

数量—质量—生态“三位一体”视角下云南省 耕地利用格局变化分析与风险评估

刘川¹, 张述清², 黄义忠¹, 李永平^{1,2}

(1.昆明理工大学 国土资源工程学院, 云南 昆明 650093; 2.云南省国土资源规划设计研究院, 云南 昆明 650216)

摘要: [目的] 多角度研究云南省耕地利用格局变化, 划分耕地利用风险等级, 为研究区耕地保护政策与管理策略提供依据, 同时为其他地区耕地保护提供参考与借鉴。[方法] 基于2011, 2021年土地利用调查数据, 从耕地保护数量—质量—生态“三位一体”视角出发, 利用景观指数、压力—状态—响应(PSR)模型等方法综合分析耕地利用格局变化特征, 并依据其动态变化运用状态空间模型划分耕地利用风险等级。[结果] ①2011—2021年云南省耕地数量变化具有区域化差异, 变化显著的区县呈现出“全局零散、局部聚集”的分布特征。②耕地平均土层厚度下降, 土壤有机质含量和阳离子交换能力有所提升; 耕地斑块密度(PD)上升1.251, 聚集度指数(AI)和平均形状指数(MSI)下降5.672%和0.055, 说明耕地破碎化程度加剧, 集聚性减弱, 斑块形状趋于规则。③耕地生态安全水平总体下降12.67%, 整体呈现“南高北低, 中部两级化”的空间格局。④综合耕地利用动态变化对云南省进行耕地利用风险分区并提出调控建议。[结论] 滇东北、滇西南及滇中为云南省耕地变化热点, 全省土壤质量提升但破碎化加剧, 耕地生态安全水平呈现下降趋势, 需结合风险分区因地制宜精准治理。

关键词: 耕地数量; 耕地质量; 生态安全; 格局变化; 风险评估; 云南省

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)02-0371-12

中图分类号: F301.2

文献参数: 刘川, 张述清, 黄义忠, 等. 数量—质量—生态“三位一体”视角下云南省耕地利用格局变化分析与风险评估[J]. 水土保持通报, 2025, 45(2): 371-382. Liu Chuan, Zhang Shuqing, Huang Yizhong, et al. Analysis and risk assessment of cultivated land use pattern change in Yunnan Province from quantity-quality-ecology tripartite perspective [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(2): 371-382. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2025.02.037; CSTR:32312.14.stbctb.2025.02.037.

Analysis and risk assessment of cultivated land use pattern change in Yunnan Province from quantity-quality-ecology tripartite perspective

Liu Chuan¹, Zhang Shuqing², Huang Yizhong¹, Li Yongping^{1,2}

(1. Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650093, China; 2. Land and Resources Planning and Design Institute of Yunnan Province, Kunming, Yunnan 650216, China)

Abstract: [Objective] The change in cultivated land use patterns in Yunnan Province was studied from multiple perspectives, and the risk level of cultivated land use was divided to inform protection policies and management strategies to provide a reference for the protection of cultivated land in other areas. [Methods] Utilizing land use survey data from 2011 and 2021, and adopting a quantity-quality-ecology tripartite perspective, we comprehensively analyzed the characteristics of changes in cultivated land use patterns by employing landscape indices and the pressure-state-response (PSR) model. Based on the state-space model, we categorized the risk levels of cultivated land use. [Results] ① Regional variations were observed in the changes of cultivated land quantity in Yunnan Province from 2011 to 2021, with districts and counties

收稿日期: 2024-11-17

修回日期: 2024-12-30

采用日期: 2024-12-30

资助项目: 国家自然科学基金项目“滇中城市群‘三生空间’多尺度耦合及多目标协同优化研究”(42301304); 云南省哲学社会科学基础研究基地项目“云南省耕地时空分布特征与数量质量动态平衡研究”(ZD202218)

第一作者: 刘川(1998—), 男(白族), 云南省大理市人, 硕士研究生, 研究方向为国土空间规划。Email: liuchuan@stu.kust.edu.cn.

通信作者: 张述清(1965—), 男(汉族), 重庆市人, 硕士, 教授级高级工程师, 主要从事国土空间调查与国土空间规划的研究。Email: xw2015@Kust.edu.cn.

exhibiting significant changes and displaying a distribution pattern characterized by ‘overall scattered and local aggregation.’ ② The average soil layer thickness of cultivated land decreased, the content of soil organic matter and cation exchange capacity increased, and the patch density (PD) of cultivated land increased by 1.251; aggregation index (AI) and mean shape index (MSI) decreased by 5.672% and 0.055, respectively, indicating that the degree of farmland fragmentation increased, agglomeration weakened, and patch shape tended to be regular. ③ The overall level of ecological security of cultivated land declined, revealing a spatial pattern of ‘high in the south, low in the north, polarized in the middle.’ Based on the dynamic changes in cultivated land, we conducted risk zoning for cultivated land use in Yunnan Province and proposed regulatory suggestions. [Conclusion] Northeast, southwest, and central Yunnan are hotspots for cultivated land change in Yunnan Province. Although soil quality across the province has improved, soil fragmentation has intensified. The ecological security level of cultivated land has shown a downward trend, necessitating precise management tailored to local conditions and risk zones.

Keywords: cultivated land quantity; cultivated land quality; ecological security; pattern changes; risk assessment; Yunnan Province

耕地是人类赖以生存和发展的重要物质资源和基础^[1],是保障国家粮食安全的基石^[2]。根据第三次全国国土调查(简称“三调”)相关数据,中国耕地总面积为 $1.28 \times 10^8 \text{ hm}^2$,相比此前的第二次全国国土调查(简称“二调”),10 a 间耕地减少了 $7.53 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 。建设占用、生态退耕、灾毁与农业结构调整等因素导致耕地资源数量不断减少,同时耕地质量退化,生态风险加剧等多种问题并存。国务院印发的《关于加强耕地保护和改进占补平衡的意见》指出要坚持最严格的耕地保护制度和节约用地制度,从耕地数量、质量、生态全方面保障耕地安全,标志着耕地保护向“三位一体”的新格局迈进^[3]。耕地“三位一体”保护是对耕地的数量、质量与生态条件的综合保护,是一个具有层次性和系统性的概念,实质上是对农田生态系统的生产、生态和生活功能的维护和提升^[4]。因此,在耕地保护“三位一体”视角下综合分析耕地利用格局变化特征,对于耕地保护政策的制定、粮食安全的保障以及耕地的可持续发展具有重要指导意义^[5]。

在耕地压力持续增加的大背景下,国内外学者围绕耕地变化进行了广泛的探索。在数量和质量上,研究多聚焦于耕地时空演变特征^[6]、利用转型^[7]、驱动机制^[8]、质量评价^[9]、景观格局^[10]、非农化^[11]、非粮化等^[12]方面,如黄绘青等^[13]基于数学指数模型和地理探测器对长株潭城市群的耕地数量演变特征和驱动机制进行了分析与探讨,王学等^[14]基于景观格局指数揭示了长时序的中国耕地景观细碎化时空演变特征。

近年来耕地生态安全得到进一步的关注与研究,相关研究主要聚焦于以下 3 个方面:①耕地生态安全测度研究,目前具有较强逻辑性和系统性的 PSR (压力—状态—响应)模型被广泛运用于耕地生态安

