

宋林韩,金 鹏,吴 桐,等. 陕北黄土高原耕地生态安全的时空格局[J]. 江苏农业科学,2020,48(12):249-257.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2020.12.051

陕北黄土高原耕地生态安全的时空格局

宋林韩¹,金 鹏²,吴 桐¹,卫新东^{1,2,3}

(1. 长安大学地球科学与资源学院,陕西西安 710054; 2. 长安大学土地工程学院,陕西西安 710054;
3. 自然资源部退化及未利用土地整治工程重点实验室/陕西省土地整治重点实验室,陕西西安 710075)

摘要:研究陕北黄土高原耕地生态安全的时空格局,加强耕地数量、质量和生态三位一体管护,提升耕地可持续利用水平。基于压力-状态-响应(PSR)模型建立评价指标体系,用熵值法计算指标权重,多目标综合评价法研究陕北黄土高原 2013、2017 年耕地生态安全时空格局,在此基础上,利用障碍度模型计算障碍因子及障碍度。研究结果显示:(1)与 2013 年比较,2017 年陕北黄土高原耕地生态安全水平空间格局呈现发展较好的趋势。(2)2017 年陕北黄土高原 25 个县(区、市)耕地生态安全障碍度存在差异。(3)2017 年耕地生态安全分布情况为南部>西部>中部>北部>东部。可见,陕北黄土高原耕地生态安全整体上向更安全的方向发展,未来更应从“惠民惠农”政策保护、生态安全知识普及、土地整治等方面来进一步提高研究区耕地生态安全。

关键词:耕地生态安全;压力-状态-响应(PSR)模型;障碍度模型;熵值法;障碍因子;陕北黄土高原

中图分类号: F323.211;X826 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2020)12-0249-09

耕地是土地资源的精华部分,是粮食安全的基础,其可持续利用是影响区域可持续发展的关键问题^[1]。耕地保护是国家的头等大事,事关经济平稳健康发展、政治昌明、社会稳定、生态文明和文化遗产^[2]。在新时期、新形势下,耕地保护重点推进国

土资源数量、质量、生态三位一体综合管理。耕地占补平衡制度作为耕地保护制度的“牛鼻子”^[3],自确立实施以来,基本上保证了耕地数量动态平衡和质量的相对稳定和提升,而耕地生态管护成为当今耕地管护研究的前沿和热点问题。党中央、国务院高度重视生态环境保护,党的十八大将生态文明建设提升到“五位一体”的发展高度,在党的十九大会议中,习总书记提出生态文明建设,提高生态安全度,而耕地生态安全作为建设生态文明的必经之路,耕地生态安全问题随之越来越受到重视。研究耕地生态安全问题对指导新时期合理利用耕地,促进耕地可持续利用水平,保障国家粮食安全、生态安全和社会稳定意义重大。

收稿日期:2019-06-23

基金项目:自然资源部退化及未利用整治工程重点实验室开放基金(编号:0031/211927180139);陕西省土地整治重点实验室开放基金(编号:0031/211927180170)。

作者简介:宋林韩(1995—),女,河南安阳人,硕士研究生,研究方向为土地资源利用与管理。E-mail:2316400397@qq.com。

通信作者:卫新东,博士,副教授,研究方向为土地资源管理。E-mail:weixindong@126.com。

[3] Holtman M A, Kobayashi D Y. Identification of rhodococcus thropolis isolates capable of degrading the fungicide carbendazim[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 1997, 47(5): 578-582.

[4] 程洁红,李慧蓉. 高效降解菌处理多菌灵农药生产废水的研究[J]. 上海环境科学,2003,22(10):690-694.

[5] Pattanasupong A, Nagase H, Sugimoto E, et al. Degradation of carbendazim and 2,4-dichlorophenoxyacetic acid by immobilized consortium on loofa sponge[J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2004, 98(1): 28-33.

[6] Mazellier P, Leroy E, de Laat J, et al. Degradation of carbendazim by UV/H₂O₂ investigated by kinetic modelling[J]. Environmental Chemistry Letters, 2003, 1(1): 68-72.

