

# 内蒙古农牧交错区耕地韧性评价及管控

阎佳妮<sup>1</sup>, 赵华甫<sup>1</sup>, 杨霞<sup>2</sup>, 靳知锟<sup>3</sup>

[1. 中国地质大学(北京)土地科学技术学院, 北京 100083; 2. 内蒙古农业大学沙漠治理学院, 内蒙古呼和浩特 010000; 3. 中国建筑材料工业地质勘查中心陕西总队, 陕西 西安 710003]

**摘要:** [目的] 对内蒙古自治区农牧交错区耕地进行韧性评价及管控研究, 为辨析该区耕地韧性水平差异, 有效开展分区调控及制定针对性的耕地持续利用保护对策提供科学参考。[方法] 基于韧性理论, 以内蒙古农牧交错区的29个旗县作为研究区域, 通过构建“压力—状态—响应”模型, 以旗县为研究单元, 利用熵值法综合评价内蒙古农牧交错区耕地韧性特征, 依据耕地韧性水平组合特点, 划分农牧交错区韧性分区, 并提出分区管控路径。[结果] ①界定了耕地韧性内涵, 并在识别耕地系统自然和社会压力, 状态和响应指标基础上, 构建了包含目标层、因素层、指标层为框架的“压力—状态—响应”模型。②2000—2022年内蒙古农牧交错带耕地整体韧性水平不高, 呈现出“东部高, 西部低”的趋势; 从历史变化看, 受气候影响, 整体韧性水平呈降低趋势, 东部韧性近期呈现恢复态势。③依据耕地韧性水平变化组合, 划分3个区域。1级稳定种植区应严守耕地保护红线, 发挥粮食生产功能区功能。2级监测保护区需加大人工投入力度, 提升区域机械化水平。3级抚育休耕区应坚持宜农则农、宜牧则牧、宜养则养的国土空间适宜性格局。[结论] 内蒙古农牧区耕地韧性普遍较低, 应加强土地整治和风沙治理, 实现“精准管理”, 提高耕地韧性。

**关键词:** 耕地保护; 耕地韧性评价; PSR模型; 熵值法; 内蒙古农牧交错区

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2025)03-0374-11

**中图分类号:** F301.21, X171.1

**文献参数:** 阎佳妮, 赵华甫, 杨霞, 等. 内蒙古农牧交错区耕地韧性评价及管控[J]. 水土保持通报, 2025, 45(3): 374-384. Yan Jiani, Zhao Huafu, Yang Xia, et al. Evaluation on resilience of cultivated land and management in agro-pastoral ecotone of Inner Mongolia Autonomous Region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(3): 374-384. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.03.033; CSTR: 32312.14.stbctb.2025.03.033.

## Evaluation on resilience of cultivated land and management in agro-pastoral ecotone of Inner Mongolia Autonomous Region

Yan Jiani<sup>1</sup>, Zhao Huafu<sup>1</sup>, Yang Xia<sup>2</sup>, Jin Zhikun<sup>3</sup>

(1. School of Land Science and Technology, China University of Geosciences Beijing, Beijing 100083, China;

2. College of Desert Control Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010000, China;

3. China Building Materials Industrial Geological Exploration Center, Shaanxi Branch, Xi'an, Shaanxi 710003, China)

**Abstract:** [Objective] The resilience and management of cultivated land in the agro-pastoral ecotone of Inner Mongolia Autonomous Region were studied. To distinguish the resilience levels of cultivated land in this area, regional regulations and controls were effectively enforced, and targeted countermeasures were formulated to improve scientific reference for a sustainable utilization and protection of the cultivated land. [Methods] Based on resilience theory, 29 counties (banners) in the agro-pastoral ecotone of Inner Mongolia were selected as the study area. A pressure-state-response (PSR) model was constructed, with counties as the study units. The entropy method was used to comprehensively evaluate the resilience characteristics of cultivated land in the agro-pastoral ecotone. According to the combined characteristics of cultivated land resilience levels, resilience zones were delineated, and zonal management strategies were proposed. [Results] ① The meaning of cultivated land resilience was defined, and natural and social pressures, state, and response indicators of the cultivated land

收稿日期: 2024-12-24

修回日期: 2025-02-19

采用日期: 2025-02-19

资助项目: 教育部人文社会科学研究规划基金项目“粮食安全语境下耕地弹性空间识别与管控研究”(21YJA630121)

第一作者: 阎佳妮(2002—), 女(蒙古族), 内蒙古自治区赤峰市人, 硕士研究生, 主要研究土地评价、保护方向。Email: yanjiani32@163.com。

通信作者: 赵华甫(1978—), 男(汉族), 河南省南阳市人, 博士, 教授, 主要从事土地评价、规划和保护方面的研究。Email: huafuzhao@163.com。

system were identified. A PSR model consisting of target, factor, and indicator layers was constructed. ② From 2000 to 2022, the overall resilience level of cultivated land in the agro-pastoral ecotone of Inner Mongolia was not high, showing a trend of higher resilience in the east and lower resilience in the west. Historically, influenced by the climate, the overall resilience level showed a declining trend, although resilience in the eastern region has recently recovered. ③ Based on a combination of changes in the cultivated land resilience levels, three zones were delineated. The first-level stable cultivation zone should strictly adhere to the red line of cultivated land protection and leverage the function of the grain production functional zones. The second-level monitoring and protection zone requires an increased artificial input to improve regional mechanization levels. The third-level fallow and restoration zone should adhere to a land use suitability pattern that promotes agriculture, pastoralism, and conservation, where appropriate. [Conclusion] The resilience of cultivated land in the agro-pastoral ecotone of Inner Mongolia Autonomous Region is generally low. It is necessary to strengthen the land consolidation and sandstorm control, achieve precision management, and improve cultivated land resilience.

**Keywords: cultivated land conservation; resilience evaluation of cultivated land; PSR Model; entropy method; agro-pastoral ecotone of Inner Mongolia Autonomous Region**

作为中国北方重要的生态安全屏障,内蒙古农牧交错带兼具生态保护与畜牧业生产的双重功能。但近年来,内蒙古自治区粮食总产量创历史新高,成为粮食出口大省,为中国13个粮食主产区之一。内蒙古农牧交错带作为生态脆弱区,同时承担着高比重粮食安全保障的任务。随着耕地功能的不断开发,耕作生产与生态保护间的矛盾不断凸显,生态与耕地保护存在较严重的冲突。

近年来,韧性理论作为研究系统提升自身恢复抵抗能力,并通过系统的吸收、学习和变革,实现自身动态平衡、系统转型的研究理论,被广泛应用到生态韧性、城市韧性等领域。1973年生态学家Holling<sup>[1]</sup>第一次将韧性的思想引入生态领域中,重新定义生态系统稳定性特征。此后,伴随研究的不断丰富,韧性经历了从工程韧性<sup>[2]</sup>到生态韧性<sup>[3]</sup>,再到社会—生态系统韧性<sup>[4]</sup>的演变,其概念内涵也在不断地被优化与完善。前人研究引入弹性力学理论,探索耕地韧性研究的框架<sup>[5]</sup>,构建耕地刚性、弹性相结合框架<sup>[6-8]</sup>,强调耕地保护并不是严格的刚性管制,而是刚性管制与弹性管控相结合;对耕地进行韧性评价,基于稳定增长能力、高效利用能力、抵抗干扰能力、资源支撑能力<sup>[9]</sup>,从耕地系统的功能性、稳定性、冗余度和适应性4个维度构建了耕地系统韧性评价指标体系<sup>[10]</sup>,也构建了基于恢复力指数的耕地系统韧性分析的理论框架<sup>[11]</sup>,运用熵权法<sup>[12]</sup>、PSR模型等<sup>[13]</sup>进行耕地韧性评价,并提出提升路径与政策建议。研究选取的地理单元包括旗县级<sup>[12]</sup>、市级<sup>[14-15]</sup>、省(区)级<sup>[16-17]</sup>以及全国范围<sup>[18]</sup>进行分析,以上研究将韧性理论充分融入耕地利用系统中,从多个维度对耕地进行韧性评价,为耕地保护和可持续利用提供了重要的理论依据和实践指导。虽然上述研究为本文提供