全指标体系的构建,如冷志杰等^[15]和李丹等^[16]基于 PSR 模型分别评价了东北地区 and 青藏高原地区耕地生态安全格局;②耕地生态安全影响因素研究,如张冰结等^[17]认为区域耕地生态安全水平主要受社会经济压力、农业科技水平、生态环境承载力水平和人口数量的影响;③耕地生态安全调控对策研究,如范树平等^[18]运用障碍度模型识别了安徽省粮食主产区耕地生态安全的主要障碍因子,并提出了具体对应调控策略。总体来说,前人在耕地保护方面进行了诸多探索并取得很多成果,但大多数研究只侧重数量、质量或生态中的单个方面,数量—质量—生态定量化及融合体系尚需进一步探索,本文尝试从数量—质量—生态“三位一体”综合讨论耕地利用格局演变并划分耕地利用风险等级,明晰耕地保护重点。

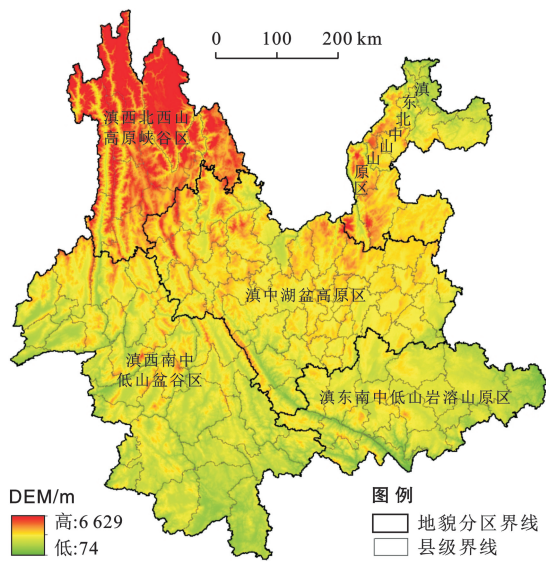
本文依托“二调”“三调”数据,以云南省为研究区,在数量—质量—生态“三位一体”视角下综合讨论 2011—2021 年云南省耕地利用格局演变,并在变化态势下划分耕地利用风险等级,明晰耕地保护侧重点,以期制定差别化的区域耕地保护政策与管理策略提供有益参考,助力从宏观层面统筹空间规划和因地制宜施策,保障粮食安全。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

云南省位于中国西南部,国土面积 $3.94 \times 10^5 \text{ km}^2$,下辖 8 个地级市,8 个自治州,129 个县级行政区,境内地形起伏不平,山地、盆地、高原和河谷相间分布,形成了复杂的地貌类型和典型的立体性气候。耕地约占全省土地总面积的 14%,主要分布于盆地和山丘区,零星分散,局部聚集。为更好地凸显云南省耕

地的区域特征,立足地貌条件将全省划分为五大地貌分区(图 1),分别包含 14,51,19,12,33 个县级单元。



注:该图基于自然资源部标准地图服务系统下载的审图号 GS(2019)1822 号的标准地图制作,边界无修改。下同。

图 1 云南省地貌分区图

Fig.1 Geomorphologic zonalization map of Yunnan Province

1.2 数据来源

土地利用数据来源于云南省第三次全国国土调查和第二次全国国土调查成果,为空间矢量数据,转换为 $30\text{ m} \times 30\text{ m}$ 的栅格数据;土壤有机质含量和阳离子交换能力数据来源于世界土壤数据库(使用顶层土壤属性数据,0—30 cm),土层厚度数据来源于国家青藏高原科学数据中心(<http://data.tpdc.ac.cn/>),栅格像元分辨率重采样为 $30\text{ m} \times 30\text{ m}$;社会经济数据来源于《云南省统计年鉴》和各市县《统计年鉴》《国民经济和社会发展统计公报》以及中国经济社会大数据平台等,采用临近点的线性趋势方法对个别缺失数据进行插补。

2 研究方法

本研究从数量—质量—生态“三位一体”视角出发,以数学指数模型分析耕地数量利用格局变化,以耕地土壤质量和景观破碎度表征耕地质量利用格局变化,构建多指标协同的“压力—状态—响应”(PSR)生态安全评价体系来量化耕地生态安全格局变化,并基于三者的动态变化和状态空间模型测算耕地利用风险指数,以县级行政区为单位将云南省划分为 4 个耕地利用风险区:高风险区、较高风险区、较低风险区和低风险区。

2.1 耕地数量变化

2.1.1 耕地相对变化率 通过对比研究区整体和局

部地区的耕地变化动态度^[19],明晰各研究单元间耕地变化剧烈程度的差异性。计算公式为:

$$V = \frac{S_a \times |U_b - U_a|}{U_a \times |S_b - S_a|} \quad (1)$$

式中: V 为耕地相对变化率; U_a 和 U_b 分别为研究期初与期末各研究单元的耕地面积; S_a 和 S_b 分别为期初和期末研究区耕地面积。

2.1.2 耕地流失率 依据耕地流失率指数(K)^[20] 计算耕地的年平均流失情况。为直观体现区域差异,使用自然间断点法将研究区划分为耕地无流失($K \leq 0\%$)、耕地缓慢流失($0\% < K \leq 2.50\%$)、耕地快速流失($2.50\% < K \leq 3.49\%$)、耕地严重流失($K > 3.49\%$) 4 种类型。计算公式为:

$$K = \frac{S_{ii} - S_{ij}}{S_{ii}n_{j-i}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: K 为耕地流失率; S_{ii} 为研究期初(年份 i) 的耕地面积; S_{ij} 为研究期末(年份 j) 的耕地面积; n_{j-i} 为间隔年数。

2.2 耕地质量变化

耕地质量主要受到本底资源禀赋因素和人类活动的影响,耕地破碎化是人为活动对耕地影响的直观体现,破碎化不仅会破坏耕地系统的稳定性,还会大幅降低农业生产效率和效益,增加劳动投入和管理成本^[21]。本研究以县级行政区为研究单元,通过耕地土壤质量和景观破碎度来表征耕地质量以及分析其变化特征。参考《耕地质量等级》(GB/T 33469—2016)国家标准,选取耕地土层厚度、土壤有机质含量和阳离子交换能力来表征耕地土壤质量变化情况;从景观指数中选取斑块密度(PD)、平均形状指数(MSI)和聚集度指数(AI)分析耕地斑块破碎度、形状复杂程度和聚集度。其中,PD 值越大说明耕地斑块越破碎,MSI 值越大说明斑块不规则程度越高,AI 值越大越大说明斑块聚集性越好。相关计算公式为:

$$PD = \frac{n}{A} \quad (3)$$

$$MSI = \left(0.25 \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{\sqrt{a_i}} \right) / n \quad (4)$$

$$AI = 2 \ln n + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n P_{ij} \ln P_{ij} \quad (5)$$

式中: n 和 A 为研究单元耕地斑块数目和耕地总面积; l_i 和 a_i 为单个图斑周长和面积; P_{ij} 为斑块类型 i 与 j 相邻的概率。

2.3 基于 PSR 模型的耕地生态格局

2.3.1 指标体系构建 PSR(压力—状态—响应)模型是由联合国 OECD 和 UNEP 提出的环境与生态评价指标体系确定方法,是目前较为成熟的区域生态

安全评价模型之一^[22]。该模型以因果关系为基础,强调压力—状态—响应的逻辑思维过程,其指标的选取综合考虑现状特征,同时兼顾潜在影响,能够较科学、全面地评估区域耕地生态安全状况。因此,本研究以前人的研究成果为基础^[16,23-25],结合研究区实际情况,遵循科学性、综合性、代表性和可获取性原则,基于 PSR 模型从压力(P)、状态(S)和响应(R)这

3 个维度共选取 14 个指标构建云南省耕地生态安全水平评价体系(表 1)。

2.3.2 耕地生态安全指数计算 为消除指标数量级及量纲差异对计算结果的影响,采用极差标准化法对指标数据进行标准化;熵权法是根据数据的离散程度定量计算权重的客观赋值法,本文选择熵权法来计算各指标权重,进一步得到耕地生态安全指数(表 2)。

