

基于熵权集对分析的西北地区耕地生态安全水平差异比较

刘锐^{1,2},李涛³

(1.兰州大学资源环境学院,甘肃兰州730000;2.巢湖学院旅游管理学院,安徽合肥238000;
3.中国科学院地理科学与资源研究所,北京100101)

摘要:耕地生态安全是关系到粮食安全和人类生存发展的重要问题。构建基于PSR模型的耕地生态安全评价指标体系,运用熵权集对分析方法和障碍度模型对西北地区耕地生态安全水平与障碍因子进行差异比较分析。结果表明:(1)2002—2016年西北地区耕地生态安全总体水平不断提高,但安全等级在地区内部差异明显,2002—2008年,新疆、甘肃、宁夏维持“临界安全”等级不变,青海、陕西联系数主值分别为0.2334、0.2019,安全等级上升为“较安全”。2008—2016年,新疆联系数主值由0.0499提升为0.2692,安全等级上升为“较安全”;甘肃、宁夏维持“临界安全”等级;青海、陕西维持“较安全”等级;(2)西北地区压力和响应障碍度均值由2002年的52.434、26.270下降为2016年的38.479、17.353,状态障碍度均值则由21.296上升为44.168。要素层2002年和2016年障碍度均值分别为45.457、32.732、21.811,影响西北耕地生态安全水平障碍因子排序依次为压力、状态、响应。2002年西北地区耕地生态安全水平与压力、状态、响应障碍度的相关系数分别为-0.226、0.120、0.055;2016年分别为-0.830、0.851、-0.661。新疆、青海和陕西出现的耕地生态安全等级提升与状态障碍度大幅度增加有关;(3)新疆和青海耕地生态安全值上升源于人均水资源量的增加;陕西耕地生态安全值上升得益于耕地生产率的提高和耕地环境的改善,但城市建成区的扩张和水资源的短缺制约了生态安全等级提升;甘肃、宁夏耕地生态安全维持等级不变,主要受制于耕地数量的减少和耕地质量的下降等因素。针对西北各地区耕地生态安全提出升级建议。

关键词:耕地;生态安全;熵权集对分析;PSR模型;障碍因子;西北地区

中图分类号:S151 **文献标志码:**A

Comparison of differences in cultivated land ecological security levels based on entropy weight set analysis in Northwest China

LIU Rui^{1,2}, LI Tao³

(1. College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou, Gansu 730000, China;
2. College of Tourism Management, Chaohu University, Hefei, Anhui 238000, China;
3. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: The ecological security of cultivated land is an important issue related to food security and human survival and development. Based on the PSR model, the evaluation index system of ecological security for cultivated land was constructed, and the difference between the level of cultivated land ecological security and obstacle factors in Northwest of China was analyzed by entropy weight set analysis method and obstacle model. The results showed that: (1) From 2002 to 2016, the overall level of ecological security of cultivated land in Northwest of China continued to improve, but the security level within the region was significantly different. Xinjiang, Gansu, and Ningxia maintained the level of “critical safety” from 2002 to 2008 while main value of the connection number of Qinghai and Shaanxi was 0.2334 and 0.2019, respectively, and the security level was upgraded to “relative safety”. From 2008 to 2016, the main value of connection number of Xinjiang increased from 0.0499 to 0.2692 and the security level was upgraded to “relative safety”. Gansu and Ningxia maintained the level of “critical safety”. Qinghai and

Shaanxi maintained the level of “relative safety”; (2) From 2002 to 2016, the mean value of stress and response barriers in Northwest of China decreased from 52.434 and 26.270 in 2002 to 38.479 and 17.353 in 2016, respectively, while the mean value of state barriers increased from 21.296 in 2002 to 44.168. In 2002 and 2016, the average barrier value of each factor layer was 45.457, 32.732, and 21.811, respectively. The order of the barrier factors affecting the ecological security level of cultivated land in Northwest of China was pressure, state, and response. In 2002, the correlation coefficients of cultivated land ecological security level, pressure, state, and response obstacle degree in Northwest of China were -0.226 , 0.120 , and 0.055 , respectively, and in 2016 were -0.830 , 0.851 , and -0.661 , respectively. The improvement of cultivated land ecological security level in Xinjiang, Qinghai, and Shaanxi showed a significant positive correlation with state obstacle degree; (3) The increase in ecological security value of cultivated land in Xinjiang and Qinghai was due to the increase of per capita water resources while the increase of ecological security value of cultivated land in Shaanxi Province benefited from the improvement of productivity and environment of cultivated land. However, the expansion of urban built-up areas and the shortage of water resources restricted the improvement of ecological security level. The maintenance level of ecological security of cultivated land in Gansu and Ningxia is mainly restricted by the reduction of cultivated land quantity and the decline of cultivated land quality. Some suggestions on upgrading the ecological security cultivated land in Northwest region were put forward.

Keywords: cultivated land; ecological security; entropy weightset pair analysis; PSR model; obstacle factor; Northwest region