[7] Pattanasupong A, Nagase H, Inoue M, et al. Ability of a microbial consortium to remove pesticide, carbendazim and 2,4-dichlorophenoxyacetic acid[J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 2004, 20(5): 517-522.

[8] 张丽珍,乔雄梧,马利平,等. 多菌灵降解菌 NY97-1 的鉴定及降解条件[J]. 环境科学学报,2006,26(9):1440-1444.

[9] Zhang G S, Jia X M, Ma X H, et al. Isolation, identification and phylogenetic analysis of carbendazim-degrading bacterium strain[J]. Acta Microbiologica Sinica, 2004, 44(4): 417-421.

[10] 田连生,陈 菲. 多菌灵降解菌 T8-2 的分离及其降解条件研究[J]. 江苏农业科学,2008(6):271-274.

[11] 中国农业科学院植物保护研究所. 农药分析[M]. 8 版. 北京:化学工业出版社,1988.

目前,国外学者将对耕地生态安全与土地可持续利用和土地生态安全三者相结合^[4-5]。国内也有许多学者对耕地生态安全进行研究,其研究内容主要集中于耕地生态安全内涵。吴大放等将耕地生态安全定义为耕地生态安全,是指耕地资源环境、生态系统和社会经济的安全,是相对于生态威胁的一种功能状态^[6]。朱红波等将耕地资源生态安全的定义表述为在一定的时间和空间尺度内,耕地资源生态系统处于保持自身正常功能结构和满足社会经济可持续发展需要的状态^[7]。在研究方法上,评价指标体系建立了 PSR(压力-状态-响应)模型、DPSIR(驱动力-压力-状态-影响-响应)、EES(经济-环境-社会)模型^[8-10],评价中确定权重的方法有熵值法、组合赋权法、层次分析法^[11-13];评价方法有物元分析法、能值分析法、TOPSIS 法、集对分析评价法(SPA)^[14-17];评价因子分析有障碍度模型^[18-19];在研究尺度上有国家、省域、地级市域、县域^[20-24]。综上所述,当前关于耕地生态安全的研究大多侧重于内涵或进行单一区域的过程研究,在研究区域上多是从行政区划范围内或者粮食主产区^[25]进行耕地生态安全度评价,因而未能把握生态脆弱区的区域系统的时空格局。

基于以上已有研究成果,从微观视角,以 PSR 模型为基础,从压力、状态、响应 3 个方面建立耕地生态安全评价指标体系,熵值法计算权重,利用多目标综合评价法对陕北黄土高原耕地生态安全进行评价,最后利用 Arc GIS 10.2 将评价结果可视化。并利用障碍度模型计算陕北黄土高原各县(区、市)障碍因子及障碍度,为研究提升研究区耕地生态安全策略提供依据。

1 材料与方法

研究方法主要为熵值法、PSR 模型法和障碍度模型法。利用多因素综合加权法来综合评价研究区的耕地生态安全,其中 PSR 模型用于评价指标体系的建立;在多因素综合加权评价法中,确定权重的方法为熵值法;障碍度模型法用于障碍因子诊断,以确定提升研究区耕地生态安全的主要障碍因子。

指标体系的建立基于 PSR 模型,又称为压力-状态-响应模型。选择这一模型来建立指标体系的原因因为 PSR 模型充分考虑了人类行为对耕地生态系统的影响。压力准则层主要考虑了由于社会

发展,人类社会对耕地生态系统的影响产生的各种压力主要有人口压力、经济发展压力、生态污染压力,选择了人均耕地面积($\text{hm}^2/\text{人}$)、城镇化率(%)、单位耕地面积化肥负荷(kg/hm^2)、单位耕地面积农膜负荷(kg/hm^2)4 个指标;状态准则层是由于人类对耕地生态系统的干预,改变了耕地生态系统内部条件,从而影响到由耕地所产出的效益,选取的是年均降水量(mm)、森林覆盖率(%)、复种指数(%)、单位耕地粮食产量(kg/hm^2)4 项指标;响应准则层是指为了恢复耕地生态系统的各项功能,是指人类所采取的改善耕地生态系统的各种措施,选择农民人均纯收入(元)、第一产业比重(%)、单位耕地面积农业机械动力(kW/hm^2)、粮食安全系数(%)4 项指标来表示。