表 1 云南省耕地生态安全水平评价指标体系

Table 1 Evaluation index system for ecological security level of cultivated land in Yunnan Province

目标层	准则层	指标层	指标解析	指标性质
云南省耕地生态安全水平	压力指标(P)	人口密度/(人·km ⁻²)	总人口/土地总面积	-
		城镇化水平/%	城镇人口/总人口	-
		化肥施用强度(kg·hm ⁻²)	化肥施用量/耕地面积	-
		农药使用强度(kg·hm ⁻²)	农药使用量/耕地面积	-
		25°以上耕地面积比例/%	25°以上耕地面积/耕地总面积	-
		土地垦殖率/%	耕地面积/土地总面积	+
	状态指标(S)	地形位指数	基于坡度和高程描述地表地形特征的指数	-
		复种指数/%	农作物播种面积/耕地面积	+
		耕地粮食单产/(kg·hm ⁻²)	粮食总产量/耕地面积	+
		单位耕地净初级生产力/(g·m ⁻²)	耕地总净初级生产力/耕地面积	+
	响应指标(R)	大面积图斑所占比例/%	大于 5 hm ² 耕地面积/耕地总面积	+
		农业产值占 GDP 比重/%	农业总产值/地区生产总值	+
		单位耕地农业机械总动力/(kW·hm ⁻²)	农业机械总动力/耕地面积	+
		有效灌溉面积所占比例/%	有效灌溉面积/耕地面积	+

注:“+”为正向指标,“-”为负向指标。

表 2 耕地生态安全指数计算过程及公式

Table 2 Calculation process and formula of cultivated land ecological security index

指数	计算公式	说明
标准化处理	正向指标: $X'_{ij} = \frac{X_{ij} - \min(X_{ij} \cdots X_{nj})}{\max(X_{1i} \cdots X_{ni}) - \min(X_{ij} \cdots X_{nj})}$ 负向指标: $X'_{ij} = \frac{\max(X_{1i} \cdots X_{ni}) - X_{ij}}{\max(X_{1i} \cdots X_{ni}) - \min(X_{ij} \cdots X_{nj})}$	X_{ij} 为第 i 年第 j 个指标值; X'_{ij} 为第 i 年第 j 个指标的标准化值
指标比重	$P_{ij} = \frac{X'_{ij}}{\sum_{i=1}^n X'_{ij}}$	P_{ij} 为第 i 年第 j 个指标的标准化比重
信息熵	$E_{ij} = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n P_{ij} \times \ln(P_{ij})$	E_{ij} 为第 i 年第 j 个指标的信息熵; n 为第 j 个指标的数量
指标权重	$W_{ij} = \frac{1 - E_{ij}}{\sum_{j=1}^k (1 - E_{ij})}$	W_{ij} 为第 i 年第 j 个指标的权重; k 为第 j 个指标所属准则层的指标数量总和
耕地生态安全指数	$F_i = \sum_{j=1}^n W_{ij} \times X'_{ij}$	F 为第 i 年耕地生态安全指数

2.4 基于状态空间模型的耕地利用风险评估

2.4.1 耕地利用风险评价体系 为在耕地利用格局变化态势下明晰耕地保护重点,本文综合数量、质量、

生态安全 3 个维度构建耕地利用风险评价体系(表 3),并结合熵权法和层次分析法综合确定各指标权重。

表 3 耕地利用风险指数指标权重

Table 3 Index weight of cultivated land utilization risk index

目标层	准则层	指标层	权重		
			熵权法	层次分析法	组合权重
耕地保护风险指数	耕地数量变化	相对变化率	0.012 5	0.104 0	0.058 3
		耕地流失率	0.178 7	0.207 9	0.193 3
	耕地质量变化	土层厚度变化量	0.025 9	0.012 3	0.019 1
		土壤有机质含量变化量	0.034 7	0.026 2	0.030 5
		阳离子交换能力变化量	0.052 0	0.016 5	0.034 3
		PD 变化值	0.118 3	0.043 9	0.081 1
		AI 变化值	0.158 3	0.061 2	0.109 8
		MSI 变化值	0.070 1	0.037 6	0.053 9
	耕地生态安全水平变化	压力指数变化值	0.094 3	0.145 8	0.120 1
		状态指数变化值	0.101 0	0.264 3	0.182 3
		响应指数变化值	0.154 2	0.080 3	0.117 3

2.4.2 耕地利用风险指数计算 状态空间模型是欧氏几何空间中一种用于定量描述不同因素耦合下的系统稳定状态的有效方法,由状态空间的原点与各要素的状态点构成的矢量模表示^[26]。本文采用原点到各指标组合下的风险状态点的矢量模(|OB|)与系统临界状态下的风险矢量模(|OH|)进行对比,用其比值作为各评价单元的耕地利用风险指数(cultivated land use risk index, CRI),以此测度该组合条件下的耕地利用生态风险状况。

(1) 原点与不同指标组合下的风险状态点所构成的矢量模|OB|。

$$|OB| = \sqrt{\sum_{j=1}^m (y_{ij} \times w_j)^2} \quad (6)$$

式中: m 为指标数量; y_{ij} 为指标标准化后的值; w_j 为指标 j 的权重。

(2) 原点与所有指标达到临界状态时的风险状态点所构成的矢量模|OH|。

$$|OH| = \sqrt{\sum_{j=1}^m (Z_j \times w_j)^2} \quad (7)$$

式中: Z_j 为指标 j 临界状态下的值; w_j 为指标 j 的权重。

(3) 耕地利用风险指数计算(CRI)。

$$CRI = \frac{|OB|}{|OH|} \quad (8)$$

此处的临界状态是指各个指标组合下的耕地利用生态风险达最大值,临界状态的设置对状态空间模型的评价结果有较大影响。依据已有参考文献^[27],采用极限值法确定各耕地利用风险指标的临界状态值,在通过标准化处理后所有指标的临界状态值均赋值为1。评价结果的值为 $[0, 1]$,CRI值越大说明评价单元的耕地利用风险越大。本文在借鉴前人研

究^[28]的基础上,结合研究区CRI值的频数分布直方图,采用等距法划分4个耕地利用风险等级:低风险 $[0, 0.35]$,较低风险 $(0.35, 0.40]$,较高风险 $(0.40, 0.45]$ 和高风险 $(0.45, 1]$ 。

3 结果与分析

3.1 耕地数量变化格局

从全省总体情况分析(见表4),近10a云南省耕地数量变化量大且有显著的区域差异特征。2011年和2021年云南省耕地的总面积分别为 6.23×10^6 和 5.38×10^6 hm^2 ,整体流失率达13.64%。滇西南和滇东北地区的耕地相对变化率和耕地流失率均较高,相对变化率分别为1.54,1.85,表明耕地数量变化程度较为剧烈;流失率分别为2.10%和1.85%,表明耕地数量年平均流失速率较高。滇东南地区耕地相对变化率和流失率均较低,分别为0.56,0.76%,为云南省总体耕地数量变化程度较平缓、流失速率较低的区域。

从县级单元尺度分析(图2),耕地数量变化显著的区县整体上呈现出“全局零散,局部聚集”的分布特征。耕地数量变化幅度和相对变化率较高的区县主要集聚于滇东北、滇西南地区和滇中中部地区,该类区县耕地变化面积较大且变化程度较剧烈。2011—2021年云南省共有70个区县耕地流失率超过云南省平均水平,有12个区县属于耕地严重流失型,在全省范围内零星分布;快速流失型和缓慢流失型分别有26和71个区县,空间分布较均匀;有20个区县属于无流失型,这些地区充分发挥了耕地占补平衡政策的作用,通过土地整治或开垦的方式增加了大量耕地,在保持省域内耕地面积稳定方面发挥了重要作用。

