。

2) 2000—2020年研究区耕地生产、生态及社会保障功能空间分布变化明显而景观游憩功能不明显,各项功能热点区面积及占比呈波动变化。在此期间,研究区耕地生产、生态及社会保障功能热点区面积占比总体呈下降趋势,其中生产功能热点区面积占比由48%下降到45%,生态功能热点区面积占比由32%下降到21%,降幅较大;社会保障功能热点区面积占比在2000—2010年下降了9%,在2010—2020年则增加了6%。此外研究区耕地景观游憩功能热点区面积占比在2000—2020年总体呈上升趋势,增幅约为12%。

3) 2000—2020年研究区粮食安全指数与耕地生产、生态及社会保障功能值呈正相关关系,表明研究区粮食安全与耕地的这3项功能协调发展;同时,研究区粮食安全指数与耕地景观游憩功能值呈负相关关系,表明研究区耕地景观游憩功能的无序拓展会对区域内粮食安全造成不利影响。

由于粮食安全与耕地生产、生态、社会保障功能协调发展,因此在研究区应充分发挥“基本农田保护红线”“生态红线”以及“城镇建设限制边界线”的约束作用,确保耕地数量稳定;同时,应加强高标准农田和农业基础设施建设,整理细碎地块,提高耕作效率,着重打造现代规模化农业;还应加大对农产品良种及相关科技的持续投入,合理减少农药、化肥的使用以促进作物绿色、健康地生长。基于耕地景观游憩功能无序拓展会给粮食安全带来不利影响,在研究区需明确优先将耕地用于粮食生产,合理管控耕地“非农化”“非粮化”功能的空间布局;应坚决避免将区域内“基本农田”“高标准农田”等优质耕地用于耕地非粮化功能的发展,以最大程度的保障粮食作物最优的生产环境,从而维护区域粮食安全、促进区域稳定可持续发展。

山地中地势平坦区域既是城市发展重点区,又是优质耕地集中连片区,城市建设与耕地高效利用之间的冲突将长期存在。耕地多功能发展是缓解上述冲突的重要手段。优质耕地作为保障区域粮食产量的核心物质资源,与耕地数量、质量及功能多元化拓展密切相关,探析粮食安全对耕地多功能时空演化的响应关系,对有效缓解城市建设与耕地利用间的冲突、保证区域粮食生产和促进区域稳定可持续发展具有重要意义。

参考文献:

- [1] 宋小青,欧阳竹. 1999—2007年中国粮食安全的关键影响因素[J]. 地理学报, 2012, 67(6): 793-803.
SONG X Q, OUYANG Z. Key influencing factors of food security guarantee in China during 1999—2007[J]. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(6): 793-803.
- [2] 张元红,刘长全,国鲁来. 中国粮食安全状况评价与战略思考[J]. 中国农村观察, 2015(1): 2-143.
ZHANG Y H, LIU C Q, GUO L L. Evaluation and strategic thinking of China's food security situation[J]. China Rural Survey, 2015(1): 2-14.
- [3] 李国祥. 2020年中国粮食生产能力及其国家粮食安全保障程度分析[J]. 中国农村经济, 2014(5): 4-12.
LI G X. Analysis of China's grain production capacity and the degree of national food security in 2020[J]. China Rural Economy, 2014(5): 4-12.
- [4] 孔少林. 强化耕地质量建设举措夯实国家粮食安全基础[J]. 中国农业综合开发, 2021(9): 28-30.
KONG S L. Strengthening the construction of cultivated land quality and consolidating the foundation of national food security[J]. Agricultural Comprehensive Development in China, 2021(9): 28-30.
- [5] 杜翌. 坚守耕地红线保障粮食安全[J]. 资源与人居环境, 2021(6): 28-30.
DU Z. Adhere to the red line of cultivated land to ensure food security[J]. Resources Inhabitant and Environment, 2021(6): 28-30.
- [6] 张鹏岩,庞博,何坚坚,等. 耕地生产力与粮食安全耦合关系与趋势分析:以河南省为例[J]. 地理科学, 2017, 37(9): 1392-1402.
ZHANG P Y, PANG B, HE J J, et al. Coupling relationship and trend of cultivated land productivity and food security: a case study of Henan Province[J]. Scientia Geographica Sinica, 2017, 37(9): 1392-1402.
- [7] 余振国,胡小平. 我国粮食安全与耕地的数量和质量关系研究[J]. 地理与地理信息科学, 2003, 19(3): 45-49.
YU Z G, HU X P. Research on the relation of food security and cultivated land's quantity and quality in China[J]. Geography and Geo-Information Science, 2003, 19(3): 45-49.
- [8] 傅泽强,蔡运龙,杨友孝,等. 中国粮食安全与耕地资源变化的相关分析[J]. 自然资源学报, 2001, 16(4): 313-319.
FU Z Q, CAI Y L, YANG Y X, et al. Research on the relationship of cultivated land change and food security in China[J]. Journal of Natural Resources, 2001, 16(4): 313-319.