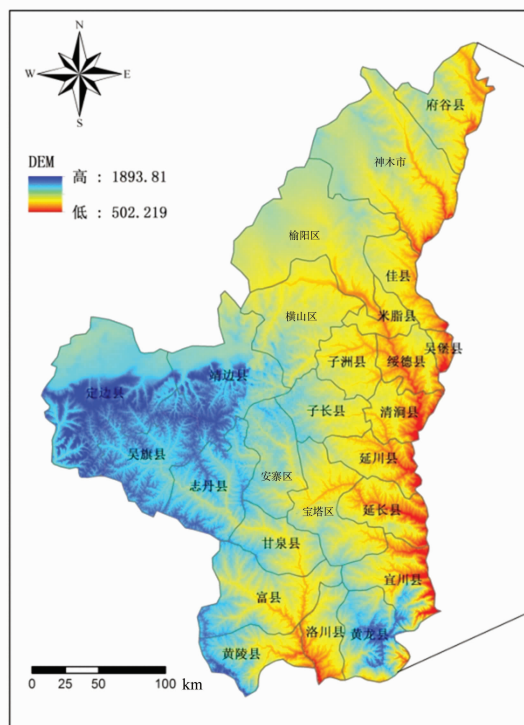
1.1 研究区概况

黄土高原地处内陆腹地,黄河中上游地区,位于 $33^{\circ}41' \sim 41^{\circ}16' \text{N}$ 、 $100^{\circ}52' \sim 114^{\circ}33' \text{E}$ 之间,包括山西省、陕西省、内蒙古自治区、河南省、甘肃省、宁夏回族自治区、青海省共 7 个省(区),区域总面积为 64.87 万 km^2 ,占全国土地总面积的 6.76%。陕北黄土高原位于陕西省北部、黄土高原中部,是黄土高原的核心区域。其地理位置介于 $35^{\circ}21' \sim 39^{\circ}34' \text{N}$ 、 $107^{\circ}15' \sim 111^{\circ}14' \text{E}$ 之间,平均海拔为 800 ~ 1 800 m,地势西北高、东南低,北部为毛乌素沙漠南缘,中部为黄土梁峁区,南部为山区。该区域属于欧亚大陆东部温带季风大陆气候,地跨干旱、半干旱过渡带,降水多集中在 7—9 月,多年平均降水量为 375 ~ 613 mm,植被表现出明显的过渡性,类型复杂多样。自然条件严酷,生态环境本底脆弱。在行政区域上的划分,陕北黄土高原包括榆林和延安地区的 25 个县(区、市),县(区、市)间自然资源禀赋和经济发展有明显差异,工农业地域发展不均衡。总面积为 79 981.9 km^2 ,占陕西省土地总面积的 38.9%,占整个黄土高原总面积的 12.6%。陕北黄土高原区域位置见图 1。

1.2 数据来源及处理

研究所选择的指标的数据来源为《陕西省统计年鉴 2014》《陕西省统计年鉴 2018》、榆林市 2017 国民经济和社会发展公报、榆林市 2013 国民经济和社会发展公报、延安市 2017 国民经济和社会发展公报、延安市 2013 国民经济和社会发展公报以及延安市和榆林市各县国民经济和社会发展公报。

数据的初步处理是对原始数据进行标准化,即



神木县、横山县、安塞县分别于 2017 年 4 月 9 日、2016 年 11 月 9 日、2016 年 10 月 15 日撤县改市(区), 为了统一性全文均用现用名, 但图 2-a 中仍沿用未改之前的