耕地是人类赖以生存和发展的重要物质基础,对地球环境有非常重要的生态服务功能,经过人类长期干预,耕地生态系统逐渐演变为高度耦合的自然-社会-经济-生态复合系统^[1-2]。随着耕地开发进程的深入,出现了耕地资源的数量降低、耕地的投入产出效率偏低和耕地周围的生态环境恶化等一系列影响耕地生态安全的问题^[3]。因此,科学准确地开展区域耕地生态安全评价,优化区域耕地生态安全的改善路径,对于提高耕地利用效率、支撑经济社会稳定发展、保护生态环境及实现区域可持续发展具有较高的理论意义和现实意义^[4]。通过梳理已有相关文献,耕地生态安全研究主要涉及如下方面:(1)从不同角度和不同尺度对耕地生态安全进行评价。张详义^[5]、吴大放^[6]、聂艳^[7]、郭荣中^[8]等分别对河北省肥乡县、广州市、湖北省、长株潭地区等进行了研究。(2)依据可持续发展理论,注重从多维度视角构建耕地生态安全评价指标体系。张详义^[5]、聂艳^[7]等以自然、经济、社会等要素分别对河北省肥乡县、湖北省耕地生态安全进行评价;贾书楠^[9]、张锐^[10]、李政^[11]等分别基于能值理论、PSR模型、DPSIR模型构建耕地生态安全指标评价体系。(3)运用计量经济方法量化反映耕地生态安全状态,形成较为系统的耕地生态安全评价研究方法。主要包括量子遗传投影寻踪模型^[7]、熵权物元模型^[5]、改进生态足迹模型^[12]、熵权TOPSIS法^[11]、耗散结构理论^[13]、集对分析法^[14]等方法。(4)耕地生态安全影响因素与调控策略。国内学者

对耕地生态安全影响因素的研究大多从单一视角出发,缺乏全面性和系统性,且注重理论分析,缺乏实证分析^[15-16]。因此,以耕地生态安全作为耕地资源可持续利用研究的切入视角,对评价不同时空尺度和研究对象均具代表性。耕地生态安全研究是复杂、系统的科学问题,然而,耕地生态安全研究存在指标权重确定的主观性和框架模型设置包容性不足等问题,需要进一步改进与完善。一方面,运用熵权法可以根据指标间的离散程度来确定权重,避免了权重确定的主观性,在一定程度上改善和提高了评价的质量;另一方面,PSR概念模型从压力、状态、响应3个角度综合测度不同系统对耕地生态系统的反应与响应结果并整合为耕地生态安全评价模型,可更加客观、准确地反映西北地区耕地生态安全特征及形成过程。鉴于此,基于压力-状态-响应(PSR)模型,在构建耕地生态安全评价指标体系基础上,运用熵权法和集对分析理论,建立耕地生态安全评价模型,对西北地区耕地生态安全水平和障碍因子进行差异比较分析,旨在为耕地生态安全评估提供一种新思路,也为西北地区合理利用耕地资源及保护生态安全提供理论和技术支撑。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

中国西北地区属温带大陆性气候,为资源型缺水型,光热资源丰富,干燥少雨,蒸发强烈,昼夜温差大,植被覆盖稀疏,主要以草原、荒漠为主。该区

域位于大兴安岭以西,长城和昆仑山—阿尔金山—六盘水以北,介于 $31^{\circ}32' \sim 49^{\circ}10'N$, $73^{\circ}15' \sim 111^{\circ}15'E$ 之间,包括青海省、甘肃省、陕西省、宁夏回族自治区和新疆维吾尔自治区,总面积达 310 万 km^2 ,约占全国总面积的 32.3%。西北地区由于所处地理位置特殊,不仅是全球气候变化响应最敏感的地带、生态环境变化最脆弱的地区^[17],也是我国耕地资源富集的地区。当前耕地已成为我国经济社会发展的重要约束性稀缺资源,因此研究西北地区耕地生态安全对实现我国经济社会的稳定发展具有重要实践意义^[3]。

1.2 数据来源

文中采用的数据主要来源于 2003、2009 和 2017 年的《中国农业统计年鉴》、《新疆统计年鉴》、《甘肃统计年鉴》、《宁夏统计年鉴》、《青海统计年鉴》和《陕西统计年鉴》等并整理计算得到。

2 研究方法

2.1 集对分析法

集对分析法是通过结合确定性和非确定性问题以进行同异反定量分析的方法^[18]。本研究运用集对分析方法计算耕地生态安全指数,将具有紧密联系的 2 个集合看成一个集对,通过引入同异反联系度来分析集合之间的联系程度,以便统一处理随机、模糊、中介和信息不完全所致的不确定性^[19]。具体公式表示如下:

$$\mu = a + bi + cj \quad (1)$$

式中, μ 表示 2 个集合之间的同异反联系度, a 、 b 、 c 分别表示同一度、差异度和对立度,且满足归一化条件 $a + b + c = 1$; i 、 j 分别为差异度系数和对立度系数, $i \in [-1, 1]$, j 一般情况下取 -1 ^[20]。同一度和差异度主要用来描述集合之间的确定性关系,差异

度主要用来描述其不确定性关系。

在具体运算时,联系度 μ 又可以看作一个数,称为三元联系数。因此,多元联系数就是针对 $\mu = a + bi + cj$ 在不确定项 bi 上展开为 n 项,从而得到的一种具有层次结构的函数: $\mu = a + b_1i_1 + \dots + b_ni_n + cj$, 其中, i_1, \dots, i_n , 取值通常采取均分取值法,即位于 $[-1, 1]$ 区间的 n 个 $n+1$ 等分处, $i_k = -1 + (n+1-k) \frac{2}{n+1}$, $k = 1, 2, \dots, n$ 。

根据集对分析基本原理,设西北地区耕地生态安全评价指标体系为集合 A,耕地生态安全评价等级为集合 B。设 I_m 代表要素层评价指标, I_{mq} 代表指标层评价指标, I_{mq} 的观测值为 t_{mq} 。评价等级为五级,有 4 个临界值分别表示为 a_{mq1} 、 a_{mq2} 、 a_{mq3} 、 a_{mq4} ,从而可以建立指标层、要素层和目标层的耕地生态安全复杂系统评价的五元联系数,并通过均分原则确定耕地生态安全等级^[21-22]。具体步骤如下:

(1) 指标层评价指标五元联系数计算公式

耕地生态安全指标层评价指标 I_{mq} 的五元联系数为:

$$\mu_{mq} = r_{mq1} + r_{mq2}i_1 + r_{mq3}i_2 + r_{mq4}i_3 + r_{mq5}j \quad (2)$$

式中, $r_{mqi} \in [0, 1]$ 是指标层指标 I_{mq} 相对于评价等级 B_i 的联系度分量; μ_{mq} 为指标层指标 I_{mq} 的五元联系数,其计算公式如表 1。

(2) 要素层和目标层的五元联系数计算公式

要素层综合评价五元联系数为:

$$\mu_m = r_{m1} + r_{m2}i_1 + r_{m3}i_2 + r_{m4}i_3 + r_{m5}j \quad (3)$$

$$r_{mi} = \sum_{q=1}^{k_m} \omega_{mq} r_{mqi}, \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (4)$$

式中, μ_m 为要素层评价指标 I_m 的五元联系数; ω_{mq} 为要素层评价指标 I_m 的权重; k_m 为要素层评价指标 I_m 包含的指标层评价指标 I_{mq} 的个数。

表 1 指标层指标 I_{mq} 的综合评价五元联系数计算公式

Table 1 Calculation formula for five-element connection number of indicator indicators I_{mq} comprehensive evaluation

正向指标 Positive indicators	负向指标 Negative indicators	联系数 Connection number μ_{mq}
$t_{mq} \leq a_{mq1}$	$t_{mq} \geq a_{mq1}$	$1 + 0i_1 + 0i_2 + 0i_3 + 0j$
$a_{mq1} \leq t_{mq} \leq \frac{a_{mq1} + a_{mq2}}{2}$	$\frac{a_{mq1} + a_{mq2}}{2} \leq t_{mq} \leq a_{mq1}$	$\frac{ 2t_{mq} - a_{mq1} - a_{mq2} }{ a_{mq1} - a_{mq2} } + \frac{ 2t_{mq} - 2a_{mq1} }{ a_{mq1} - a_{mq2} } i_1 + 0i_2 + 0i_3 + 0j$
$\frac{a_{mq1} + a_{mq2}}{2} < t_{mq} < \frac{a_{mq2} + a_{mq3}}{2}$	$\frac{a_{mq2} + a_{mq3}}{2} \leq t_{mq} \leq \frac{a_{mq2} + a_{mq3}}{2}$	$0 + \frac{ 2t_{mq} - a_{mq2} - a_{mq3} }{ a_{mq1} - a_{mq3} } i_1 + \frac{ 2t_{mq} - a_{mq1} - a_{mq2} }{ a_{mq1} - a_{mq3} } i_3 + 0i_2 + 0j$
$\frac{a_{mq2} + a_{mq3}}{2} \leq t_{mq} \leq \frac{a_{mq3} + a_{mq4}}{2}$	$\frac{a_{mq3} + a_{mq4}}{2} \leq t_{mq} \leq \frac{a_{mq2} + a_{mq3}}{2}$	$0 + 0i_1 + \frac{ 2t_{mq} - a_{mq3} - a_{mq4} }{ a_{mq2} - a_{mq4} } i_2 + \frac{ 2t_{mq} - a_{mq2} - a_{mq3} }{ a_{mq2} - a_{mq4} } i_4 + 0j$
$\frac{a_{mq3} + a_{mq4}}{2} \leq t_{mq} \leq a_{mq4}$	$a_{mq4} \leq t_{mq} \leq \frac{a_{mq3} + a_{mq4}}{2}$	$0 + 0i_1 + 0i_2 + \frac{ 2t_{mq} - 2a_{mq4} }{ a_{mq3} - a_{mq4} } i_3 + \frac{ 2t_{mq} - a_{mq4} - a_{mq3} }{ a_{mq3} - a_{mq4} } j$
$t_{mq} \geq a_{mq5}$	$t_{mq} \leq a_{mq5}$	$0 + 0i_1 + 0i_2 + 0i_3 + 1j$

目标层综合评价五元系数为:

$$\mu = r_1 + r_2 i_1 + r_3 i_2 + r_4 i_3 + r_5 j \quad (5)$$

$$r_i = \sum_{m=1}^3 \omega_m r_{mi}, \quad i = 1, 2, 3, 4, 5 \quad (6)$$

式中, μ 为目标层的五元系数; ω_m 为指标 I_m 的权重; i_1, i_2, i_3 表示安全等级的不确定性差异度系数, $j = -1$,为对立度系数。总体评价系数随着耕地生态安全状况不断好转而不断发展变化。

(3) 耕地生态安全评价各级指标的五元系数主值

根据公式(6),由于 $\mu \in [-1, 1]$,按照“均分原则”,将 $[-1, 1]$ 区间4等分得4个子区间,当 i_1, i_2, i_3 从左至右依次取 $i_1 = 0.5, i_2 = 0, i_3 = -0.5$ 及 $j = -1$ 时,可得五元系数主值的主值 $\mu = r_1 + r_2 i_1 + r_3 i_2 + r_4 i_3 + r_5 j$ 。

(4) 耕地生态安全的评价等级确定

根据“均分原则”,将 $[-1, 1]$ 区间分为5等分,分别为 $(0.6 \sim 1.0)$ 、 $(0.2 \sim 0.6)$ 、 $(-0.2 \sim 0.2)$ 、 $(-0.6 \sim -0.2)$ 、 $(-1.0 \sim -0.6)$,该5个区间对应评价等级依次为“安全”、“较安全”、“临界安全”、“较不安全”、“不安全”。将得出的 μ 值与各个等级对应的区间范围进行对比,得到耕地生态安全评价等级, μ 值越大,说明评价等级越高,耕地生态安全状况越好^[14, 23-24]。