了有益的参考和借鉴,但仍有拓展空间:①探讨耕地韧性评价的框架、指标体系尚未建立统一的标准且研究较为匮乏,建立明确的耕地韧性评价指标体系为耕地韧性提升、更有效地管控耕地具有重要作用。②大多数研究以大尺度、微观尺度为研究单元进行评价,在中尺度空间下进行耕地韧性评价的研究有待深化。

内蒙古农牧交错带为东北—西南向分布,呈现空间上农牧共存、时间上农牧交替的特征,同时该区域属于生态脆弱区。为探索在生态保护的背景下更好地利用耕地,将韧性理论引入其中,结合区域内农耕地与放牧区交错的特点,对耕地的稳定性与韧性特征进行识别并提出韧性分区及管控路径,一定程度地丰富了韧性研究在中尺度研究缺失的不足。将韧性与农牧交错的特点更好地结合在一起,为内蒙古农牧交错区的耕地弹性管控提出建议。

## 1 耕地韧性评价研究框架

依据韧性理念的发展变化以及相关学者对韧性、耕地韧性<sup>[13,19]</sup>内涵的研究,本研究将耕地利用韧性定义为:耕地利用系统通过外生动力与内生动力的协同作用,调整系统内部的要素结构、规模形态及运作模式,以最大程度吸收和适应内外部干扰与冲击,摒弃不适应的旧有状态,构建新的恢复路径,实现向新平衡状态的转型,从而避免系统衰退的可持续发展能力。韧性实质上是系统对外界干扰持续响应的动态过程。韧性的作用并非静态,而是在不断地重构中维持,其最终结果是从一种稳定状态向另一种稳定状态的转变。在PSR模型中,压力层对应“扰动源”,状态层对应“面临扰动产生的状态”,响应层对应“扰动后采取的措施”(图1)。

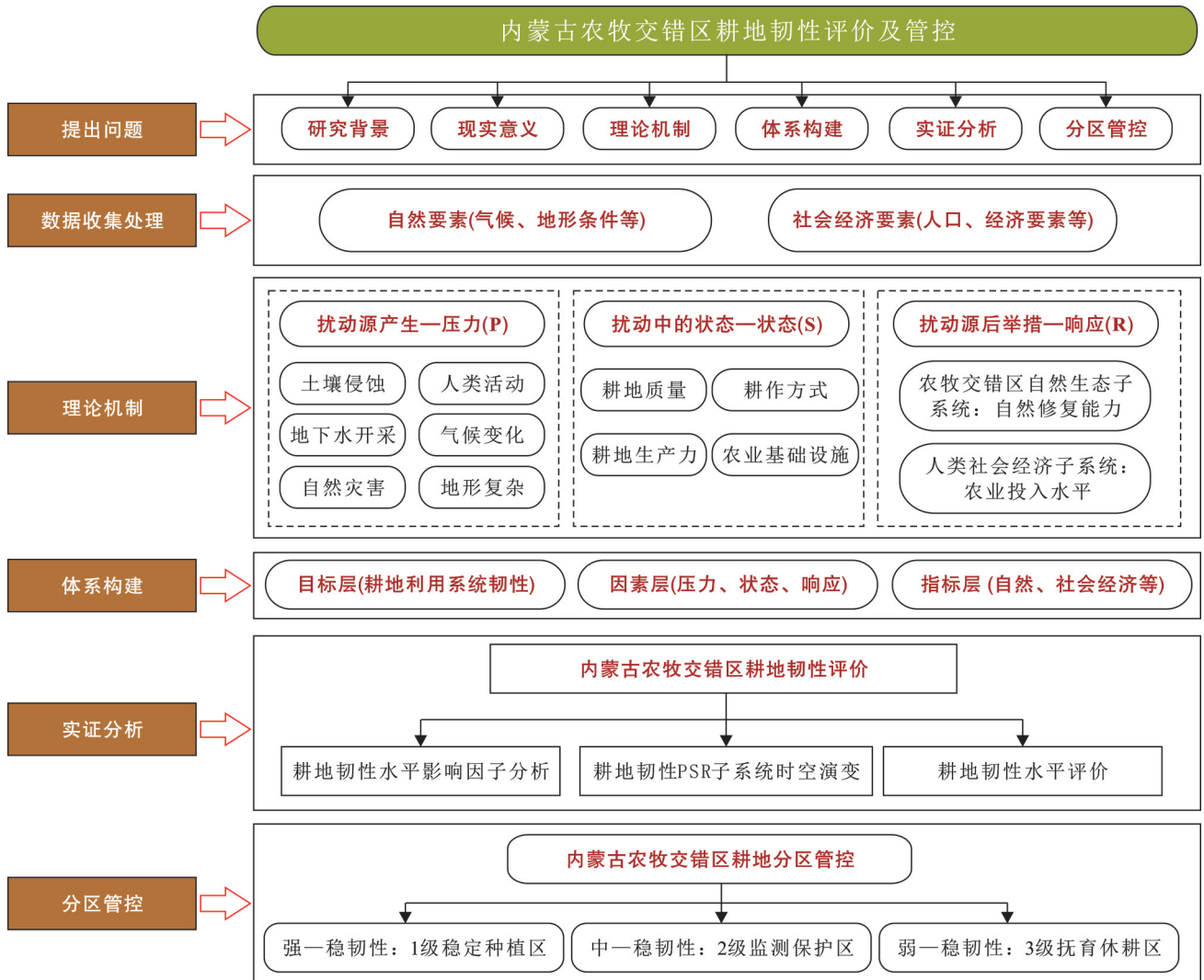


图1 内蒙古农牧交错区耕地韧性评价研究框架

Fig.1 Research framework for evaluating resilience of cultivated land in agro-pastoral ecotone of Inner Mongolia

## 2 研究方法数据来源

### 2.1 研究区概况

内蒙古自治区分布在农牧交错带的旗县有61个,总面积为 $6.11 \times 10^5 \text{ km}^2$ ,占内蒙古自治区总面积的51.6%。内蒙古农牧交错带横跨内蒙古东中西部地区,与山西省、河北省、辽宁省接壤,由赤峰的敖汉旗向西延伸至包头固阳县。参考2016年农业农村部发布的《农业部关于北方农牧交错带农业结构调整的指导意见》中列出的内蒙古农牧带重点区域范围,选用内蒙古自治区5个盟市的29个重点农业生产旗县作为研究区域(表1)。该区域属于干旱半干旱气候区,水分条件成为该区农牧业生产的主要限制因子。年降水量约200~400 mm,年际降水变化较大。降水量由东向西递减,年平均温度在1.5~3.7℃,农牧交错区气候条件波动显著,整体稳定性较差。全区域地形、地貌状况复杂,有高原、山地、平原、丘陵、盆地