图1 陕北黄土高原区位

无量纲化处理。数据标准化分为正向指标标准化与负向指标标准化。具体计算公式如下:

$$X_{ij}' = \frac{X_{ij} - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (\text{正向作用指标}); \quad (1)$$

$$X_{ij}' = \frac{X_{\max} - X_{ij}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (\text{负向作用指标}). \quad (2)$$

式中: X_{ij} 和 X_{ij}' 为第 i 年第 j 指标的原始值和标准化值; X_{\max} 、 X_{\min} 为耕地生态安全诊断中第 j 项评价指标的标准最大值、最小值^[26]。

1.3 研究方法

1.3.1 熵值法 在信息系统中的信息熵是信息无序度的度量, 信息熵越大, 信息的无序度越高, 其信息的效用值越小; 反之, 信息熵越小, 信息的无序度越低, 其信息的效用值越大^[27]。选择熵值法来确定陕北黄土高原耕地生态安全评价指标的权重。

(1) 设评价指标体系有 m 个评价地区, n 项评价指标, 则形成原始指标数据矩阵 $\mathbf{X} = \{X_{ij}\}_{m \times n}$ ($0 \leq i \leq m, 0 \leq j \leq n$), X_{ij} 为第 i 年第 j 项指标的指标值。把每一项指标相同比例度量量化, 并计算第 j 指标在第 i 地区指标值的比重 P_{ij} :

$$P_{ij} = X_{ij}' / \sum_{i=1}^m X_{ij}' \quad (3)$$

(2) 计算第 j 项指标的熵值 e_j :

$$e_j = -k \sum_{i=1}^n P_{ij} \ln P_{ij} \quad (4)$$

令 $k = 1/\ln m$, 常数 k 为调节系数, 与样本数 n 有关。

$$e_j = -1/(\ln m) \sum_{i=1}^n P_{ij} \ln P_{ij} \quad (0 \leq e_j \leq 1) \quad (5)$$

(3) 计算第 j 项指标的差异性系数 g_j , g_j 值越大, 指标 X_j 就越重要。

$$g_j = 1 - e_j \quad (6)$$

(4) 计算第 j 项指标的权数 w_j :

$$w_j = g_j / \sum_{j=1}^m g_j \quad (7)$$

(5) 计算耕地生态安全指数 Y_i :

$$Y_i = \sum_{j=1}^m w_j X_{ij}' \quad (8)$$

1.3.2 障碍度模型 利用障碍度模型进行障碍因子诊断, 研究影响陕北黄土高原耕地生态安全的障碍因子, 更好地提出提高耕地生态安全度的建议, 为研究提升研究区耕地生态安全提供参考, 引入障碍度模型进行障碍因子诊断。障碍度模型如下:

$$A_j = \frac{r_{ij} \times w_j}{\sum_{j=1}^n r_{ij} \times w_j} \times 100\% \quad (9)$$

式中: A_j 为指标障碍度; r_{ij} 为指标偏离度, $r_{ij} = 1 - X_{ij}'$, X_{ij}' 为单项指标的标准化值; w_j 为因子贡献度^[28]。

1.4 指标体系

基于 PSR 模型的评价指标体系可以从总体上反映耕地生态系统与经济发展和人类活动间的相互关系,遵循科学性、系统性、可比性并考虑数据可获得的原则,并借鉴相关文献研究^[29],结合陕北黄土高原实地状况,从压力、状态、响应 3 个方面共选取 12 个指标建立指标体系,以研究陕北黄土高原耕