表 4 2011—2021 年云南省耕地面积总体变化

Table 4 Overall change of cultivated land area in Yunnan Province during 2011—2021

地貌分区	耕地面积/(10^4 hm 2)		耕地面积变化/ (10^4 hm 2)	相对变化率 (V)	耕地流失率 (K)/%
	2011 年	2021 年			
滇东北中山山原区	97	79	-18	1.36	1.85
滇东南中低山岩溶山原区	125	115	-10	0.56	0.76
滇中湖盆高原区	196	178	-18	0.68	0.93
滇西北高山高原峡谷区	31	28	-3	0.64	0.87
滇西南中低山盆谷区	174	137	-36	1.54	2.10
云南省总体	623	538	-85	—	1.36

注:耕地面积已作四舍五入取整处理,具体值可参见 <https://www.huaon.com/detail/393965.html> 和《2022 年云南统计年鉴》。

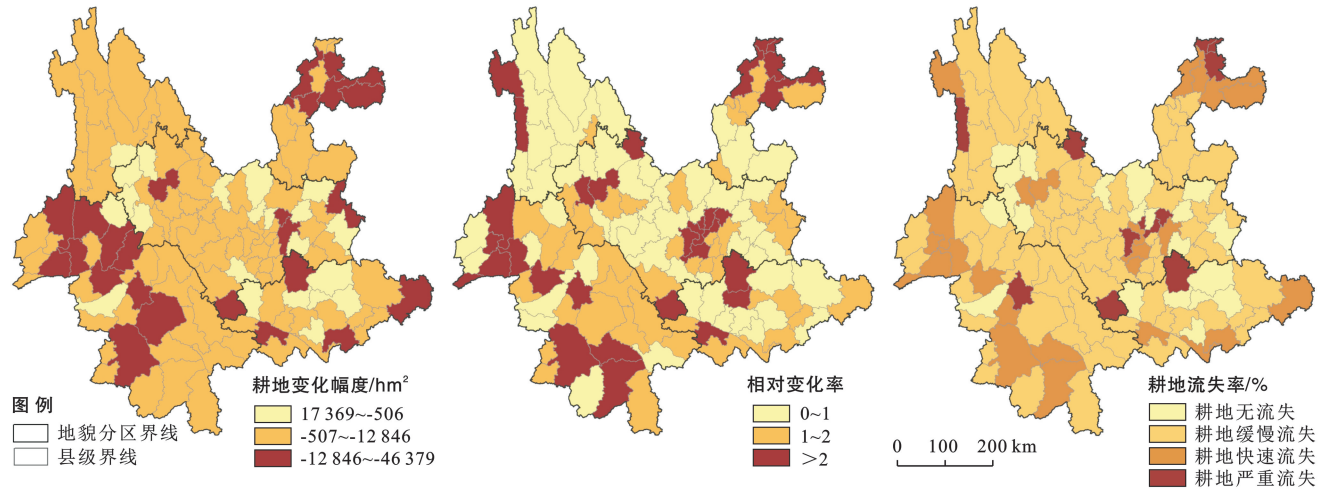


图 2 云南省县域耕地数量指数变化

Fig.2 Changes in index of cultivated land quantity in counties of Yunnan Province

3.2 耕地质量变化格局

3.2.1 耕地土壤质量变化 利用 GIS 的空间叠加功能得到 2011,2021 年云南省耕地土层厚度、土壤有机质含量和阳离子交换能力的平均值(表 5),以及 2011—2021 年各区县平均值变化率分布情况(图 3)。从整体水平分析,近 10 a 间云南省的耕地平均土层厚度呈现下降态势,整体平均值下降 0.12%,平均土壤有机质含量和平均阳离子交换能力呈现上升态势,

分别上升 0.60% 和 0.54%。对比区域变化情况,在土层厚度方面各区域平均值均下降,但下降幅度并不显著;在土壤有机质含量和阳离子交换能力方面,仅有滇东北地区平均值呈下降态势,分别下降 3.13% 和 0.41%。总体来看,近 10 a 间云南省通过积极实施土地整理复垦开发项目和推进高标准农田建设等一系列举措在一定程度上提升了耕地土壤质量的整体水平。

表 5 云南省耕地土壤质量平均情况

Table 5 Average soil quality of cultivated land in Yunnan Province

地貌分区	土层厚度/cm		有机质含量/($g \cdot kg^{-1}$)		阳离子交换能力/($cmol \cdot kg^{-1}$)	
	2011 年	2021 年	2011 年	2021 年	2011 年	2021 年
滇东北中山山原区	86.65	86.63	3.84	3.72	16.98	16.91
滇东南中低山岩溶山原区	93.44	93.35	7.75	7.83	18.21	18.30
滇中湖盆高原区	87.20	86.99	6.10	6.15	18.69	18.86
滇西北高山高原峡谷区	89.25	89.24	4.30	4.41	17.61	17.78
滇西南中低山盆谷区	97.00	96.96	8.92	8.96	20.01	20.06
云南省总体	90.76	90.65	6.65	6.69	18.67	18.77

3.2.2 耕地景观破碎度 从全省总体情况分析(图 4),2011—2021 年云南省耕地 PD 值上升 1.251,

AI 值下降 5.672%,说明耕地破碎化程度加剧,耕地集聚性减弱;MSI 值从 1.535 下降到 1.480,表明耕地

斑块形状趋于规则。各区域景观破碎度指数变化趋势基本一致,其中滇东北地区 PD, AI 和 MSI 变化值均高于其他地区,是景观破碎度变化和受人类活动影响最显著的区域。

从县级单元尺度分析, PD 值上升显著的区县在滇东北和滇中东部地区集聚, AI 变化值显著区县在全省范围内零星分布, MSI 下降显著区县主要分布在滇东北及滇中北部地区。PD 值下降的区县共有

11 个,同时 MSI 值上升且 AI 值下降幅度较小,说明该类区县耕地斑块破碎度情况改善,集聚性微弱降低,但耕地形状不规则程度加剧。耕地破碎化阻碍了农业生产效益的提高与农业现代化进程,不利于农户耕地资源有效利用,抑制农业社会化服务对耕地撂荒的治理效果,导致生产成本提高和耕地生态系统生物多样性下降等诸多负面影响,进而威胁农业可持续发展和国家粮食安全。