等。由于复杂的地形地貌条件,农牧交错区范围内土地利用呈现农业耕地、牧区放牧两种生产方式,因地制宜选择土地利用方式,对于农牧交错区的发展、保护环境可持续发展有重要意义。内蒙古农牧交错区土壤构成类型主要以栗钙土、风沙土、栗褐土等为主。由于农牧交错区地形地貌条件复杂,且气候干旱多大风天气,造成地表土壤风蚀严重,土壤沙化退化现象普遍,植物覆盖度较低,土壤利用强度大,土地承载力较大。

### 2.2 数据来源

(1) 统计数据。本文所用到的农药使用量、耕地面积、土地面积、人口密度、城镇人口、总人口、粮食产量、农作物播种面积、畜禽产品产量、第一产业产值、区域GDP、农用柴油使用量、农用薄膜使用量、风沙治理面积、有效灌溉面积等数据均来源于《内蒙古统计年鉴》、各省市统计年鉴与实地调查走访获得。其中个别年份或旗县的数据缺失值,通过取临近值

或线性拟合的方法进行填补。

(2) 空间数据。所用2000—2022年研究区土地利用现状数据引自武汉大学 Yang Jie 等<sup>[20]</sup>制作的1985—2022年中国区域逐年30 m土地利用数据。使用 ArcGIS 10.8 对土地利用数据进行矢量化、重分

类、融合、计算面积等处理。涉及坡度、高程等地形数据来源于地理空间数据云提供的30 m分辨率数字高程模型(<https://www.gscloud.cn/>)。所需研究区降雨量数据来自国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn/>)。

表1 内蒙古农牧交错区涉及旗县

Table 1 Banner (counties) involved in agro-pastoral ecotone of Inner Mongolia

盟(市)名称	旗县(市、区)名称
包头市	土默特右旗、固阳县
呼和浩特市	武川县、土默特左旗、托克托县、和林格尔县、清水河县
乌兰察布市	察哈尔右翼中旗、察哈尔右翼后旗、商都县、化德县、卓资县、察哈尔右翼前旗、兴和县、凉城县、丰镇市、集宁区
赤峰市	克什克腾旗、林西县、阿鲁科尔沁旗、巴林左旗、巴林右旗、翁牛特旗、敖汉旗、松山区、喀喇沁旗、宁城县
锡林郭勒盟	太仆寺旗、多伦县

2.3 研究方法

2.3.1 耕地韧性评价指标体系建立 耕地利用系统作为具有多种因素组成的大系统,与外界环境相互影响。因此,面对外界干扰的不确定性,耕地系统需积极采取响应措施,将韧性值维持在合理范围内才能最大程度保证耕地利用系统的稳定。影响耕地韧性的障碍因子有许多方面,作为干旱半干旱区的内蒙古农牧交错区来说,水分为限制农业发展的最重要因素,因此在压力层,选取的指标之一为降雨量。农牧交错区地形复杂,耕地坡度与高程成为衡量耕地韧性重要因子。就社会经济方面来说,区域内人口数量、城镇化发展水平及人均耕地面积成为直接或间接影响耕地利用系统的压力,人口密度越大,表明区域内耕地承载能力下降;城镇化扩张严重,也会严重占用耕地。内蒙古农牧交错区部分土壤存在耕作条件较差、自身调节能力弱等问题,本身所受压力过大时,将实行退耕还林还草政策,因此选用农药施用量、畜禽产品产量作为压力层评价指标。根据内蒙古农牧交错区特征及耕地状况,粮食产量、复种指数、耕地垦殖率均为衡量耕地利用系统状态的指标,通过粮食产量、播种面积所占耕地面积的比例、耕地面积占土地总面积的比例反映出内蒙古农牧交错区耕地利用系统在面临压力时所呈现的状态,通过人均粮食占有量、农业产值占GDP比重反映耕地的生产能力能否满足百姓的粮食需求以及所带来的经济效益,间接说明耕地利用系统在面临压力时所呈现的状态。面对外界压力,需加大人工投入、提高机械利用率、引入新技术等措施提高耕地韧性,具体指标可反映为农用柴油使用量、农用薄膜使用量、风沙治理面积、有效灌溉面积。这些状态要素决定了在面临扰动源如气候变化、自然灾害、人类活动等压力

下,为实现耕地保护目标所采取的响应措施。基于以上分析,并运用熵权法,本文构建了内蒙古农牧交错区耕地韧性的评价指标体系,包括3个维度17项指标(表2)。

2.3.2 熵值法 熵值法是指用来判断某个指标的离散程度的数学方法。为确保结果准确性与科学性,选用熵值法赋予指标权重。

(1) 假设有  $n$  个评价对象,  $m$  个指标,构造原始数据矩阵  $A=(a_{ij})_{n \times m}$ ,其中  $a_{ij}$  第  $i$  个评价对象的第  $j$  个指标的数值。

(2) 对数据进行规范化处理。

正向指标的处理公式为:

$$x^* = \frac{\max - x}{\max - \min} \tag{1}$$

负向指标的处理公式为:

$$x^* = \frac{x - \min}{\max - \min} \tag{2}$$

式中:  $x$  为原始指标值;  $x^*$  为规范化后的指标值;  $\max$  为该指标在所有评价对象中的最大值;  $\min$  为该指标在所有评价对象中的最小值。

(3) 在标准化后的数据基础上都加0.000 1,得到非零标准化指标值。

(4) 求得评价对象在各指标下的比值及各指标的熵值,具体计算公式为:

$$p_{ij} = \frac{x_{ij}^*}{\sum_{i=1}^n x_{ij}^*} \quad (i=1, 2 \dots n; j=1, 2 \dots m) \tag{3}$$

$$e_j = \frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln p_{ij} \quad (j=1, 2 \dots m) \tag{4}$$

其中  $e_j \geq 0$

式中:  $p_{ij}$  为第  $i$  个评价对象在第  $j$  个指标下的比值;  $e_j$  为第  $j$  个指标的熵值( $e_j > 0$ )。

(5) 通过熵值计算各指标的权重计算公式为:

$$d_j = 1 - e_j \quad (j = 1, 2 \dots m)$$

$$\omega_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^m d_j} \quad (j = 1, 2 \dots m) \quad (5)$$

表 2 耕地利用韧性评价指标体系

Table 2 Resilience evaluation indicator system of cultivated land

目标层	因素层	指标层	指标解释	权重/%
耕地 利用 系 统 韧 性	压力	降雨量/mm	水分影响耕地的质量	18.29
		耕地坡度/(°)	坡度越大,土壤侵蚀风险越高	4.12
		耕地高程/m	海拔越高,种植风险越大	5.21
		人口密度/(人·km <sup>-2</sup> )	人口密度越大,耕地所受压力越大	0.01
		城镇化率	城镇化率越高,耕地所受压力越大	0.70
		农药施用量/t	施用的农药量越高,耕地所受压力越大	1.18
		人均耕地面积(666.67 m <sup>2</sup> /人)	人均耕地面积越小,耕地所受压力越大	3.73
	状态	畜禽产品产量/t	耕地面临压力过大,实行退耕还草,促进畜牧业发展	0.12
		粮食产量/kg	表征耕地的生产力水平	11.33
		复种指数/%	表征耕地播种作物程度	5.94
		耕地垦殖率/%	表征耕地的生产力水平	3.86
		人均粮食占有量/kg	表征耕地的生产力水平	6.18
	响应	第一产业占 GDP 的比重	表征耕地的经济收益	1.83
		农用柴油使用量/t	表征在不同的扰动源下提升耕地生产力的应对措施	12.09
		农用薄膜使用量/t	表征在不同的扰动源下提升耕地生产力的应对措施	8.26
		风沙治理面积/hm <sup>2</sup>	表征在不同的扰动源下耕地的人力投入	8.38
		有效灌溉面积/hm <sup>2</sup>	表征在不同的扰动源下耕地的人力投入	8.77