2.2 熵权法

熵权法是一种能够避免人为主观赋权和多变量间信息重叠的客观赋权法^[25]。在运用信息熵计算权重时首先对正向指标和逆向指标进行标准化处理,然后将所有数据平移0.5,以保证熵值求权时对数运算有意义,再次进行比重化变换,得到各指标的归一化值: $Z_{ij} = Y_{ij} / \sum_{i=1}^m Y_{ij}$,再由式 $\omega_i = (1 - E_i) / (n - \sum_{i=1}^n E_i)$ 计算得指标权重。式中, E_i 为第 i 个指标的熵值且 $E_i = -1/I_{nm} \sum_{i=1}^m Z_{ij} \times \ln(Z_{ij})$,且满足 $\sum_{i=1}^n \omega_i = 1$ 。

2.3 障碍因素诊断

通过因子贡献度、指标偏离度和障碍度三个指标诊断阻碍耕地生态安全的障碍因子及其影响程度大小。因子贡献度(Y_n)表示因子对总目标的贡献度;指标偏离度(P_n)表示单项指标与最大目标之间的差距设为指标标准化值与1之间的差距;障碍度(a_n)表示指标 n 对耕地生态安全的影响^[26]。其计算公式为:

$$P_n = 1 - X'_n \quad (7)$$

$$a_n = \frac{P_n \times Y_n}{\sum_{i=1}^{16} P_i \times Y_i} \times 100\% \quad (8)$$

3 结果与分析

3.1 评价模型构建

耕地生态安全是指一定时空尺度背景下,耕地生态系统为实现维持其正常功能结构和社会经济可持续发展而应达到的一种状态^[27]。耕地生态安全评价的目标是全面掌握耕地生态安全状况,揭示影响耕地生态安全的限制性因素,评估耕地生态安全水平,为耕地可持续利用提供科学依据。压力(Pressure)—状态(State)—响应(Response)模型是由联合国OECD和UNEP共同提出,目前该模型被广泛应用于人地关系、资源利用与可持续发展等研究领域^[28]。本研究借鉴PSR概念模型作为耕地生态安全评价指标体系的基本框架,耕地生态安全评价指标体系框架由3个层次构成,即目标层、要素层和指标层。目标层反映耕地生态安全的总体态势和总体效果,要素层是诊断生态系统的持续性、剖析人类活动与生态环境之间内在的因果关系,指标层是评价耕地生态安全水平的具体量度。依据耕地生态安全评价指标体系的基本框架,遵循科学性、主导性、区域性、可测度性和动态性等原则,在借鉴国内外现有研究成果的基础上^[5-10],遴选基于PSR模型的耕地生态安全评价指标体系(表2)。各项评价指标及其涵义为: $x_1 \sim x_6$ 为压力指标,表征人口增长、经济社会发展给耕地生态系统带来一定的压力。其中: x_1 人均耕地面积=耕地面积/总人口; x_2 单位耕地化肥负荷=化肥施用量/耕地面积; x_3 单位耕地农药负荷=农药施用量/耕地面积; x_4 土地垦殖率=耕地面积/土地面积; x_5 人口密度=总人口/土地面积; x_6 城市化水平=城镇人口/总人口; $x_7 \sim x_{11}$ 为状态指标,表征人类不断开发利用土地资源,通过人类活动向耕地生态系统排放污染,改变了耕地生态系统结构与功能。其中, x_7 森林覆盖率=森林面积/土地面积; x_8 单位耕地农业机械化水平=农业机械总动力/耕地面积; x_9 灾害指数=成灾面积/农作物播种面积; x_{10} 单位耕地粮食产量粮食总产量/耕地面积; x_{11} 人均水资源量=水资源总量/总人口; $x_{12} \sim x_{16}$ 为响应指标,表征耕地生态系统在压力条件下对原有状态的反应并反馈人类社会的过程,在此基础上,人类通过政策、环保投入等措施进行响应,从而改善耕地生态系统状态,实现可持

续发展。其中, x_{12} 灌溉保证率 = 耕地有效灌溉面积/耕地面积; x_{13} 第一产业产值占 GDP 比重 = 第一产业产值/GDP; x_{14} 农民人均纯收入 = 农民纯收入/农村人口; x_{15} 农业从业人员投入 = 农业从业人员数量/耕地面积; x_{16} 环保污染治理投资占 GDP 比重 = 环保污染治理投资额/GDP。

耕地生态安全评价的关键环节是评价标准的制定, 为科学合理地反映西北地区耕地生态系统的安全状况, 通过参考国家、行业及国际相关标准并借鉴前人的研究成果^[14, 29-31] 将耕地生态安全评级指标划分为 5 级, 即安全、较安全、临界安全、较不安全、不安全。具体标准见表 3。

3.2 西北地区耕地生态安全状况分析

在分析西北地区耕地生态安全评价指标数据基础上, 运用熵权法计算各评价指标的权重值(表 2), 依据集对分析原理, 计算耕地生态安全评价指标联系数主值, 并确定安全等级(表 4)。由表 4 可

知, 2002 年西北地区耕地生态安全联系数主值均小于 0.2, 安全等级均为“临界安全”, 2008 年新疆、甘肃、宁夏安全等级较 2002 年没有发生变化, 青海、陕西联系数主值分别为 0.2334、0.2019, 接近“较安全”等级下限, 2016 年新疆安全等级较 2008 年出现较大幅度提升, 联系数主值由 0.0499 提升为 0.2692, 安全等级提升为“较安全”, 甘肃、宁夏联系数主值较 2008 年略微增加, 但安全等级未发生改变, 仍然处于“临界安全”等级, 而青海、陕西联系数主值出现微降微升的状态, 安全等级仍然为“较安全”。从各省耕地生态安全的时序变化来看, 2002—2016 年期间, 甘肃、宁夏安全等级一直处于“临界安全”, 青海、陕西安全等级处于稳步提升状态, 由 2002 年的“临界安全”提升为 2008 年和 2016 年的“较安全”等级, 新疆则在 2008 年后安全状况有所提升, 由之前的“临界安全”提升为“较安全”等级。