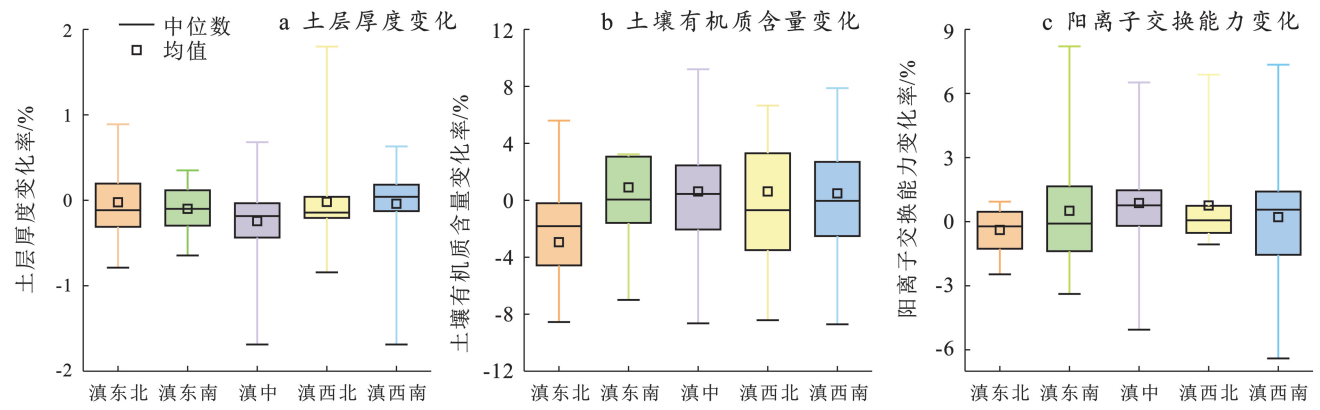


图 3 县域耕地土壤质量平均值变化情况

Fig.3 Changes in average soil quality of cultivated land at county level

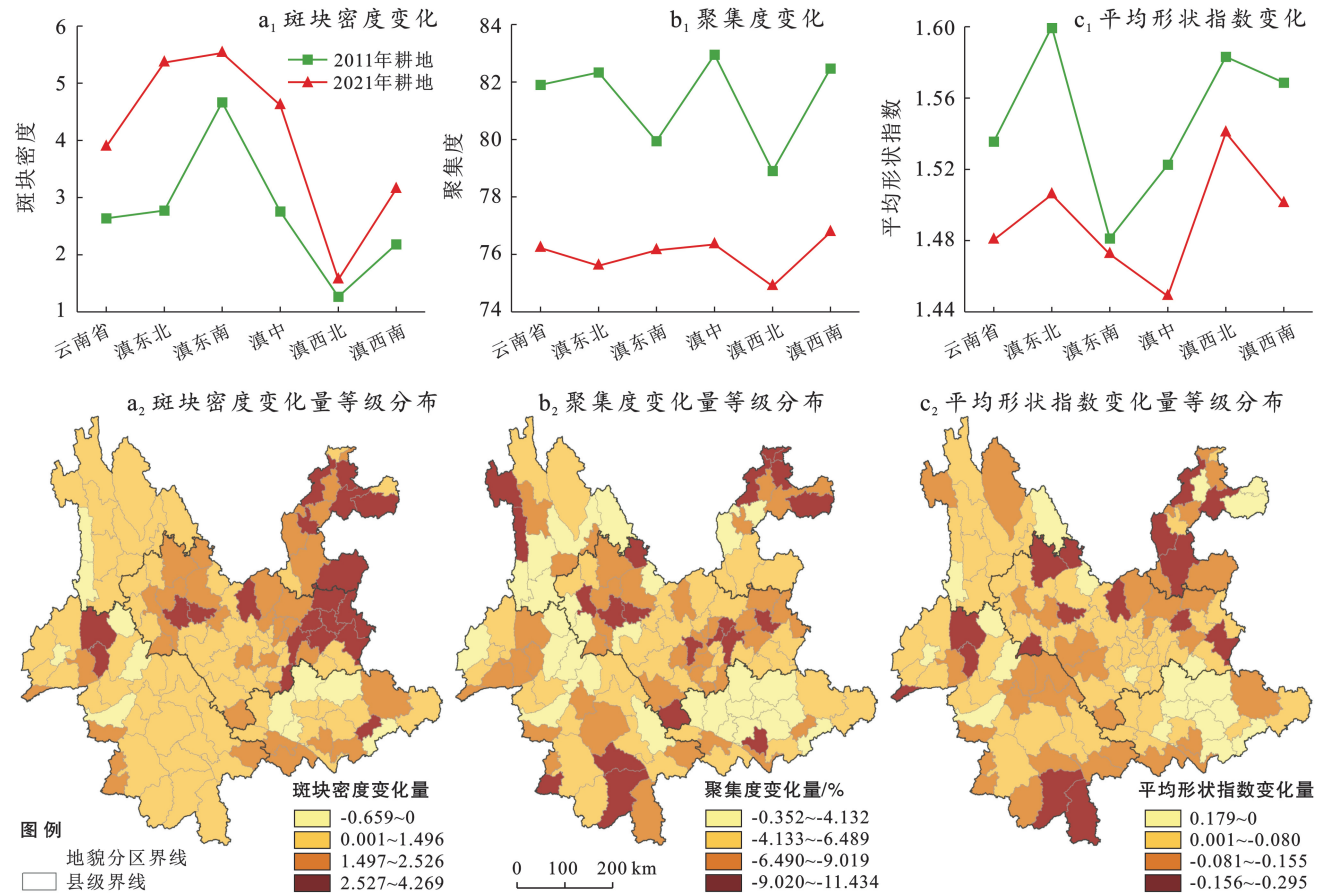


图 4 云南省 2011—2021 年耕地景观破碎度变化及变化量等级分布

Fig.4 Changes in fragmentation and degree distribution of cultivated land landscape in Yunnan Province from 2011 to 2021

3.3 耕地生态格局演变

整体来看,2011 和 2021 年云南省耕地生态安全指数平均值为 1.300 3,1.135 6(图 5),生态安全指数减少 12.67%,说明近 10 a 间云南省整体耕地生态安全水平下降。压力、状态子系统指数分别减少 0.160 5,0.014 0,说明耕地系统面临的压力增加、耕地整体状态有所下降,响应子系统指数增加 0.009 8,表明该时段对耕地的管理和保护力度加强。对比各区域情况,云南省耕地生态安全指数区域差异显著,滇西南地区耕地生态安全指数较高,其压力、状态、响应子系统指数均处于较高水平,滇西北地区受限于状态、响应子系统指数导致其耕地生态安全指数小于其他地区。

基于耕地生态安全指数对各县级单元进行降序排列(图 6),2011 和 2021 年高排名区县主要分布在滇西南和滇中地区,低排名区县在滇西北、滇东北和滇中中部地区集聚,整体耕地生态安全格局呈现“南高北低,中部两极化”的特征。对比两个时期的生态

安全格局变化,近 10 a 间滇中中部地区耕地生态安全水平有所下降,该区域高排名区县呈现向西转移趋势,滇西南耕地生态安全水平有所上升,整体生态安全格局变化并不显著。

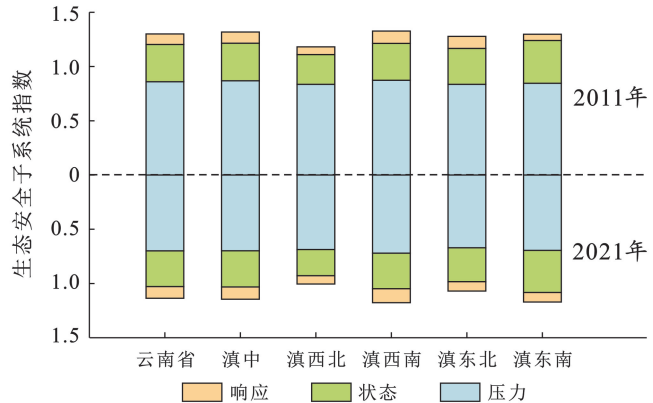


图 5 云南省耕地生态安全子系统指数变化
Fig.5 Changes in ecological security subsystem index of cultivated land in Yunnan Province