地生态安全时空格局变化。陕北黄土高原耕地生态安全评价指标体系见表 1。

1.5 评价标准确定

根据耕地生态安全评价指数结果,以自然断点分级法为基础,结合数据特征,将陕北黄土高原耕地生态安全等级划分为 5 个等级^[30],具体划分标准见表 2。

表 1 陕北黄土高原耕地生态安全评价指标体系及权重

目标层	准则层	指标层	符号	指标属性	权重
耕地生态安全	压力	人均耕地面积(hm ² /人)	C ₁	+	0.141 4
		城镇化率(%)	C ₂	-	0.045 4
		单位耕地面积化肥负荷(kg/hm ²)	C ₃	-	0.011 2
		单位耕地面积农膜负荷(kg/hm ²)	C ₄	-	0.028 1
	状态	年均降水量(mm)	C ₅	+	0.036 6
		森林覆盖率(%)	C ₆	+	0.065 5
		复种指数(%)	C ₇	+	0.067 1
		单位耕地粮食产量(kg/hm ²)	C ₈	+	0.118 3
	响应	农民人均纯收入(元)	C ₉	+	0.082 7
		第一产业比重(%)	C ₁₀	+	0.095 9
		单位耕地面积农业机械动力(kW/hm ²)	C ₁₁	+	0.157 8
		粮食安全系数(%)	C ₁₂	+	0.150 2

表 2 陕北黄土高原耕地生态安全评价等级划分标准

耕地生态安全指数范围	安全状态	特征
$Y_i \leq 0.20$	I 级风险	耕地生态系统受到严重干扰,生态环境被破坏、植被覆盖度低,农业污染、水土流失严重,生态恢复困难
$0.20 < Y_i \leq 0.25$	II 级敏感	耕地生态环境受到较大破坏,植被覆盖率低,耕地生态问题突出,耕地产量低,生态系统恢复较困难
$0.25 < Y_i \leq 0.30$	III 级临界安全	耕地生态环境受到较少干扰,植被覆盖率不高,时有发生农业污染与水土流失现象,有生态系统恢复的可能
$0.30 < Y_i \leq 0.45$	IV 级次安全	耕地生态系统结构较完整,植被覆盖度和土壤肥力较高,农业污染及水土流失较少发生,生态问题不显著
$Y_i > 0.45$	V 级安全	耕地生态系统结构完整,植被覆盖度高,土壤肥力高,无农业污染和水土流失现象,农业发展条件好

2 结果与分析

2.1 陕北黄土高原耕地生态安全评价结果

2013 年陕北黄土高原 25 个县(区、市)以及 2017 年陕北黄土高原的 25 个县(区、市)进行耕地生态安全评价,评价结果见表 3。

2.2 结果分析

分析陕北黄土高原耕地生态安全评价指数结果,利用 Arc GIS 工具将评价结果可视化,分析 2013、2017 年研究区耕地生态安全空间格局分布情

况以及 2013—2017 年时隔 5 年各县(区、市)的耕地生态安全指数变化,其可视化结果见图 2。

2.2.1 2013 年耕地生态安全指数空间分析 I 级风险区主要分布在绥德县、子长县、延川县、延长县、宝塔区这 5 个县(区)。从耕地生态安全评价指数上看,子长县、延川县、延长县、宝塔区这 5 个 I 级风险区有 50% 及以上的评价指标指数低于研究区平均指标指数(表 3)。其中,延川县的农民人均纯收入和单位耕地面积农业机械动力指标为陕北黄土高原中指数最低值,宝塔区粮食安全系数这一指

表 3 2013 年陕北黄土高原耕地生态安全指数

地区	压力指数	状态指数	响应指数	耕地生态安全指数
宝塔区	0.044 4	0.107 4	0.044 6	0.196 4
延长县	0.080 6	0.043 5	0.067 8	0.191 9
延川县	0.052 1	0.082 4	0.011 6	0.146 1
子长县	0.042 8	0.070 2	0.049 4	0.162 5
安塞区	0.056 7	0.121 0	0.053 2	0.230 9
志丹县	0.059 3	0.087 4	0.061 6	0.208 3
吴起县	0.162 4	0.041 3	0.208 7	0.412 4
甘泉县	0.044 8	0.143 5	0.111 0	0.299 2
富县	0.034 3	0.095 7	0.182 8	0.312 8
洛川县	0.058 9	0.225 6	0.214 0	0.498 5
宜川县	0.070 9	0.081 4	0.241 7	0.393 9
黄龙县	0.077 0	0.189 2	0.166 5	0.432 7
黄陵县	0.039 6	0.219 8	0.219 2	0.478 5
榆阳区	0.040 9	0.100 1	0.097 5	0.238 4
神木市	0.051 9	0.070 0	0.108 1	0.230 0
府谷县	0.056 9	0.060 8	0.109 9	0.227 6
横山区	0.079 6	0.104 6	0.067 9	0.252 1
靖边县	0.053 4	0.068 7	0.120 1	0.242 3
定边县	0.091 0	0.057 0	0.097 0	0.245 0
绥德县	0.077 1	0.054 3	0.050 8	0.182 3
米脂县	0.079 6	0.090 0	0.075 1	0.244 7
佳县	0.077 3	0.060 7	0.064 7	0.202 6
吴堡县	0.075 9	0.071 7	0.068 9	0.216 6
清涧县	0.090 0	0.112 1	0.104 4	0.306 5
子洲县	0.085 2	0.126 3	0.065 9	0.277 3