表 2 西北地区耕地生态安全评价指标体系

Table 2 The evaluation index system of cultivated land ecological security in the northwest region

目标层 Target layer	要素层 Element Layer	评价指标 Evaluation index	安全趋向 Safety trend	权重 Weight			
				2002	2008	2016	
耕地生态安全 评价指数 Cultivated land ecological security evaluation index (S)	压力 Pressure (S1)	x1 人均耕地面积 Per capita cultivated land ($\text{hm}^2 \cdot \text{P}^{-1}$)	+	0.419	0.417	0.43	
		x2 单位耕地化肥负荷 Consumption of chemical fertilizer per hectare cultivated land ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)	-	0.179	0.201	0.193	
		x3 单位耕地农药负荷 Consumption of pesticide per hectare cultivated land ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)	-	0.160	0.180	0.158	
		x4 土地垦殖率 Rate of land reclamation/%	+	0.117	0.165	0.167	
		x5 人口密度 Population density ($\text{P} \cdot \text{km}^{-2}$)	+	0.146	0.165	0.193	
		x6 城市化水平 Urbanization rate/%	-	0.174	0.180	0.163	
	耕地生态安全 评价指数 Cultivated land ecological security evaluation index (S)	状态 State (S2)	x7 森林覆盖率 Forest coverage rate/%	+	0.224	0.108	0.126
			x8 单位耕地农业机械化水平 Consumption of agricultural mechanization per hectare cultivated land/ ($\text{kW} \cdot \text{hm}^{-2}$)	+	0.281	0.293	0.292
			x9 灾害指数 Disaster index/%	-	0.171	0.167	0.154
			x10 单位耕地粮食产量 Yield of cultivated land per hectare/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	+	0.221	0.218	0.147
			x11 人均水资源量 Water resources per capita/ ($\text{m}^3 \cdot \text{P}^{-1}$)	+	0.235	0.218	0.284
			x12 灌溉保证率 Probability of irrigation/%	+	0.203	0.225	0.250
	耕地生态安全 评价指数 Cultivated land ecological security evaluation index (S)	响应 Response (S3)	x13 第一产业产值占 GDP 比重 Primary industry production per GDP/%	+	0.302	0.29	0.277
			x14 农民人均纯收入 Average annual net income per farmer/yuan	+	0.152	0.162	0.162
			x15 农业从业人员投入 Input from agricultural workers ($\text{P} \cdot \text{hm}^{-2}$)	+	0.238	0.200	0.191
			x16 环保污染治理投资占 GDP 比重 Investment in environmental protection and pollution control per GDP/%	+	0.228	0.203	0.181

表 3 耕地生态安全评价等级标准

Table 3 The evaluation grading standard of cultivated land ecological security

评价指标 Evaluation index	评价标准 Evaluation criterion				
	1 级(安全) Grade I (Safety)	2 级(较安全) Grade II (Relative safety)	3 级(临界安全) Grade III (Critical safety)	4 级(较不安全) Grade IV (Less safety)	5 级(不安全) Grade V (Unsafe)
x1	>0.1	0.085~0.100	0.075~0.085	0.053~0.075	<0.053
x2	<225	225~400	400~600	600~800	>800
x3	<3	3~8	8~15	15~24	>24
x4	>30	20~30	15~20	10~15	<10
x5	<150	150~350	350~500	500~800	>800
x6	>70	40~70	20~40	10~20	<10
x7	>40	30~40	20~30	10~20	<10
x8	>9	6~9	4~6	2~4	<2
x9	<1	1~3	3~10	10~25	>25
x10	>8600	6400~8600	4200~6400	2000~4200	<2000
x11	>3000	2400~3000	1800~2400	1200~1800	<1200
x12	>80	60~80	50~60	40~50	<40
x13	>18	14~18	10~14	6~10	<6
x14	>6000	3500~6000	2500~3500	1500~2500	<1500
x15	>3	2~3	1.5~2.0	1.0~1.5	<1
x16	>3.00	1.50~3.00	1.00~1.50	0.1~1.00	<0.1

表 4 西北地区 2002—2016 年目标层的五元联系数、主值及安全等级

Table 4 Five-element connection number, main value and safety level of the target layer in the northwest region from 2002 to 2016