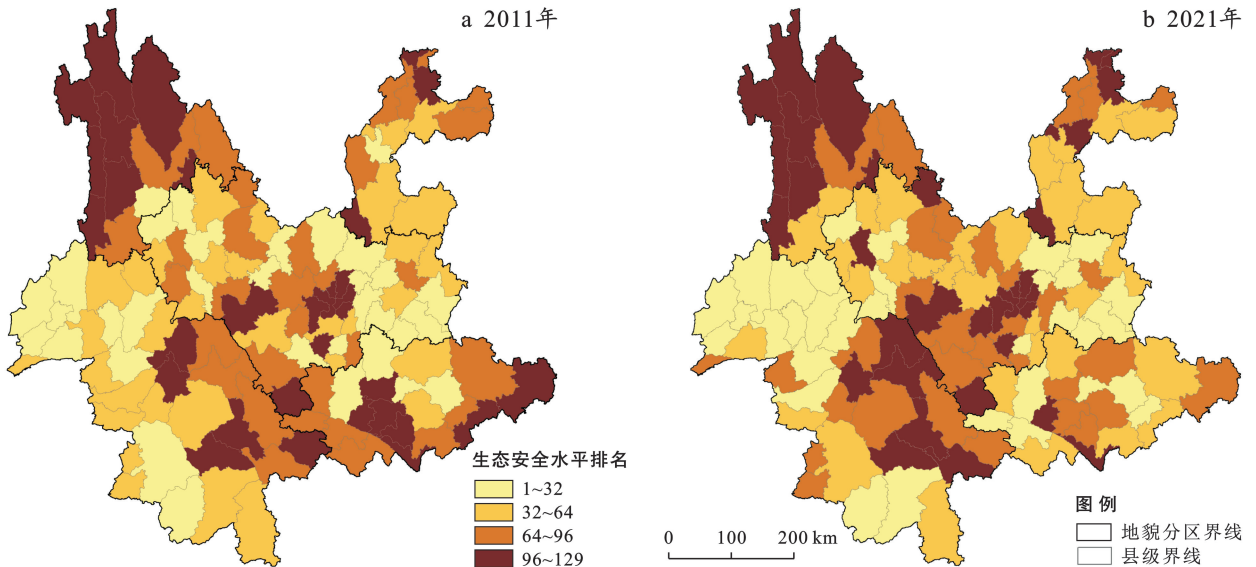


图 6 2011—2021 年云南省各区县耕地生态安全水平的排名

Fig.6 Ranking of ecological security levels in each district and county of Yunnan Province from 2011 to 2021

基于 2011 和 2021 年耕地生态安全指数变化值将各区县耕地生态安全水平变化划分为微弱提升、微弱降低、中度降低和显著降低 4 个等级(图 7),生态安全水平微弱提升的区县仅有 6 个,分别为勐腊县、红河县、腾冲市、绿春县、泸西县和东川区,其他区县均处于降低态势。总体来看,显著降低区县自东北向西南分布,呈现集聚于“宣威—呈贡—孟连”带的空间分布特征。以宣威市为代表的区县地处滇东北地区,该类地区耕地立地条件较差且人为活动对耕地的干扰程度较大,导致耕地破碎化程度加剧,耕地整体状态下滑严重;以呈贡区为代表的区县分布于滇中中部地区,该类地区处于全省的经济中心地带和人口高聚集

区,近 10 a 间快速的经济发展和城镇化建设增加了耕地系统的压力;以孟连县为代表的区县生态安全水平降低严重但仍处于较高水平,应加强对该类地区的耕地保护和管控。

3.4 耕地利用风险分区及优化调控

根据状态空间模型计算 CRI 指数得到 2011—2021 年云南省耕地利用风险评价结果,将其划分为高风险区、较高风险区、较低风险区和低风险区(图 8),并结合云南省耕地现状提供分区优化调控建议。

3.4.1 高风险区 共包括 15 个区县,面积占全省耕地面积的 7.16%,呈现在滇东北和滇中地区局部聚集的空间分布特征。该区域须严格落实耕地占补平衡、

严防“占优补劣”,对于部分资源禀赋不佳、地势陡峭的耕地可逐步推行“山上”换“山下”,以耕地“下山”、林地“上山”的方式优化耕地空间布局,提高耕地的规模性和空间聚集性,切实保障耕地数量和质量。同时利用先进的生态退化修复技术进行耕地修复,并对种植结构、化肥农药使用量及耕地灌溉进行差异化管控,严防耕地利用风险进一步增加。

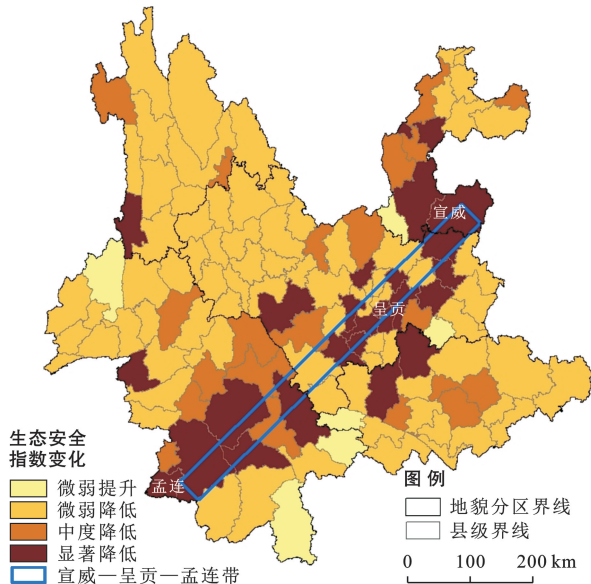


图 7 2011—2021 年云南省各区县耕地生态安全指数变化的分布

Fig.7 Distribution of cultivated land ecological security index changes in each district and county of Yunnan Province during 2011—2021

3.4.2 较高风险区 共包括 32 个区县,面积占全省耕地面积的 23.62%,多分布于滇西南、滇中和滇东北地区。该区域在数量、质量和生态中某一维度存在较大风险,需进行因地施策和精细化管控,防止出现“短板效应”。对于耕地数量变化程度较为剧烈、流失率较高区域,需进行及时预警与管控,坚决遏制耕地“非农化”,防止耕地“非粮化”;对于耕地本底质量较差区域加大中低产田改造力度,加强高标准农田建设工程,以现代设施装备弥补资源禀赋短板;在耕地生态安全水平脆弱区和敏感区,统筹耕地保护与生态建设,加大农业生态建设力度,建立耕地生态保护补偿机制,促进耕地资源的可持续利用。

3.4.3 较低风险区 共包括 61 个区县,面积占全省耕地面积的 51.03%,空间分布与云南省农产品主产区吻合度较高,多分布于气候温湿、坝子分布广泛的地区。该区域耕地资源本底条件较好,确保耕地种植用途管控,重点保障水稻、玉米等粮食作物种植;鼓励采用轮作、间作、套作等耕作方式和采取改善排灌设

施、治理破碎化、改善土壤理化性状、培肥地力等治理措施来提升耕地综合生产能力,总体提升耕地质量,提高耕地利用效率。

3.4.4 低风险区 共包括 21 个区县,面积占全省耕地面积的 18.19%,在全局范围内零散分布,该区域耕地利用风险较低,在确保耕地“数量不减、质量不降、布局稳定、生态改善”的前提下,可考虑针对各区域特点和自然地理格局进一步优化农用地空间布局、农业生产方式及产业结构,立足气候、水土、光热优势打造特色农业区,进一步提升经济效应和生态效应,突出农业多样性和高原特色。