- [9] 宋小青, 欧阳竹. 耕地多功能内涵及其对耕地保护的启示[J]. 地理科学进展, 2012, 31(7): 859-868.
SONG X Q, OUYANG Z. Connotation of multifunctional cultivated land and its implications for cultivated land protection[J]. Progress in Geography, 2012, 31(7): 859-868.
- [10] BRYAN B A, KING D, WARD J R. Modeling and mapping agricultural opportunity costs to guide landscape planning for natural resource management[J]. Ecological Indications, 2011, 11(1): 199-208.
- [11] AUBRY C, RAMAMONJISOA J, DABAT M-H, et al. Urban agriculture and land use in cities: an approach with the multifunctionality and sustainability concepts in the case of Antananarivo (Madagascar)[J]. Land Use policy, 2012, 29(2): 429-439.
- [12] SHAW M R, PENDLETON L, CAMERON D R, et al. The impact of climate change on California's ecosystem services[J]. Climate Change, 2011, 109(1): 465-484.
- [13] 田玉军, 李秀彬, 辛良杰. 农业劳动力机会成本上升对农地利用的影响: 以宁夏回族自治区为例[J]. 自然资源学报, 2009, 24(3): 369-377.
TIAN Y J, LI X B, XIN L J. Impacts of the rise of labor opportunity cost on agricultural land use changes: a case study of Ningxia Hui Autonomous Region[J]. Journal of Natural Resources, 2009, 24(3): 369-377.
- [14] VITOUSEK P M, NAYLOR R, CREWS T, et al. Nutrient imbalances in agricultural development[J]. Science, 2009, 324(5934): 1519-1520.
- [15] GUO J H, LIU X J, ZHANG Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. Science, 2010, 327(5968): 1008-1010.
- [16] 冉彩虹, 李阳兵, 梁鑫源. 重庆市耕地利用转型演变特征研究[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2020, 37(3): 119-128.
RAN C H, LI Y B, LIANG X Y. Evolution characteristics and occurrence mechanisms of cultivated land use transition in Chongqing[J]. Journal of Chongqing Normal University (Natural Science), 2020, 37(3): 119-128.
- [17] BARI I P. Territorial sustainability and multifunctional agriculture: a case study[J]. Agriculture and Agricultural Science Procedia, 2016, 8: 467-474.
- [18] 王成, 彭清, 唐宁, 等. 2005—2015 耕地多功能时空演变及其协同与权衡研究: 以重庆市沙坪坝区为例[J]. 地理科学, 2018, 38(4): 590-599.
WANG C, PENG Q, TANG N, et al. Spatio-temporal evolution and the synergy and trade-off relationship of cultivated land multi-function in 2005—2015: a case of Shapingba District, Chongqing City[J]. Scientia Geographica Sinica, 2018, 38(4): 590-599.
- [19] 金贵, 邓祥征, 张倩, 等. 武汉城市圈国土空间综合功能分区[J]. 地理研究, 2017, 36(3): 541-552.
JIN G, DENG X Z, ZHANG Q, et al. Comprehensive function zoning of national land space for Wuhan Metropolitan Region[J]. Geographical Research, 2017, 36(3): 541-552.
- [20] 杨勇, 任志远, 樊新生. 中原城市群土地利用综合评价与分区研究[J]. 经济地理, 2017, 37(9): 177-184.
YANG Y, REN Z Y, FAN X S. Land use comprehensive evaluation and regionalization in Zhongyuan Urban Agglomeration[J]. Economic Geography, 2017, 37(9): 177-184.
- [21] 吴大放, 刘艳艳, 张晓露, 等. 1990—2014 年广州市耕地功能评价分析[J]. 中国农业资源与区划, 2019, 40(2): 64-72.
WU D F, LIU Y Y, ZHANG X L, et al. Analysis of cultivated land function evaluation in Guangzhou City from 1990 to 2014[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2019, 40(2): 64-72.
- [22] 张利国, 王占岐, 柴季, 等. 湖北省耕地多功能地区差异及综合分区研究[J]. 地域研究与开发, 2019, 38(5): 125-130.
ZHANG L G, WANG Z Q, CHAI J, et al. Multifunction spatial differentiation and comprehensive zoning of cultivated land in Hubei Province[J]. Areal Research and Development, 2019, 38(5): 125-130.
- [23] 信桂新. 山地丘陵区土地资源流动与整合机制研究[D]. 重庆: 西南大学, 2016.
XIN G X. Mechanism research on mobility and integration of land resource in mountainous and hilly areas[D]. Chongqing: Southwest University, 2016.
- [24] 邹於娟. 重庆市耕地利用概况及建议[J]. 南方农业, 2019, 13(16): 28-33.
ZOU Y J. General situation and suggestions on cultivated land use in Chongqing[J]. South China Agriculture, 2019, 13(16): 28-33.
- [25] 蒲玉琳, 谢德体, 屈明, 等. 渝西丘陵区土地利用方式、景观位置对土壤养分的影响[J]. 水土保持学报, 2010, 24(5): 35-39.
PU Y L, XIE D T, QU M, et al. Effects of land use and landscape position on soil nutrient in Hilly Region of Chongqing West[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(5): 35-39.
- [26] 赵伟, 黄婧, 范莉, 等. 重庆近 5 年耕地集约利用水平变化研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2013, 35(7): 115-120.