地区 Region	年份 Year	目标层的五元联系数 Five-element connection number of target layer	联系数主值 Main value of connection number	安全等级 Safety grade
新疆 Xinjiang	2002	$0.4143+0.0606i_1+0.1016i_2+0.1354i_3+0.2900j$	0.0869	临界安全 Critical safety
	2008	$0.3001+0.1729i_1+0.1427i_2+0.0955i_3+0.2889j$	0.0499	临界安全 Critical safety
	2016	$0.4109+0.1370i_1+0.1876i_2+0.1064i_3+0.1570j$	0.2692	较安全 Relative safety
甘肃 Gansu	2002	$0.3358+0.1016i_1+0.0942i_2+0.1216i_3+0.3514j$	-0.0256	临界安全 Critical safety
	2008	$0.2340+0.1441i_1+0.1946i_2+0.1152i_3+0.3103j$	-0.0618	临界安全 Critical safety
	2016	$0.3027+0.0767i_1+0.1997i_2+0.2103i_3+0.2097j$	0.0262	临界安全 Critical safety
宁夏 Ningxia	2002	$0.2449+0.0874i_1+0.2483i_2+0.2123i_3+0.2097j$	-0.0273	临界安全 Critical safety
	2008	$0.2668+0.1412i_1+0.1988i_2+0.1221i_3+0.2711j$	0.0053	临界安全 Critical safety
	2016	$0.3097+0.0705i_1+0.1353i_2+0.2050i_3+0.2786j$	-0.0362	临界安全 Critical safety
青海 Qinghai	2002	$0.3160+0.0993i_1+0.1907i_2+0.0721i_3+0.3238j$	0.0058	临界安全 Critical safety
	2008	$0.4104+0.1141i_1+0.1913i_2+0.1002i_3+0.1840j$	0.2334	较安全 Relative safety
	2016	$0.4397+0.1625i_1+0.0201i_2+0.1048i_3+0.2692j$	0.2007	较安全 Relative safety
陕西 Shaanxi	2002	$0.2637+0.2280i_1+0.1667i_2+0.0732i_3+0.2699j$	0.0713	临界安全 Critical safety
	2008	$0.3012+0.1324i_1+0.3022i_2+0.1616i_3+0.0846j$	0.2019	较安全 Relative safety
	2016	$0.3299+0.1527i_1+0.2510i_2+0.1709i_3+0.0944j$	0.2265	较安全 Relative safety

3.3 障碍因子诊断

运用障碍度模型,从要素层诊断西北地区耕地生态安全障碍因子(图 1)。西北地区耕地生态安全系统中要素层 3 个指标的障碍度程度与变化情况分别不同。从不同年份要素层障碍度变化情况来看,西北地区压力、状态和响应障碍度均值由 2002 年的 52.434、21.296、26.270 变化为 2016 年的 38.479、44.168、17.353,压力和响应呈下降趋势,而状态呈上升趋势。从要素层障碍度多年均值来看,2002 年和 2016 年两个年份西北地区压力、状态和响应障碍度均值分别为 45.457、32.732、21.811,压力一直是西北耕地生态安全系统最大的障碍因子,其次是状态,最后是响应。西北地区自然环境条件恶劣,要提高耕地生态安全水平,就要制定支农政策,强化耕地占补平衡,改善农业生产条件,改进耕作技术,积极推进土地整理、复垦,动态监测耕地质量,协调好耕地利用与经济社会发展和环境保护的关系。计算西北地区耕地生态安全联系数主值与压力、状态、响应障碍度的相关系数,得出 2002 年相关系数分别为-0.226、0.120、0.055,2016 年分别为-0.830、0.851、-0.661,可见西北地区耕地生态安全水平与要素层障碍度密切相关。新疆、青海和陕西耕地生态安全等级提升一方面与压力障碍度降低有关,另一方面与状态障碍度大幅度增加有关,表明依赖农业科学技术以提高土地集约化利用程度及加大土地投入以提高单位面积粮食产量可以显著提高耕地生态安全水平。

根据各评价指标障碍度大小,列出 2002 年和 2016 年西北地区耕地生态安全主要障碍因子(表

5)。2002 年阻碍西北地区耕地生态安全水平的障碍要素主要集中在压力、响应方面,主要包括人均耕地面积(x_1)、单位耕地化肥负荷(x_2)、人口密度(x_5)、城市化水平(x_6)、第一产业产值占 GDP 比重(x_{13})、农民人均纯收入(x_{14})、农业从业人员投入(x_{15})等;而 2016 年阻碍西北地区耕地生态安全水平的障碍要素主要集中在压力、状态方面,主要包括人均耕地面积(x_1)、单位耕地化肥负荷(x_2)、单位耕地农药负荷(x_3)、土地垦殖率(x_4)、人口密度(x_5)、灾害指数(x_9)、单位耕地粮食产量(x_{10})、人均水资源量(x_{11})等。从单向指标变化趋势分析可知,新疆和青海耕地生态安全值上升的主要原因是人均水资源量的大幅度增加。陕西耕地生态安全值上升得益于农业科研投入和环境治理投资的增加,提高了耕地生产率和耕地环境,但城市建成区的扩张、固定资产投资的增加和水资源的短缺制约了生态安全等级提升。甘肃、宁夏耕地生态安全维持等级不变,是由于耕地数量的减少和耕地质量的下降没有明显改善,农业生产技术条件的落后、农田施肥等原因致使耕地负荷严重,威胁生态安全。

4 结论与建议

4.1 结论

(1)2002—2016 年西北地区耕地生态安全总体水平不断提高,但安全等级在地区内部存在差异,表现为甘肃、宁夏维持“临界安全”等级不变,新疆、青海、陕西则由 2002 年的“临界安全”升级为 2016 年的“较安全”等级。