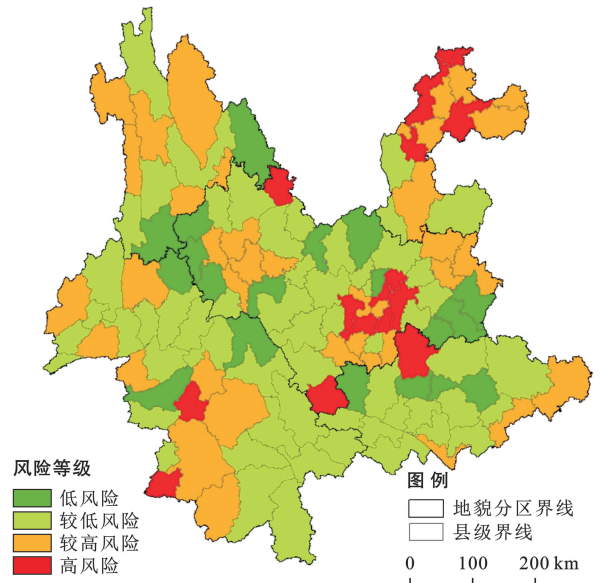


图 8 云南省耕地利用风险等级

Fig.8 Risk level of cultivated land utilization in Yunnan Province

4 讨论

(1) “三位一体”视角下的耕地保护探索。随着近 10 a 中国耕地保护政策不断完善和细化,耕地保护目标从最初的“数量平衡”逐渐向“数质并重”和“生态保护”发展,进一步形成了现阶段的“数量、质量、生态三位一体”耕地保护新格局。然而,耕地“三位一体”保护政策的具体落地需要全面考虑耕地资源的数量、质量和生态 3 个维度的本底属性和耦合关系,需从系统观念出发将三者视为同一有机整体,摸清其独立性和互补性规律,目前耕地“数量—质量—生态”量化及融合体系的方法研究尚不成熟^[29],仍需进行理论与实践相结合的探索研究。本文从耕地保护“三位一体”视角出发,以数学指数模型明确耕地数量变化,以耕地土壤质量和景观破碎度指数表征耕地质量变化,以 PSR 模型量化耕地生态安全水平,并基于状态空间模型测度区域耕地利用风险,研究视角及研究

组合方法具有一定新意,可为深化耕地资源保护提供理论和方法借鉴。

(2) PSR 模型和状态空间模型的应用。本文在研究方法上重点引入 PSR 模型和状态空间模型。PSR 模型遵循“原因—效应—响应”逻辑,利用 PSR 模型构建耕地生态安全评价体系,可以综合灵活地反映人类活动与耕地生态之间的复杂的因果关系^[30],对区域耕地生态安全水平进行科学性测度,研究结果显示云南省耕地生态安全格局呈现“南高北低,中部两极化”的特征并且高值区有向西部转移趋势,与赵晓园等^[31]的研究存在一定程度的吻合。状态空间模型能测度多维变量组合下的事物所处的系统空间状态,本文以此模型耦合耕地数量、质量和生态 3 个维度测度区域耕地利用风险,研究结果不仅在县级尺度上对云南省进行耕地利用风险分区,并立足耕地本底条件对各风险分区提出了优化调控建议,对拓宽耕地利用风险评价渠道、明确耕地保护侧重点具有重要意义。

(3) 研究的局限性与展望。本文仍存在以下不足:①土地利用数据来源于精度较高的“二调”“三调”成果,受限于数据的可获取性,研究时间跨度不足、期数较少,使研究存在一定的局限性,风险防控建议的有效性有待实践验证。②由于篇幅受限,在耕地质量指标的选择上仅代表性地讨论了部分耕地土壤质量指标和景观破碎度,未对耕地质量进行深度探讨,今后可对针对耕地质量变化进行全面的梳理与研究,以提升研究结果深度、增强政策建议的落地性。

5 结论

(1) 在数量方面,2011—2021 年云南省耕地变化具有区域化差异,变化显著的区县整体呈现出“全局零散,局部聚集”的分布特征,变化幅度和相对变化率较高的区县主要集聚于滇东北、滇西南和滇中中部地区,严重流失区相对分散。

(2) 在质量方面,全省耕地平均土层厚度下降 0.12%,平均土壤有机质含量和阳离子交换能力分别上升 0.60% 和 0.54%,整体耕地土壤质量有一定提升;耕地 PD 值上升 1.251, AI 值和 MSI 值下降 5.672% 和 0.055,说明云南省整体耕地破碎化程度加剧,集聚性减弱,但斑块形状趋于规则。

(3) 在生态方面,耕地生态安全指数下降 12.67%,耕地系统面临的压力增加、耕地整体状态下降,但对耕地的管理和保护力度有所加强。生态安全水平较高区县呈现向西转移趋势,整体呈现“南高北低,中部两极化”的空间格局。

(4) 基于耕地变化态势划分高风险、较高风险、

较低风险和低风险 4 个耕地利用风险区,所占县区的数量分别为 15,32,61,21 个,并结合区域实际情况提出了差别化的优化调控建议,旨在助力云南省因地制宜精准施策,保障粮食安全。

参考文献 (References)

- [1] 陈百明,王秀芬.耕地质量建设的生态与环境理念[J].中国农业资源与区划,2013,34(1):1-4.
Chen Baiming, Wang Xiufen. The ecological and environmental idea of cultivated land quality construction [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2013,34(1):1-4.
- [2] 袁承程,张定祥,刘黎明,等.近 10 年中国耕地变化的区域特征及演变态势[J].农业工程学报,2021,37(1):267-278.
Yuan Chengcheng, Zhang Dingxiang, Liu Liming, et al. Regional characteristics and spatial-temporal distribution of cultivated land change in China during 2009—2018 [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021,37(1):267-278.
- [3] 赵浣玳,张仕超,涂又,等.“三位一体”视角下重庆库区水旱地分布格局及影响因素[J].土壤通报,2022,53(6):1273-1285.
Zhao Huandeng, Zhang Shichao, Tu You, et al. Distribution patterns and influencing factors of paddy field and dry land in Chongqing reservoir area in the vision of trinity conservation [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2022,53(6):1273-1285.
- [4] 钱凤魁,张靖野,王秋兵.耕地数量、质量、生态“三位一体”空间保护分区研究:以辽宁省盘锦市为例[J].沈阳农业大学学报,2020,51(1):122-128.
Qian Fengkui, Zhang Jingye, Wang Qiubing. Study on space protection division of farmland trinity of quantity, quality and ecology in Panjin: A case of Panjin, Liaoning Province [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2020,51(1):122-128.
- [5] 张扬,周忠发,黄登红,等.喀斯特山区耕地时空演变与影响因子分析[J].农业工程学报,2020,36(22):266-275.
Zhang Yang, Zhou Zhongfa, Huang Denghong, et al. Spatio-temporal evolution of cultivated land and analysis of influence factors in karst mountainous areas [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020,36(22):266-275.
- [6] Gong Yuling, Li Jintao, Li Yixue. Spatiotemporal characteristics and driving mechanisms of arable land in the Beijing-Tianjin-Hebei region during 1990—2015 [J]. Socio-economic Planning Sciences, 2020,70:100720.
- [7] Li Lingyue, Wang Lie, Qi Zhixin. The spatiotemporal variation of farmland use transition and its critical