式中: $d_j$ 为第 $j$ 个指标的差异系数; $\omega_j$ 为第 $j$ 个指标的权重。

2.3.3 综合评分模型 综合评分模型是对某一群体事物由定性分析到定量分析的过程,旨在全面、客观地评估事物的价值或性能。具体计算公式为:

$$S_i = \sum_{j=1}^w \omega_j p_{ij} \quad (6)$$

式中: $S_i$ 为第 $i$ 个评价对象的综合得分; $\omega_j$ 为第 $j$ 个指标的权重; $p_{ij}$ 为第 $i$ 个对象在第 $j$ 个指标下的标准化比值或原始值。

2.3.4 皮尔逊相关性分析 皮尔逊相关性分析可以较为直观地反映每一对自变量对因变量的影响程度。计算公式为:

$$R_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (7)$$

式中: $R_{XY}$ 为变量 $X$ 与 $Y$ 的皮尔逊相关系数(取值范围 $[-1, 1]$ ); $X_i, Y_i$ 为第 $i$ 个样本在变量 $X$ 和 $Y$ 上的观测值; $\bar{X}, \bar{Y}$ 分别为变量 $X$ 和 $Y$ 的样本均值。

### 3 结果与分析

#### 3.1 农牧交错区耕地韧性评价

##### 3.1.1 农牧交错区耕地韧性水平影响因子相关性分

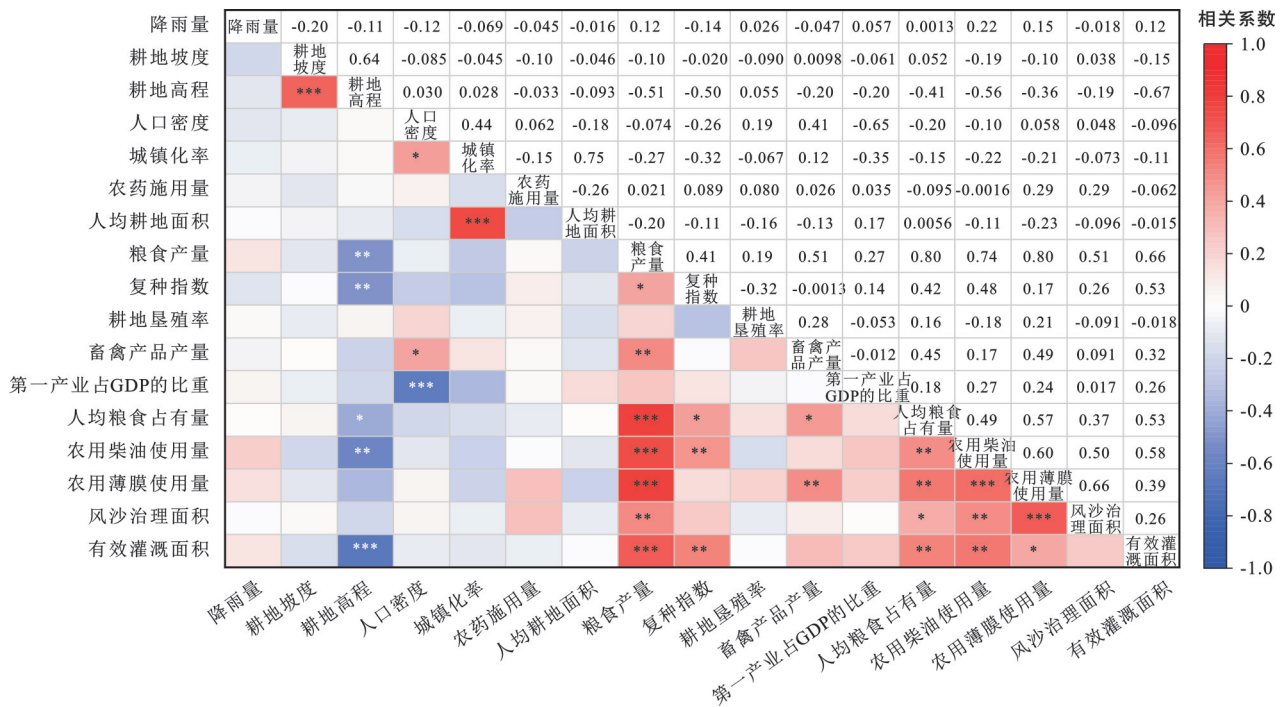
析 由图 2 可以看出,粮食产量与有效灌溉面积、农用薄膜使用量、农用柴油使用量、人均粮食占有量呈现极显著正相关,与风沙治理面积、畜禽产品产量呈现显著正相关关系,与复种指数也呈现正相关关系。此外,粮食产量与耕地面积的相关性不明显,这与区域的自身地貌特点与气候条件有关,干旱年份会造成粮食产量降低,表明耕地面积的增加并不一定直接导致粮食产量的提高。这些结果提示我们,在提升耕地韧性水平时,应注重合理使用化肥和农药,并且要综合考虑耕地的利用效率和生态保护措施。耕地高程与有效灌溉面积呈现极显著的负相关关系,与粮食产量、复种指数均呈现显著的负相关关系,这说明在农牧交错区内耕地高程成为影响耕地生产力的重要因素,海拔越高越不利于作物生长。进一步分析表明,复种指数与有效灌溉面积、农用柴油使用量为显著的正相关关系,表明保持耕地良好的水分有利于耕作,同时需提供适量的机械耕作技术,提高耕作效率。

3.1.2 农牧交错区耕地韧性水平 PSR 子系统时空演变特征 本研究利用 2000, 2010 和 2022 年 3 期数据对内蒙古农牧交错区进行耕地韧性评价。内蒙古农牧交错区 2000—2022 年耕地利用韧性各因素层的空间分布格局和各因素层评价得分情况如图 3 和表 3

所示。从图3可以看出,压力层分值低于状态层与响应层,状态层为3种因素中得分最高。在研究耕地压力层的演变趋势时,发现2000—2022年压力呈现先下降后上升的态势。具体而言,从2010—2022年,耕地所承受的压力呈增长趋势。在此期间,内蒙古地区承受着粮食生产需求、城市扩张对耕地的占用以及干旱少雨的气候条件等多重压力,这些因素共同作用导致耕地利用程度的加剧,进而使得耕地所承受的压力有所增加。相应地,状态层的分值显示出先上升后下降的趋势,表明在2000—2010年期间,耕地所承受的压力有所减轻,状态层评分随之增加。在压力减少的条件下,耕地的承载力、粮食产量指数、播种面积以及土壤状况等均表现出较为良好的状态。然而,在2010—2022年耕地面临压力的增加,状态层评分相应下降。在较高的压力下,耕地表现

出较差的状态,表明仅依靠耕地利用系统的自我调节能力无法有效应对压力的变化。即便耕地利用系统具备自组织特性,压力值的波动仍会对系统的调节能力产生影响。

从响应层分析,2000—2022年耕地利用系统的响应层指数持续呈现上升趋势,反映出在该时段内始终存在人为的积极干预。进一步分析发现,2010—2022年相较于2000—2010年,响应层指数的增长更为显著,表明人类活动对耕地利用的投入显著增加。在国家层面始终重视耕地保护,内蒙古自治区政府积极落实国家政策,通过增加农业投资、引进先进技术以提升耕地生产力,并完善耕地保护机制,明确责任归属。此外,通过扩大灌区面积、提升有效灌溉率,以及对土地沙化严重区域实施风沙治理,确保了造林面积的稳定增长。