标得分为最低值。从地理分布上来看, I 级风险区主要分布陕北黄土高原的中部, 中部属于黄土丘陵区, 土质疏松、肥力差且地下水资源较贫乏, 水土流失严重, 耕地产出效率低, 生态环境受到严重干扰, 耕地生态安全指数低。

Ⅱ级敏感区包括府谷县、神木市、榆阳区、佳县、米脂县、吴堡县、定边县、靖边县、安塞区、志丹县 10 个县(区、市)(表 3), 主要分布在陕北黄土高原北部和西部(图 2-a)。从本研究耕地生态安全评价指数分析, 榆阳区城镇化率指数得分最高, 经济的发展对生态环境的压力增大, 耕地生态环境遭到破坏。神木市第一产业比重的得分在研究区最低, 神木市是西北地区县域综合实力最强的县域, 经济发展迅速, 煤炭资源丰富, 耕地生态安全压力大且对于第一产业的投资力度低。府谷县单位耕地粮食产量与第一产业比重 2 个指标均为研究区该项指标的最低值。府谷县是陕西省规划建设煤电化载能工业园区, 是国家级陕北能源化工基地的重要组成部分, 主要发展工业。

Ⅲ级临界安全区包括横山区、子洲县、甘泉县(表 3)。横山区复种指数远远高于研究区的平均水平, 但单位耕地面积农用机械动力远远低于平均水平。子洲县的城镇化率最低, 因为城镇化率为负向指标, 城镇化率指标得分为该指标的最高值, 城镇化的压力对于子洲县耕地生态安全较小。子洲县、甘泉县的各项耕地生态安全指数都接近于研究区