- ZHAO W, HUANG J, FAN L, et al. On the change in intensive use level of cultivated land in Chongqing during 2006—2010 [J]. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2013, 35(7): 115-120.
- [27] 范业婷, 金晓斌, 项晓敏, 等. 苏南地区耕地多功能评价与空间特征分析[J]. *资源科学*, 2018, 40(5): 980-992.
FAN Y T, JIN X B, XIANG X M, et al. Evaluation and spatial characteristics of arable land multifunction in southern Jiangsu [J]. *Resources science*, 2018, 40(5): 980-992.
- [28] 杜国明, 张露洋, 徐新良, 等. 近 50 年气候驱动下东北地区玉米生产潜力时空演变分析[J]. *地理研究*, 2016, 35(5): 864-874.
DU G M, ZHANG L Y, XU L X, et al. Spatial-temporal characteristics of maize production potential change under the background of climate change in Northeast China over the past 50 years[J]. *Geographical Research*, 2016, 35(5): 864-874.
- [29] 姜广辉, 张凤荣, 孔祥斌, 等. 耕地多功能的层次性及其多功能保护[J]. *中国土地科学*, 2011, 25(8): 42-47.
JIANG G H, ZHANG F R, KONG X B, et al. The different levels and the protection of multi-functions of cultivated land[J]. *China Land Science*, 2011, 25(8): 42-47.
- [30] 朱金峰, 周艺, 王世新, 等. 白洋淀湿地生态功能评价及分区[J]. *生态学报*, 2020, 40(2): 459-472.
ZHU J F, ZHOU Y, WANG S X, et al. Ecological function evaluation and regionalization in Baiyangdian Wetland[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(2): 459-472.
- [31] 孙灏, 胡佳琪, 崔雅静, 等. 基于多源遥感数据的生态系统服务功能时空演变趋势分析[J]. *测绘通报*, 2021(4): 1-7.
SUN H, HU J Q, CUI Y J, et al. Spatiotemporal evolution of ecosystem service functions based on multi-source remote sensing data[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2021(4): 1-7.
- [32] 王敏, 阮俊杰, 姚佳, 等. 基于 InVEST 模型的生态系统土壤保持功能研究: 以福建宁德为例[J]. *水土保持研究*, 2014, 21(4): 184-189.
WANG M, RUAN J J, YAO J, et al. Study on soil conservation service of ecosystem based on InVEST model: a case study of Ningde City, Fujian Province[J]. *Research of Soil and water conservation*, 2014, 21(4): 184-189.
- [33] 褚琳, 张欣然, 王天巍, 等. 基于 CA-Markov 和 InVEST 模型的城市景观格局与生境质量时空演变及预测[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(12): 4106-4118.
CHU L, ZHANG X R, WANG T W, et al. Spatial-temporal evolution and prediction of urban landscape pattern and habitat quality based on CA-Markov and InVEST model[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(12): 4106-4118.
- [34] 何山. 基于多源信息的耕地多功能评价与用途分区研究: 以杭州市为例[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
HE S. Study on multifunction evaluation and zoning of farmland based on multi-source information: a case of Hangzhou City [D]. Hangzhou: Zhejiang university, 2019.
- [35] 刘宇, 吕一河, 傅伯杰. 景观格局-土壤侵蚀研究中景观指数的意义解释及局限性[J]. *生态学报*, 2011, 31(1): 267-275.
LIU Y, LÜ Y H, FU B J. Implication and limitation of landscape metrics in delineating relationship between landscape pattern and soil erosion[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(1): 267-275.
- [36] 王惟帅, 高悦, 刘宏元, 等. 基于欧式距离法的成都农业可持续发展评价[J]. *中国农业资源与区划*, 2019, 40(7): 209-215.
WANG W S, GAO Y, LIU H Y, et al. Evaluation on the agricultural sustainable development of Chengdu based on Euclidean distance theory[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2019, 40(7): 209-215.
- [37] 陈午, 许新宜, 王红瑞, 等. 基于改进序关系法的北京市水资源可持续利用评价[J]. *自然资源学报*, 2015, 30(1): 164-176.
CHEN W, XU X Y, WANG H R, et al. The evaluation of water resources sustainable utilization in Beijing based on improved rank correlation analysis[J]. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(1): 164-176.
- [38] 邵立平. 衡量粮食安全的数量指标[J]. *民营科技*, 2012(6): 106.
SHAO L P. Quantitative indicators for measuring food security[J]. *Non-State Running Science & Technology Enterprises*, 2012(6): 106.
- [39] 臧文如, 傅新红, 熊德平. 财政直接补贴政策对粮食数量安全的效果评价[J]. *农业技术经济*, 2010(12): 84-93.
ZANG W R, FU X H, XIONG D P. Effect evaluation of direct financial subsidy policy on grain quantity security[J]. *Journal of Agrotechnical Economics*, 2010(12): 84-93.
- [40] JOPKE C, KREYLING J, MAES J, et al. Interactions among ecosystem services across Europe; bagplots and cumulative correlation coefficients reveal synergies, trade-offs, and regional patterns[J]. *Ecological Indicators*, 2015, 49: 46-52.
- [41] 蒋昌禄. 对重庆市粮食自给与可持续发展的思考[J]. *南方农业(园林花卉版)*, 2011, 5(6): 32-34.
JIANG C L. Reflections on grain self-sufficiency and sustainable development in Chongqing[J]. *South China Agriculture*, 2011, 5(6): 32-34.