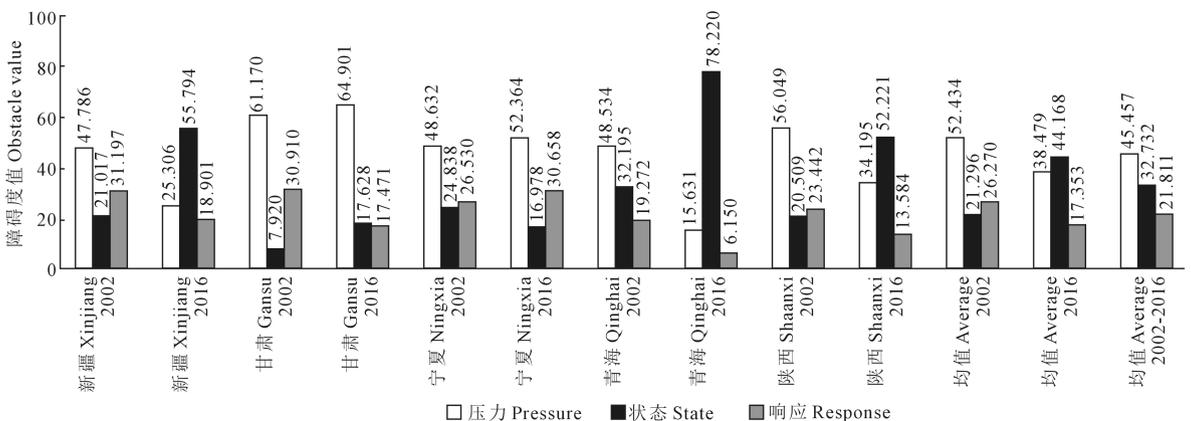


图 1 2002 年和 2016 年西北地区耕地生态安全要素层障碍度

Fig.1. Obstacle values of cultivated land ecological elements layer security in the northwest region in 2002 and 2016

表5 2002和2016年西北地区耕地生态安全障碍因子及障碍度

Table 5 Obstacle factors and degree of cultivated land ecological security in the northwest region in 2002 and 2016

地区 Region	年份 Year	第一障碍因子 First obstacle factor	第二障碍因子 Second obstacle factor	第三障碍因子 Third obstacle factor	第四障碍因子 Fourth obstacle factor	第五障碍因子 Fifth obstacle factor
新疆 Xinjiang	2002	x6(15.468)	x13(11.848)	x5(11.741)	x1(10.620)	x14(9.467)
	2016	x11(41.493)	x1(7.403)	x9(7.403)	x16(7.135)	x5(6.035)
甘肃 Gansu	2002	x2(19.884)	x13(19.718)	x1(15.878)	x5(15.443)	x15(10.881)
	2016	x1(16.540)	x2(14.329)	x6(11.801)	x4(11.501)	x11(10.852)
宁夏 Ningxia	2002	x6(14.920)	x1(12.072)	x14(11.107)	x10(9.175)	x9(8.690)
	2016	x4(17.165)	x16(16.031)	x3(14.890)	x1(13.460)	x10(12.779)
青海 Qinghai	2002	x6(17.118)	x5(16.425)	x15(13.999)	x8(13.950)	x2(11.421)
	2016	x11(75.093)	x5(4.897)	x2(4.757)	x3(4.450)	x15(3.428)
陕西 Shaanxi	2002	x6(21.149)	x15(15.687)	x4(14.282)	x2(11.883)	x7(11.238)
	2016	x4(15.788)	x9(15.263)	x10(13.904)	x3(12.095)	x11(10.811)

(2)2002—2016年西北地区要素层障碍度变化表现为压力和响应呈下降趋势,状态呈上升趋势。从2002年和2016年障碍度均值来看,影响西北地区耕地生态安全水平障碍因子排序依次为压力、状态、响应。新疆、青海和陕西耕地生态安全等级提升与状态障碍度大幅度增加有关。

(3)新疆和青海耕地生态安全值上升的主要原因是人均水资源量的大幅度增加。陕西耕地生态安全值上升得益于农业科研投入和环境治理投资的增加,提高了耕地生产率和耕地环境,但城市建成区的扩张、固定资产投资的增加和水资源的短缺制约了生态安全等级提升。甘肃、宁夏耕地生态安全维持等级不变,是由于耕地数量的减少和耕地质量的下降没有明显改善,农业生产技术条件的落后、农田施肥等原因致使耕地负荷严重,威胁生态安全。

4.2 建议

耕地是粮食生产的物质基础,维持耕地生态安全关系到粮食安全和农业的可持续发展。西北地区总体耕地生态安全水平不高,结合耕地生态安全评价等级标准(表3)分析,从主要障碍因子出发出现阶段各地区耕地生态安全水平的提升对策。

(1)新疆要持续完善耕地可持续利用的激励机制,积极做好防灾减灾工作。长期以来新疆积极的支农激励政策导致耕地开垦严重,今后应注重在耕地资源开发利用中兼顾保护和开发。2016年新疆排名前五的耕地生态安全障碍因子中灾害指数

(x9)为8.14%,位于第4安全等级,今后需要积极做好灾害预警与应对工作,建立政府农业保险政策,实现耕地的可持续利用。

(2)甘肃和宁夏应着力加大农田水利建设,积极推进土地整理和复垦政策,加强耕地质量监控。2016年排名前五位耕地生态安全障碍因子中土地垦殖率(x4)分别为12.62%和19.41%,位于第4和第3安全等级,人均水资源量(x11)分别为和 $646.40 \text{ m}^3 \cdot \text{P}^{-1}$ 和 $143.00 \text{ m}^3 \cdot \text{P}^{-1}$,均属于第5安全等级,且宁夏单位耕地粮食产量(x10)生态安全为第4等级,仅为 $2875.62 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,因此两地区目前面临的共性问题为耕地数量的减少和人均水资源量的短缺,今后应采取措施严格控制非农占地,注重土地深度开发与集约利用,加大农业投入力度,完善农田水利基础设施建设;针对宁夏单位耕地粮食产量较不安全的状况,还应积极改善农业生产条件,提升耕地质量。

(3)青海应持续加大水土保持生态建设项目力度,改善农业生产条件,实现耕地占补平衡。2008年以来,青海耕地生态安全属于“较安全”等级,排名前五的障碍因子安全等级较高,均为第2等级以上,其中人均水资源量的大幅度上升是生态安全状态转变的主要影响因素,但青海土地垦殖率(x4)为0.85%,单位耕地粮食产量(x10)仅为 $1755.17 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,究其原因,青海耕地大多分布于社会经济较发达的黄河流域和湟水河两岸,耕地占补平衡矛盾大,水土流失面积占比位居全国第四位,近年来通