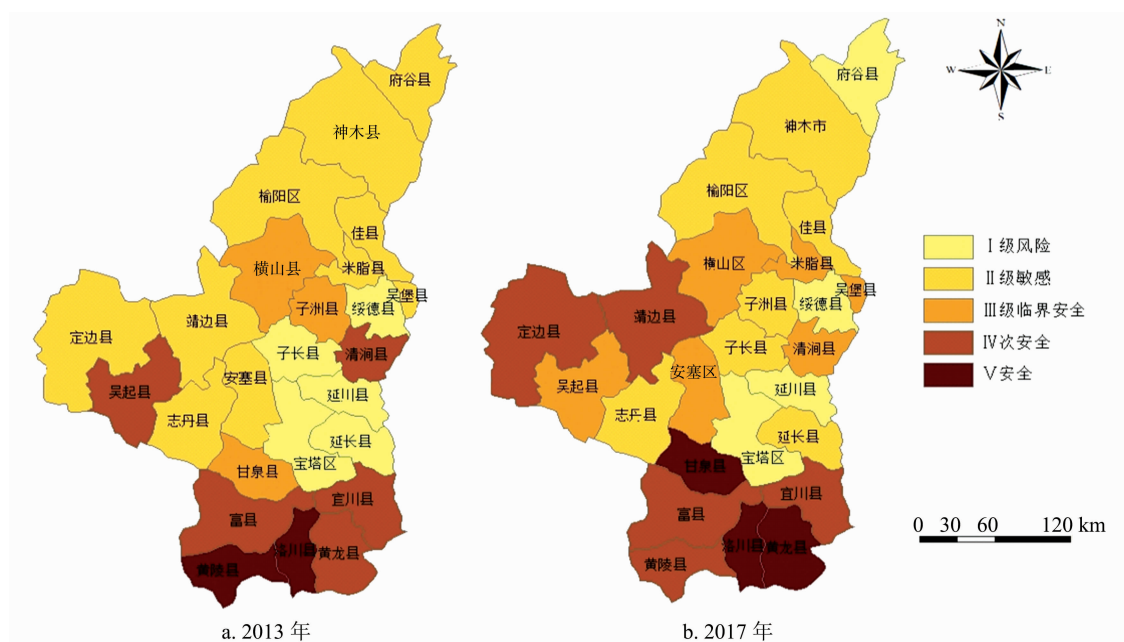


图2 陕北黄土高原耕地生态安全指数空间分异

指标平均水平。

Ⅳ级次安全区包括吴起县、清涧县、富县、宜川县、黄龙县(表 3)。富县、宜川县、黄龙县主要分布在陕北黄土高原南部(图 2-a),南部属于低山丘陵区。吴起县位于陕北黄土高原西部,该县人均耕地面积和粮食安全系数为最高指标值。宜川县第一产业占 GDP 比重较大,黄龙县森林覆盖指数高。

V 级安全区包括黄陵县和洛川县,位于陕北黄土高原南部(图 2-a)。洛川县复种指数、单位耕地粮食产量为研究区相应指标指数的最高值,洛川县属渭北黄土高原沟壑区,是黄土高原面积最大、土层最厚的塬区,塬面平坦,土地宽广,质地优良,日照充足,自然条件优越,发展农业具有得天独厚的优势。洛川县内工业污染少,由于土质肥沃的良好自然条件,对耕地农用化肥等施用量较少,农业污染指数低。黄陵县的单位耕地面积农业机械动力这一指标为研究区位耕地面积农业机械动力指标的最高值,且年降水量、森林覆盖率、复种指数 3 项指标远远高于平均水平。

总的来说,2013 年陕北黄土高原的黄陵县和洛川县耕地生态最安全,绥德县、子长县、延川县、延长县、宝塔区耕地生态最不安全,整体空间分布表现为南部>北部>中部。

2.2.2 2017 年耕地生态安全指数空间分析 I 级风险区主要分布在府谷县、绥德县、延川县、宝塔区(表 4)。相比于 2013 年的 I 级风险区,2017 年子长县、延长县耕地生态安全提升一个等级成为 II 级敏感区,而府谷县耕地生态安全指数降低为 I 级风险。府谷县单位耕地面积农膜负荷 C_4 这一指标为研究区这一指标的最大值,但是府谷县单位耕地粮食产量与第一产业比重远远低于平均水平,接近于最低值。绥德县森林覆盖率(C_6)这一指标为最低指标值。延川县和宝塔区的粮食安全系数(C_{12})等于或接近研究区的最低值。

II 级敏感区包括神木市、榆阳区、佳县、子洲县、子长县、志丹县、延长县,主要分布在陕北黄土高原北部(图 2-b)。以榆阳区和神木市为代表,榆阳区为榆林市的行政中心,经济、政治发展迅速,对农业依赖不大,对耕地生态安全有经济、人口等各方面压力。神木市是煤炭资源大市,主要发展工业,这对于耕地生态有一定污染,经济的发展会一定程度上侵占、污染耕地资源,不利于耕地生态环境的保护,耕地生态安全受到威胁。

III 级临界安全区包括横山区、米脂县、吴堡县、吴起县、安塞区、清涧县(表 4)。从地理上看,III 级临界安全区主要夹杂在 II 级敏感区之间以及 II 级敏感区和Ⅳ级次安全区中间,是一个不稳定的耕地生态区域,同时也具有提升耕地生态安全等级的潜力,所以 III 级临界安全区应该积极改善区域耕地生态条件,提升耕地生态安全等级。