注:\*表示  $p \leq 0.05$  水平显著相关; \*\*表示  $p \leq 0.01$  水平显著相关; \*\*\*表示  $p \leq 0.001$  水平显著相关。

图2 农牧交错区耕地韧性水平影响因子相关性分析  
 Fig.2 Correlation analysis of factors affecting resilience level of cultivated land in agro-pastoral ecotone of Inner Mongolia

3.1.3 农牧交错区耕地韧性水平时空演变特征 图4为2000—2022年内蒙古农牧交错区耕地韧性评价图。由图4可以看出,耕地韧性表现出显著的空间异质性特征,其总体韧性值相对较低。具体而言,东部区域的韧性值较高,而西部区域的韧性水平普遍处于中等偏下。这一现象与东部赤峰市作为主要农耕区的地位相吻合,该地区主要种植农作物。相比之下,西部区域由于耕地多分布在坡地以及面临撂荒

问题整体韧性水平较低。本研究采用自然断点法将韧性水平划分为5个等级(韧性水平以R表示):高韧性水平( $10.88 \leq R \leq 21.50$ )、中高韧性水平( $6.51 \leq R < 10.88$ )、中韧性水平( $3.35 \leq R < 6.51$ )、次低韧性水平( $1.97 \leq R < 3.35$ )、低韧性水平( $0.84 \leq R < 1.97$ )<sup>[14]</sup>。测算结果显示:

(1) 赤峰市。各旗县在不同区域2000—2022年耕地韧性水平表现出显著的差异性与变化趋势。具

体而言,赤峰市北部旗县的耕地韧性水平普遍较低,这与当地的自然环境和土地利用方式的复杂性密切相关。通过综合分析赤峰市各旗县耕地韧性水平的时空演变特征,可以得出赤峰市耕地保护形势总体向好的结论,大部分旗县均表现出耕地韧性水平的

提升。然而,22 a来的显著变化也反映出耕地利用系统的不稳定性,其可持续性、恢复力及稳定性有所减弱。因此,建议加强人力投入以保护耕地资源,确保耕地的可持续利用,并实施耕地“数量、质量、生态”三位一体的保护策略。

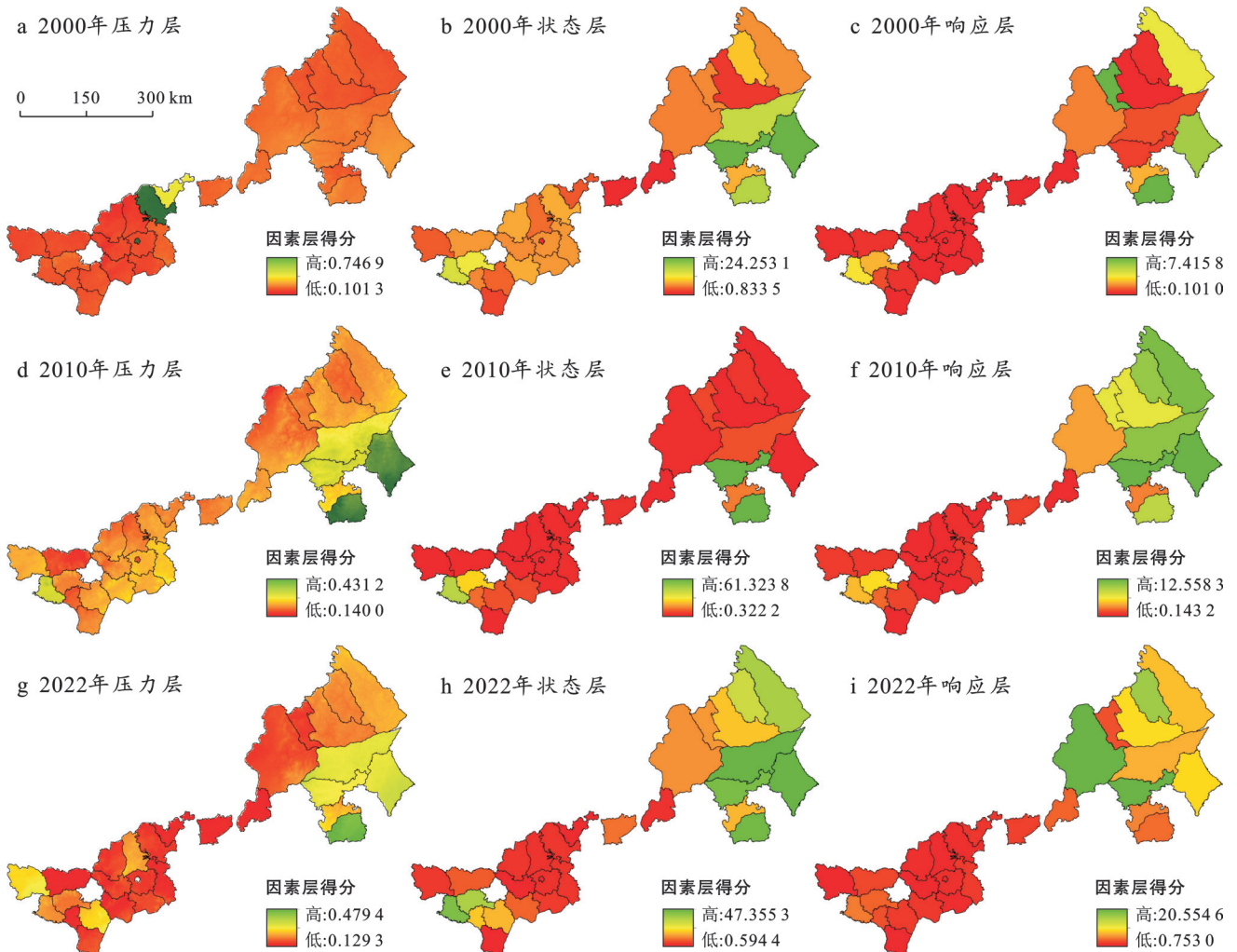


图3 内蒙古农牧交错区耕地韧性水平 PSR 子系统时空演变  
 Fig.3 Spatial and temporal evolution of PSR subsystem of cultivated land resilience level in agro-pastoral ecotone of Inner Mongolia

表3 内蒙古农牧交错区耕地韧性水平 PSR 子系统因素层得分  
 Table 3 Factor layer scores of PSR subsystem for resilience level of cultivated land in agro-pastoral ecotone of Inner Mongolia

项目	压力层得分			状态层得分			响应层得分		
	2000年	2010年	2022年	2000年	2010年	2022年	2000年	2010年	2022年
最大值	0.746 9	0.431 2	0.479 4	24.253 1	61.323 8	47.355 3	7.415 8	12.558 3	20.554 6
最小值	0.101 3	0.140 0	0.129 3	0.833 5	0.322 2	0.594 4	0.101 0	0.143 2	0.753 0
均值	0.424 1	0.285 6	0.175 1	12.543 3	30.823 0	23.974 9	3.758 4	6.350 8	10.653 8

(2) 包头市。两个旗县耕地韧性水平存在显著差异。具体而言,固阳县的耕地韧性水平较低,而土默特右旗的耕地利用系统韧性则表现出较高的稳定性,22 a来一直保持在中高韧性水平。土默特右旗的

粮食产量显著高于固阳县,其人口密度也较固阳县为高,但城镇化水平则相对较低。相比之下,固阳县的耕地利用系统处于较为脆弱的状态,面对外部环境变化时,其抵抗风险的能力较弱。此外,包头市两