- influential factors in coordinated urban-rural regions: A case of Chongqing in Western China [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2021,70:102921.
- [8] Zhang Jiayi, Zhang Pan, Liu Yiyang, et al. An analysis of the spatiotemporal evolution and driving force of cultivated land green utilization in karst region of Southwest China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024,434:140002.
- [9] Sun Hongmin, Yang Zhao, Li Xiaoming, et al. Assessment of the cultivated land quality in the black soil region of Northeast China based on the field scale [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2023,195(12):1508.
- [10] 魏成国,黄义忠,牟禹恒,等.景观生态视角下的耕地细碎化及土地整治分区:以文山壮族苗族自治州为例[J].西南师范大学学报(自然科学版),2022,47(9):82-90.
Wei Chengguo, Huang Yizhong, Mu Yuheng, et al. Cultivated land fragmentation and guidance of land consolidation based on landscape ecology perspective: A case study of Wenshan Zhuang and Miao Autonomous Prefecture [J]. *Journal of Southwest China Normal University (Natural Science Edition)*, 2022,47(9):82-90.
- [11] 杨玉钱,彭双云,吕铭皓,等.1990—2020年滇中城市群耕地非农化时空变化特征及驱动机制[J].水土保持学报,2024,38(3):239-251.
Yang Yuqian, Peng Shuangyun, Lü Minghao, et al. Spatial and temporal changes and driving mechanism of cultivated land conversion in Central Yunnan urban agglomeration from 1990 to 2020 [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024,38(3):239-251.
- [12] 王世磊,金晓斌,张辛欣,等.粮食主产区非粮化耕地整治潜力与分区调控:以成都平原为例[J].地理科学进展,2023,42(11):2172-2185.
Wang Shilei, Jin Xiaobin, Zhang Xinxin, et al. Potential and differentiated control of non-grain cultivated land consolidation in major grain producing areas: A case study of the Chengdu Plain [J]. *Progress in Geography*, 2023,42(11):2172-2185.
- [13] 黄绘青,王伟,刘莉.长株潭城市群耕地资源数量时空演变及驱动机制分析[J].测绘地理信息,2023,48(4):90-95.
Huang Huiqing, Wang Wei, Liu Li. Spatial-temporal evolution of cultivated land resources and analysis of driving mechanism in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration [J]. *Journal of Geomatics*, 2023,48(4):90-95.
- [14] 王学,徐晓凡.中国耕地景观细碎度时空变化特征及其影响因素[J].农业工程学报,2022,38(16):11-20.
Wang Xue, Xu Xiaofan. Spatiotemporal characteristics and influencing factors of landscape fragmentation of cultivated land in China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022,38(16):11-20.
- [15] 冷志杰,刘雪宁.东北地区耕地生态安全质量动态评估及影响要素[J].生态经济,2024,40(4):122-128.
Leng Zhijie, Liu Xuening. Dynamic assessment and influencing factors of cultivated land ecological security quality in Northeast China [J]. *Ecological Economy*, 2024,40(4):122-128.
- [16] 李丹,田沛佩,罗红英,等.西藏“一江两河”耕地生态安全时空格局与障碍诊断[J].农业机械学报,2020,51(10):213-222.
Li Dan, Tian Peipei, Luo Hongying, et al. Spatio-temporal characteristics and obstacle diagnosis of cultivated land ecological security in “one river and two tributaries” region in Tibet [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020,51(10):213-222.
- [17] 张冰洁,宋戈.松嫩高平原黑土区典型地域耕地生态安全评价及驱动力分析:以黑龙江省绥化市为例[J].水土保持研究,2012,19(3):215-220.
Zhang Bingjie, Song Ge. Evaluation on cultivated land ecological security and analysis on the driving forces of the typical mollisols area in Songnen high plain: A case study of Suihua City in Heilongjiang Province [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2012,19(3):215-220.
- [18] 范树平,李鹏,余波平,等.粮食主产区耕地生态安全障碍诊断及调控策略[J].水土保持研究,2023,30(1):408-417.
Fan Shuping, Li Peng, Yu Boping, et al. Study on obstacle diagnosis and regulation strategy of cultivated land ecological security in main grain producing areas [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023,30(1):408-417.
- [19] 赵育恒,谭永忠.中国第二次土地调查以来省域耕地利用时空变化[J].水土保持通报,2020,40(1):204-212.
Zhao Yuheng, Tan Yongzhong. Spatial-temporal changes of cultivated land use at provincial level since second national land survey in China [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2020,40(1):204-212.
- [20] 唐荣莉,刘静,罗友进,等.重庆市水田和旱地资源动态变化研究[J].西南农业学报,2022,35(12):2850-2859.
Tang Rongli, Liu Jing, Luo Youjin, et al. Dynamic changes of paddy field and dry land resources in Chongqing [J]. *Southwest China Journal of Agricultural*

- Sciences, 2022, 35(12):2850-2859.
- [21] 郑希平, 陈竹安, 危小建. 鄱阳湖生态经济区建设用地扩张对耕地景观破碎化的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2024, 41(2):280-291.
- Zheng Xiping, Chen Zhu'an, Wei Xiaojian. The impact of construction land expansion on the landscape fragmentation of cultivated land in the Poyang Lake ecological economic zone [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2024, 41(2):280-291.
- [22] 韩磊, 潘玉君, 高庆彦, 等. 基于 PSR 和无偏 GM(1,1) 模型的云南省耕地生态安全评价与预测[J]. 生态经济, 2019, 35(2):148-154.
- Han Lei, Pan Yujun, Gao Qingyan, et al. Evaluation and prediction of the cultivated land ecological security in Yunnan Province based on PSR and unbiased GM(1,1) model [J]. Ecological Economy, 2019, 35(2):148-154.
- [23] 张锐, 郑华伟, 刘友兆. 基于 PSR 模型的耕地生态安全物元分析评价[J]. 生态学报, 2013, 33(16):5090-5100.
- Zhang Rui, Zheng Huawei, Liu Youzhao. Evaluation on cultivated land ecological security based on the PSR model and matter element analysis [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(16):5090-5100.
- [24] 刘耀林, 辛格格, 安睿, 等. “三位一体”视角下湖北省耕地安全格局变化分析[J]. 中国农业资源与区划, 2024, 45(10):86-96.
- Liu Yaolin, Xin Gege, An Rui, et al. Analysis of changes in cultivated land security patterns in Hubei Province under the trinity [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2024, 45(10):86-96.
- [25] 刘允瑄, 赵华甫, 王璟珩, 等. 基于 PSR 模型的耕地可持续集约利用评价研究: 以京津冀地区为例[J]. 湖北农业科学, 2021, 60(3):171-178.
- Liu Yunxuan, Zhao Huafu, Wang Jingheng, et al. Evaluation of sustainable intensive utilization of cultivated land based on PSR model: Take Beijing-Tianjin-Hebei region as an example [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2021, 60(3):171-178.
- [26] 李健, 杨丹丹, 高杨. 基于状态空间模型的天津市环境承载力动态测评[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(11):25-30.
- Li Jian, Yang Dandan, Gao Yang. Measurement and assessment of environment carrying capacity of Tianjin based on state-space model [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2014, 28(11):25-30.
- [27] 余敦, 赵琪琛, 王检萍, 等. 2000—2019 年鄱阳湖平原耕地利用生态风险评价及分区调控研究[J]. 江西农业大学学报, 2023, 45(3):774-786.
- Yu Dun, Zhao Qichen, Wang Jianping, et al. Ecological risk evaluation and zoning control of cultivated land use in Poyang Lake plain between 2000 and 2019 [J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2023, 45(3):774-786.
- [28] 郑媛媛, 余敦, 孙聪康, 等. 基于状态空间模型的耕地生态安全评价: 以江西省鄱阳县为例[J]. 水土保持研究, 2020, 27(3):218-224.
- Zheng Yuanyuan, Yu Dun, Sun Congkang, et al. Evaluation on ecological security of cultivated land in Poyang County of Jiangxi Province based on state space model [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(3):218-224.
- [29] 张超, 乔敏, 郟文聚, 等. 耕地数量、质量、生态三位一体综合监管体系研究[J]. 农业机械学报, 2017, 48(1):1-6.
- Zhang Chao, Qiao Min, Yun Wenju, et al. Trinity comprehensive regulatory system about quantity, quality and ecology of cultivated land [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(1):1-6.
- [30] 熊雯颖, 孟菲, 陈航, 等. 耕地“三位一体”保护视角下中国省域休耕规模与空间布局[J]. 农业工程学报, 2024, 40(18):240-250.
- Xiong Wenying, Meng Fei, Chen Hang, et al. Provincial fallow scale and fallow spatial layout of cultivated land in China from the “Trinity” protection perspective [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(18):240-250.
- [31] 赵晓园, 李学坤. 云南省耕地生态安全时空格局及障碍因子分析[J]. 中国农业资源与区划, 2018, 39(11):19-24.
- Zhao Xiaoyuan, Li Xuekun. Temporal and spatial patterns and barrier factors of cultivated ecological security in Yunnan Province [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2018, 39(11):19-24.