Resources, Environment and Ecology in Three Gorges Area**Research on the Response of Food Security to the Spatial and Temporal Evolution of Multifunctional Cultivated Land in Mountain Cities: Taking Chongqing Metropolitan Area as an Example**WEI Ya^{1,2}, ZHANG Hong^{1,2}, ZHANG Xin^{1,2}

(1. College of Geography and Tourism, Chongqing Normal University;

2. The Key Laboratory of GIS Application and Research, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China)

Abstract: To analyze the response of food security to the spatial and temporal evolution of cultivated land function in mountain cities, so as to promote their stable and sustainable development. With the help of GAZE, INVEST and GIS models, the functions of production, ecology, landscape recreation and social security of cultivated land in Chongqing Metropolitan Area were calculated the temporal and spatial evolution characteristics of each function of cultivated land were analyzed by Getis-Ord G_i^* , and the index of food security was expressed by the index related to the quantity of grain, and Pearson was used to judge the response relationship of food security to each function of cultivated land. The results show: 1) From 2000 to 2020, the cultivated land in the study area decreased by 5 677.76 km², with an average annual decrease of 283.9 km². 2) From the perspective of the changes of cultivated land functional hotspots, the production and ecological functions of cultivated land showed a downward trend, with a large decrease of 14%~22% in the first decade and a decrease of 10% in the second decade. The social security function showed a trend of first declining and then slowly increasing. The overall increase trend of landscape recreation function was about 10%. 3) From 2000 to 2020, food security and cultivated land production, ecology and social security functions developed in coordinated development, but the disorderly expansion of cultivated land landscape recreation function had an adverse impact on food security. The above results suggest that in order to ensure the food security of the study area, it is necessary to strictly adhere to the “red line of cultivated land” and prevent excessive conversion of cultivated land. At the same time, it is also necessary to appropriately control the “non-agricultural” and “non-grain” functions such as cultivated land landscape recreation. On the premise of ensuring regional food security, the utilization rate of cultivated land in mountainous cities should be improved and the efficiency of cultivated land should be improved.

Keywords: arable land patch; multifunctional; food security; correlation analysis; Chongqing Metropolitan Area

(责任编辑 方 兴)