旗县的耕地韧性差异也与其经济结构和发展模式紧密相关。固阳县由于自然条件限制和经济基础相对薄弱,耕地利用方式较为传统,缺乏现代化的农业技术和管理手段,耕地韧性水平较低。相比之下,土默特右旗在经济发展上更加注重农业现代化和科技创新,通过引进先进的农业技术和设备,提高粮食生产效率,从而增强了耕地利用系统的稳定性和韧性。

(3) 呼和浩特市。土默特左旗耕地韧性水平较稳定,为中高韧性水平。和林格尔县耕地韧性水平有所提升,由次低韧性水平提升为中韧性水平。武川县、清水河县耕地韧性水平均为次低韧性水平和低韧性水平,托克托县的耕地韧性水平22 a来均处于较高水平,各旗县要提高耕地韧性,有效进行农牧结合,耕地条件不好时可以退耕休耕,更好地保护耕作层。

(4) 锡林郭勒盟。太仆寺旗、多伦县耕地韧性水平均为次低韧性水平和低韧性水平,太仆寺旗耕地韧性水平有提升趋势,多伦县22 a间均为低韧性水

平,以上旗县耕地利用系统较不稳定,调节能力较差,同时机械投入水平较低,耕地调节能力及应对外界风险能力较差。

(5) 乌兰察布市。乌兰察布市绝大部分区域均处于低韧性水平,唯有凉城县耕地韧性水平没有降低,22 a间处于次低韧性水平,整体韧性水平没有提升,需要提高警惕。调查显示,乌兰察布市耕地状况较差,大多数耕地面临撂荒,无人耕种,韧性调节能力较差,耕地利用系统恢复力与自组织能力较差的问题,应对外界压力变化时,难以抵抗外界风险。就总体来看,内蒙古农牧交错区耕地韧性总体出现差异,呈现东部高、西部较低的趋势,但大多数地区耕地韧性均处于中低水平,高水平韧性地区寥寥无几。内蒙古气候条件恶劣,降雨量少,多大风天气,造成水土流失、土地沙化,土壤风蚀严重。除此之外,农村留存人口大部分为老人,有耕作条件的青年人大多都外出务工,导致大部分耕地撂荒、无人耕种,如何提升耕地流转效率是该区域亟待解决的问题。

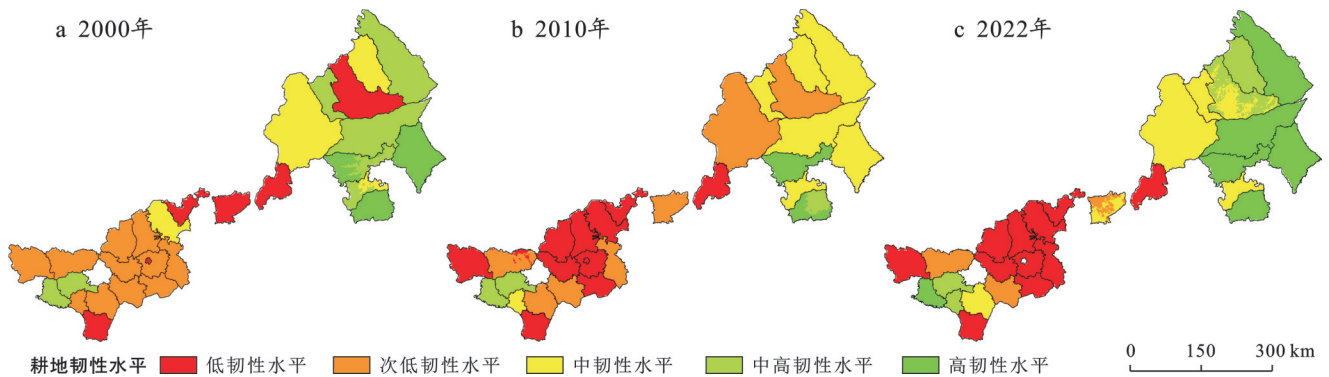


图4 内蒙古农牧交错区耕地韧性水平评价

Fig.4 Evaluation of resilience level of cultivated land in agro-pastoral ecotone of Inner Mongolia

### 3.2 农牧交错区耕地管控分区分析

为确保内蒙古地区粮食安全并有效保护耕地资源,本研究依据耕地韧性水平及其在22 a来的演变趋势,将研究区域划分为3个不同的韧性等级区域。具体而言,22 a期间耕地韧性水平持续保持在较高水平或呈现上升趋势的旗县,被归类为强—稳韧性区域,属于1级稳定种植区;22 a期间耕地韧性水平保持在中高或中等水平,或经历了先低后高变化的旗县,被划分为中—稳韧性区域,属于2级监测保护区;2000—2020年耕地韧性水平持续处于较低水平或呈现下降趋势的旗县,则被定义为弱—稳韧性区域,属于3级抚育休耕区(图5)。根据2000—2022年耕地韧性分区的研究结果,赤峰市各旗县在2000—2020年的耕地韧性分区表现出显著的空间异质性。翁牛特旗、松山区和宁城县均属于高韧性区域,这些区

域应强化自然保育措施,以充分发挥耕地韧性调节的积极影响。对于研究区的西部地带,仅有土默特右旗表现出高韧性特征,而土默特左旗、托克托县则属于中等至稳定韧性区域,其余地区则呈现出低韧性特征。因此,建议根据各旗县的实际情况实施分区管理策略,并研究具体的管理措施,以增强耕地韧性。

(1) 1级稳定种植区。主要分布于赤峰市的松山区、翁牛特旗、宁城县以及呼和浩特市土默特左旗,耕地利用系统韧性稳定区的旗县数量有限。该区域土壤条件优良,土壤有机质含量丰富,气候相对稳定,社会经济发展状况良好,对耕地利用系统的投入较高,耕地后备资源充足,耕地利用系统韧性值较高。在该区域内,应严格遵守耕地保护红线,坚决保护耕地及永久基本农田保护红线内的区域,遵循生

态优先、绿色发展的高质量发展路径,充分发挥粮食生产功能区的作用。适度扩大农作物种植面积,开发耕地后备资源,协调耕地与牧草地之间的关系,在确保作物产出的前提下,适当引入新技术和新方法,提升农业种植效率,释放生产力。即便该区域韧性水平较高,亦需注重保护,适度进行土地整治,保护土壤耕作层。针对区域内的黑土地,结合国土空间规划编制和“三区三线”划定工作,将黑土区内的耕地全部纳入耕地保护红线任务,优先将黑土层深厚、土壤性状优良的黑土耕地划为永久基本农田。

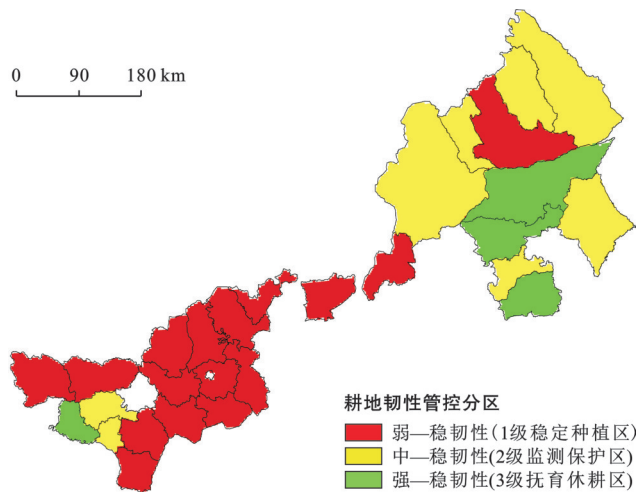


图5 内蒙古农牧交错区耕地管控分区

Fig.5 Cultivated land management zoning in agro-pastoral ecotone of Inner Mongolia