过落实最严格的耕地保护政策,持续推进坡耕地水土流失综合治理工程建设,实现了耕地占补平衡,改善了农业生产条件,提高了粮食产量,增加了农民收入。

(4)陕西应加大农业投入力度和农田水利建设,改善耕地环境,提升耕地质量。陕西排名第 4 的障碍因子单位耕地粮食产量($\times 10$)为 $3\ 078.83\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,虽然高于西北其他地区,但仍然位于第 4 安全等级,人均水资源量($\times 11$)位于第 5 安全等级,仅为 $713.90\ \text{m}^3 \cdot \text{P}^{-1}$ 。此外,随着退耕还林政策的推进、人口的增加和城市化的快速发展在一定程度上也导致了耕地的减少,可见退耕还林政策推进、固定资产投资增加和水资源短缺制约了陕西生态安全等级提升,现阶段应加快土地开发与整理复垦,改善农业生产条件,加大农田水利建设的投入,合理开发和有效利用水资源。

参 考 文 献:

- [1] 姜广辉,张风荣,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.
- [2] 曹隽隽,周勇,叶青清,等.江汉平原耕地资源空间格局变化分析[J].经济地理,2013,33(11):130-135.
- [3] 谢花林,王伟,刘志飞.中国耕地利用研究[M].北京:中国农业出版社,2016:3-12.
- [4] 吴大放,刘艳艳,刘毅华,等.耕地生态安全评价研究展望[J].中国生态农业学报,2015,23(3):257-267.
- [5] 张详义,许喙,刘名冲,等.基于熵权物元模型的耕地生态安全评价研究—以河北省肥乡县为例[J].土壤通报,2014,45(2):18-23.
- [6] 吴大放,姚漪颖,刘艳艳,等.广州市番禺区耕地生态安全动态变化研究[J].生态科学,2016,35(9):160-168.
- [7] 聂艳,彭雅婷,于婧,等.基于量子遗传投影寻踪模型的湖北省耕地生态安全评价[J].经济地理,2015,35(11):172-178.
- [8] 郭荣中,杨敏华,申海建.长株潭地区耕地生态安全评价研究[J].经济地理,2015,35(11):172-178.
- [9] 贾书楠,孙睿,夏显力,等.西安市耕地生态安全测度及影响因素分析[J].水土保持研究,2016,23(3):164-169.
- [10] 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.
- [11] 李政,何伟,潘洪义,等.基于熵权 TOPSIS 法与 ARIMA 模型的四川省耕地生态安全动态预测预警[J].水土保持研究,2018,25(3):217-223.
- [12] 赵文晖,宁雅楠,杨伟州,等.基于改进生态足迹模型的保定市耕地生态安全时空变异分析[J].土壤通报,2015,46(4):796-802.
- [13] 陈磊,田双清,张宽,等.基于耗散结构理论的四川省耕地生态安全测度分析[J].水土保持研究,2017,24(3):307-313.
- [14] 郑华伟,张锐,孟展,等.基于 PSR 模型与集对分析的耕地生态安全诊断[J].中国土地科学,2015,29(12):42-50.
- [15] 朱红波.我国耕地资源生态安全的特征与影响因素分析[J].农业现代化研究,2008,29(2):194-197.
- [16] 吴大放,刘艳艳,刘毅华.耕地生态安全评价研究展望[J].中国生态农业学报,2015,23(3):257-267.
- [17] 邓铭江.中国西北“水三线”空间格局与水资源配置方略[J].地理学报,2018,73(7):1189-1203.
- [18] 赵克勤.集对分析及其初步应用[J].大自然探索,1994,13(1):67-72.
- [19] 施开放,刁承泰,孙秀锋,等.基于改进 SPA 法的耕地占补平衡生态安全评价[J].生态学报,2013,33(34):1317-1325.
- [20] 王文圣,金菊良,丁晶,等.水资源系统评价新方法—集对评价法[J].中国科学(E辑:技术科学),2009,3(99):1529-1534.
- [21] 李文宾,姚阿漫.基于熵权的五元联系数在地下水水质评价中的应用[J].水资源与水工程学报,2013,24(2):118-120.
- [22] 陆洲,马涛.地下水环境质量评价的一种新方法—集对分析法[J].环境保护科学,2005,31(5):53-55.
- [23] 汪明武,陈光怡,金菊良.基于熵权的土地整理方案集对分析模型[J].农业工程学报,2010,26(6):322-325.
- [24] 王宏伟,张鑫,邱俊楠.模糊集对分析法在水资源安全评价中的应用[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2011,39(10):209-214.
- [25] 徐晗.基于熵权法的陕西省农业干旱脆弱性评价及影响因子识别[J].干旱地区农业研究,2016,34(3):198-205.
- [26] 匡丽花,叶英聪,赵小敏,等.基于改进 TOPSIS 方法的耕地系统安全评价及障碍因子诊断[J].自然资源学报,2018,33(9):1627-1640.
- [27] 张锐,刘友兆.我国耕地生态安全评价及障碍因子诊断[J].干旱区研究,2013,22(7):945-951.
- [28] 程兰花,杨德刚,张新焕,等.基于 PSR 模型的新疆县域耕地集约利用时空演化特征[J].干旱区研究,2018,35(2):493-502.
- [29] 张小虎,雷国平,袁磊,等.黑龙江省土地生态安全评价[J].中国人口·资源与环境,2009,19(1):88-93.
- [30] 何蓓蓓.区域耕地资源安全研究[D].南京:南京农业大学,2009.
- [31] 余健,房莉,仓定帮,等.熵权模糊物元模型在土地生态安全评价中的应用[J].农业工程学报,2012,28(5):260-266.