(2) 2级监测保护区。主要分布在托克托县、土默特左旗、阿鲁科尔沁旗、巴林左旗、敖汉旗、克什克腾旗、林西县、喀喇沁旗,该区域的耕地利用系统展现出较高的韧性,处于中等水平。具体而言,阿鲁科尔沁旗、巴林左旗的韧性值相对较高,这两个旗县的土壤状况较为优越,耕作面积较大。然而,其他旗县则面临区域资源质量不足、抵抗性较弱等问题。因此,必须增加人工投入,实施全域土地综合整治,以实现“精准治理”。应根据各地实际情况,采取针对性措施改良耕地问题,并提升区域机械化水平。加强风沙危害治理和盐碱地的综合改造利用,坚持“以水定地”的原则,严格控制地下水的过度开采,促进水土平衡。增加有效灌溉面积,确保农作物生长所需的水分供应。同时,针对土地沙化问题,应构建防护林网、开展人工植树造林,建立北方生态安全屏障,有效防止水土流失。内蒙古农牧交错区长期以来存在农牧资源利用不合理、种植业与畜牧业持续争地、耕作线不断北移等问题。为此,应优化空间格局,综合评估草地与耕地的利用开发情况。在适宜耕作的区域优先考虑草地利用,确保优质耕地以保障粮食

生产。将耕地耕作区域视为弹性空间,在划定耕地和永久基本农田保护红线的基础上,针对区域内耕地细碎化、质量差的状况,可将耕地转变为草地,采用轮作养地的方式,兼顾畜牧业等产业发展<sup>[21]</sup>,实现耕地与草地的双重保护与利用,既保护了环境,又确保了经济的持续发展。

(3) 3级抚育休耕区。处于抚育休耕区域的旗县主要有固阳县、武川县、清水河县、和林格尔县、巴林右旗和处于研究区域的乌兰察布市各旗县、太仆寺旗、多伦县,相较于其他韧性区域,本研究区域的韧性值较低,耕地利用系统的调节能力较弱,这主要与该区域气候条件的不稳定性密切相关。该区域的降雨状况波动较大,且降雨量偏少,导致耕地水分供应不足。此外,该区域耕地撂荒现象严重,耕地利用强度低,导致撂荒风险增加。通过实地调查研究,发现该区域耕地分布不集中、呈现破碎化特征,耕地的破碎化是耕地韧性值下降的关键因素。因此,应坚持因地制宜的原则,依据国土空间的适宜性格局,实施农牧结合、粮草兼顾、生态循环用地模式,以遏制种植业的无序扩张。乌兰察布地区拥有广袤的乌兰察布大草原,是国家生态安全屏障的重要组成部分。针对耕地状况不佳的区域,应积极推行休耕或退耕还林还草政策,以养护耕地资源并发挥其生态屏障的功能。鉴于区域内人口老龄化问题严重,导致耕地撂荒无人耕种的风险增加,结合新占补平衡政策,可将优质耕地的园林等地转变为耕地,实现园地林地上山、上坡的转变。针对区域内耕地撂荒、无人耕种的问题,应发展乡村产业,吸引青壮年劳动力回归农村,参与耕地耕种,改善耕地状况,促进耕地资源的集中连片。对于耕作条件较差的土地,应实施退耕休耕政策,以恢复其耕作层;对于已撂荒的土地,应通过土地流转吸引外部投资,根据当地实际情况进行耕地利用;对于地理条件不佳的耕地,应将园林等地的优质耕地转变为耕地,实现园地林地上山、上坡的转变。

## 4 讨论

结合内蒙古农牧交错带研究而言,前人的研究大多从生态角度出发,探索生态功能变化及放牧压力、气候变化影响、土地利用变化等对生态系统的影响,前人的研究集中在内蒙古作为北方生态安全屏障的作用,将耕地、草地、林地等作为生态系统综合考虑,体现系统治理的思想。内蒙古作为特殊的空间,不仅是生态脆弱区,同时农牧交错,具有多种地形地貌,决定不同的用地类型,这就决定在研究时要将农牧放在一起综合考虑。与前人研究相比,本研

究主要以内蒙古农牧交错区为研究区域,探究区域内韧性水平高低,不同于对耕地进行健康评价和适宜性评价等,而是将韧性理论引入其中,评价区域内耕地韧性水平,旨在保持、提升耕地韧性,保障粮食安全,同时保护环境。

由于目前关于耕地韧性的研究文献较少,评价指标体系的建立有待进一步讨论完善,本研究只是依据各类驱动因素及其影响和效果进行韧性界定,未将土壤、降水等自然资源禀赋因素直接融入其中,而是通过产量水平等间接反映土壤和水潜在的生产力,还需在后续研究中进一步深化。此外,本文仅研究了内蒙古农牧交错带中重点区域的旗县,如何深入研究大尺度内的区域韧性,协调全域高质量发展,仍是需要重点研究的问题。

## 5 结论

(1) 内蒙古农牧交错区耕地韧性在时空演变上呈现出显著的差异性和动态性。从PSR子系统来看,压力层分值低于状态层和响应层,且压力层与状态层呈现反向变化趋势,响应层分值在22 a间持续上升,反映了耕地系统在应对外界压力时的动态响应机制。空间上,耕地韧性水平呈现“东部高,西部低”的分布格局,且不同区域韧性变化特征各异。例如,赤峰市耕地保护形势整体向好,但耕地利用的稳定性、可持续性和恢复力下降,需加强人力投入以保障耕地安全;包头市各旗县韧性水平差异显著,固阳县处于低韧性水平,亟需提升,而土默特右旗则维持在中高韧性水平;呼和浩特市土默特左旗韧性稳定,和林格尔县韧性有所提升;武川县、清水河县等地处于次低或低韧性水平,耕地系统调节能力较弱;托克托县韧性波动较大,需强化保护措施;乌兰察布市多数地区韧性水平较低,仅凉城县保持次低韧性但无显著提升,整体形势严峻。

(2) 本研究结合气候、土壤和社会经济等多层次指标,系统分析了内蒙古农牧交错区耕地韧性的时空演变规律及其驱动机制。结果表明,气候条件(如降雨量不稳定)、土壤质量(如风沙侵蚀)和社会经济因素(如人口老龄化和机械化水平)是影响耕地韧性的关键因素。在研究区域的东部,气候降水条件较为优越,耕地的韧性水平较高;西部地区有黄河流经,水资源条件相对较好,能够满足灌溉和排水的需求;而位于中间地带的区域,自然条件较为恶劣,耕地的韧性水平较低。然而,通过增加人工投入,该区域提升耕地韧性的潜力较大。针对不同区域的特点,根据22 a间韧性变化情况及其稳定性,将研究区域划

分为3个不同功能区,并提出了差异化的管控策略。1级稳定种植区应对耕地进行适应性管理,推广轮作、间作等种植模式,改善土壤结构,提高土壤肥力;2级监测保护区需加大人工投入,推进全域土地综合整治和精准治理,提升区域机械化水平,以进一步优化耕地利用系统;3级抚育休耕区由于受气候条件不稳定、降雨少、人口老龄化及耕地破碎化等因素影响,耕地利用系统调节能力弱,应采取退耕休耕、土地流转及优化耕地布局等措施,恢复和提升耕地质量。

本研究为内蒙古农牧交错区耕地保护与可持续利用提供了科学依据,不同区域的针对性策略有助于提高耕地韧性,实现农牧交错区耕地资源的合理配置与高效利用,促进区域农业可持续发展。

## 参考文献(References)

- [1] Holling C S. Resilience and stability of ecological systems [J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1973, 4:1-23.
- [2] Berkes F, Folke C. Linking social and ecological systems for resilience and sustainability [C] // Berkes F, Folke C. *Linking Social and Ecological Systems: Management Practices and Social Mechanisms for Building Resilience*. Cambridge: Cambridge University Press, 1998:4.
- [3] Xu Xing, Wang Meimei, Wang Mingfeng, et al. The coupling coordination degree of economic, social and ecological resilience of urban agglomerations in China [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2023, 20(1):413.
- [4] Carl F. Resilience: The emergence of a perspective for social-ecological systems analyses [J]. *Global Environmental Change*, 2006, 16(3):253-267.
- [5] 赵华甫, 屈雪冰, 冯新伟, 等. 耕地的弹性变形理论及实证研究[J]. *地域研究与开发*, 2012, 31(2):73-77. Zhao Huafu, Qu Xuebing, Feng Xinwei, et al. The elastic deformation theory of cultivated land and its empirical research [J]. *Areal Research and Development*, 2012, 31(2):73-77.
- [6] 杨智慧, 路欣怡, 孔祥斌, 等. 中国耕地刚性管制与弹性调控框架构建[J]. *中国土地科学*, 2021, 35(6):11-19. Yang Zhihui, Lu Xinyi, Kong Xiangbin, et al. Construction of China's rigid control and resilient adjustment of cultivated land protection [J]. *China Land Science*, 2021, 35(6):11-19.
- [7] 钱家乘, 师诺, 赵华甫, 等. 中国耕地弹性管控的理论解析与研究框架: 从单一目标权衡到多目标协同[J]. *中国土地科学*, 2023, 37(3):38-47. Qian Jiacheng, Shi Nuo, Zhao Huafu, et al. Theoretical analysis and research framework of resilience manage-

- ment of cultivated land in China: From single-objective trade-offs to multi-objective synergy [J]. *China Land Science*, 2023, 37(3): 38-47.
- [8] 胡林影, 郭杰, 欧名豪, 等. 耕地系统保护的“刚性—弹性—韧性”: 理论框架与实施路径[J]. *规划师*, 2023, 39(11): 7-13.  
Hu Linying, Guo Jie, Ou Minghao, et al. The “rigidity-elasticity-resilience” of systematic farmland protection: Theoretical framework and implementation path [J]. *Planners*, 2023, 39(11): 7-13.
- [9] 孟丽君, 黄灿, 陈鑫, 等. 曲周县耕地利用系统韧性评价[J]. *资源科学*, 2019, 41(10): 1949-1958.  
Meng Lijun, Huang Can, Chen Xin, et al. Evaluation of cultivated land system resilience of Quzhou County [J]. *Resources Science*, 2019, 41(10): 1949-1958.
- [10] 李窠琪, 张翊, 付保红, 等. 昆明市耕地韧性评价及空间差异[J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(12): 4848-4855.  
Li Chengqi, Zhang Yi, Fu Baohong, et al. Resilience evaluation and spatial difference of cultivated land system in Kunming [J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(12): 4848-4855.
- [11] 祝锦霞, 潘艺, 张艳彬, 等. 种植类型变化对耕地系统韧性影响的关键阈值研究[J]. *中国土地科学*, 2022, 36(4): 49-58.  
Zhu Jinxia, Pan Yi, Zhang Yanbin, et al. Research on the key threshold of the resilience of cultivated land system under planting changes [J]. *China Land Science*, 2022, 36(4): 49-58.
- [12] 李玉恒, 黄惠倩, 郭桐冰, 等. 多重压力胁迫下东北黑土区耕地韧性研究及其启示: 以黑龙江省拜泉县为例[J]. *中国土地科学*, 2022, 36(5): 71-79.  
Li Yuheng, Huang Huiqian, Guo Tongbing, et al. Research on cultivated land resilience of the black soil region in the northeast China under multiple stresses and its implications: The study of Baiquan County, Heilongjiang Province [J]. *China Land Science*, 2022, 36(5): 71-79.
- [13] 苗欣然, 李泽红, 王梦媛. 粮食供应安全下东北黑土区耕地利用系统韧性时空演变: 以齐齐哈尔市为例[J]. *资源科学*, 2023, 45(9): 1801-1816.  
Miao Xinran, Li Zehong, Wang Mengyuan. Spatiotemporal changes of cultivated land use system resilience in the black soil region of northeast China under food supply security: A case study of Qiqihar City [J]. *Resources Science*, 2023, 45(9): 1801-1816.
- [14] 李文博, 闫卓冉, 张英男, 等. 食物系统韧性视角下的城市区域耕地利用再地化转型[J]. *中国土地科学*, 2023, 37(11): 63-72.  
Li Wenbo, Yan Zhuoran, Zhang Yingnan, et al. Resilience of food systems: Relocalized transition of cultivated land use in the city-region [J]. *China Land Science*, 2023, 37(11): 63-72.
- [15] 吕军骁, 江婉婷, 马凌, 等. 太行山山地及山前平原耕地系统韧性评价: 以石家庄市为例[J]. *地理与地理信息科学*, 2024, 40(6): 110-117.  
Lyu Junxiao, Jiang Wanting, Ma Ling, et al. Resilience evaluation of cultivated land system in Taihang Mountains and piedmont plains: A case study of Shijiazhuang City [J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2024, 40(6): 110-117.
- [16] 金晨阳, 杜宏茹. 新疆耕地系统韧性时空变化特征及其分区划定[J]. *干旱区研究*, 2024, 41(10): 1778-1788.  
Jin Chenyang, Du Hongru. Characteristics of spatial and temporal changes and zoning of cultivated land resilience in Xinjiang [J]. *Arid Zone Research*, 2024, 41(10): 1778-1788.
- [17] 吉泽男, 王鹏程. 干旱地区耕地系统韧性水平测度及动态演进: 以新疆为例[J/OL]. *农业资源与环境学报*, 2024: 1-14. (2024-06-12) [2024-04-22]. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=NHFZ20240610003&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.  
Ji Zenan, Wang Pengcheng. Measurement and dynamic evolution of cultivated land system resilience level in arid areas: A case study of Xinjiang [J/OL]. *China Industrial Economics*, 2024: 1-14. (2024-06-12) [2024-04-22]. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=NHFZ20240610003&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
- [18] 吕添贵, 陈安莹, 付舒斐, 等. 农业绿色转型下中国耕地系统韧性时空演化特征及其影响因素研究[J]. *生态学报*, 2025, 45(6): 2891-2904.  
Lü Tianguai, Chen Anying, Fu Shufei, et al. Spatial-temporal evolution characteristics and influencing factors of cultivated land system resilience in China under agricultural green transformation [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2025, 45(6): 2891-2904.
- [19] Rose A. Economic resilience to natural and man-made disasters: Multidisciplinary origins and contextual dimensions [J]. *Environmental Hazards*, 2007, 7(4): 383-398.
- [20] Yang Jie, Huang Xin. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019 [J]. *Earth System Science Data*, 2021, 13(8): 3907-3925.
- [21] 江雅婷, 赵伟, 骆佳玲, 等. 基于“极化—涓滴”理论的成渝地区双城经济圈休耕地分区研究[J]. *中国土地科学*, 2024, 38(2): 73-82.  
Jiang Yating, Zhao Wei, Luo Jialing, et al. Study on zoning of fallow land in the Chengdu-Chongqing economic circle based on the theory of polarization and trickle-down effect [J]. *China Land Science*, 2024, 38(2): 73-82.