Ⅳ级次安全区包括定边县、靖边县、黄陵县、富县、宜川县(表 4)。在地理上,耕地生态安全Ⅳ级次安全区主要分布在陕北黄土高原北部和西部(图 2-b)。定边县年降水量 C_5 和单位耕地粮食产量 C_8 较低,但是定边县人均耕地面积(C_1)最高。宜川县第一产业比重占比大,该项指标值最高,代表该县主要发展第一产业。黄陵县年降水量(C_5)指标值最大,对于耕地生态安全起正向作用。

V 级安全区包括甘泉县、洛川县、黄龙县(表 4),主要分布在陕北黄土高原南部低山丘陵区

表 4 2017 年陕北黄土高原耕地生态安全指数

地区	压力指数	状态指数	响应指数	耕地生态安全指数
神木市	0.072 2	0.034 7	0.098 1	0.205 0
府谷县	0.083 8	0.029 7	0.086 5	0.200 0
横山区	0.104 1	0.062 7	0.098 0	0.264 7
靖边县	0.090 8	0.059 4	0.168 1	0.318 2
定边县	0.203 7	0.015 0	0.162 4	0.381 1
绥德县	0.091 9	0.039 9	0.055 7	0.187 5
米脂县	0.100 9	0.088 5	0.098 9	0.288 3
佳县	0.121 4	0.022 3	0.071 0	0.214 8
清涧县	0.088 7	0.090 8	0.105 9	0.285 4
子洲县	0.079 2	0.083 0	0.079 2	0.241 3
吴堡县	0.087 5	0.084 8	0.084 4	0.256 7
延长县	0.070 4	0.062 1	0.086 8	0.219 3
延川县	0.060 5	0.066 4	0.049 7	0.176 6
子长县	0.051 5	0.094 8	0.058 2	0.204 6
安塞区	0.098 6	0.065 7	0.101 1	0.265 4
志丹县	0.091 4	0.055 0	0.077 5	0.224 0
吴起县	0.064 3	0.080 1	0.111 7	0.256 1
甘泉县	0.037 7	0.219 4	0.194 5	0.451 5
富县	0.053 9	0.115 5	0.181 6	0.350 9
洛川县	0.067 2	0.230 3	0.293 5	0.590 9
宜川县	0.073 4	0.085 4	0.209 1	0.368 0
黄陵县	0.049 4	0.177 7	0.205 6	0.432 7
黄龙县	0.081 3	0.181 0	0.276 3	0.538 7
榆阳区	0.064 6	0.059 8	0.118 6	0.243 0
宝塔区	0.055 3	0.097 4	0.029 0	0.181 8

(图 2-b)。甘泉县复种指数(C_7)为研究区的最大值,且大部分指标指数值远远高于平均水平。洛川县人均耕地面积(C_1)和单位耕地面积化肥负荷为研究区该项指标的最低值,但是其单位耕地粮食产量(C_8)和单位耕地面积农业机械动力(C_{11})为最高值,这 2 项指标由熵值法计算出权重,分别为 0.118 3、0.157 8。黄龙县森林覆盖率(C_6)和粮食安全系数这 2 项指标达到研究区相应指标的最高值,且单位耕地粮食产量(C_8)、第一产业比重(C_{10})、人均耕地面积 C_1 这 3 项指标远远高于平均水平。

总体来说,2017 年陕北黄土高原各县(区、市)中甘泉县、黄龙县、洛川县耕地生态环境最安全,府谷县、绥德县、延川县、宝塔区耕地生态环境最不安全。从地理分布来看,陕北黄土高原耕地生态安全分布表现为南部>西部>北部>中部。

2.2.3 陕北黄土高原耕地生态安全变化分析 从陕北黄土高原 2017 年相对于 2013 年耕地生态安全指数变化,可以分析出陕北黄土高原各县(区、市)5 年间的耕地生态安全的变化情况,验证各个县(区、市)对提升生态安全的策略是否有效。本研究根据陕北黄土高原 2017 年相对于 2013 年耕地生态安全指数变化情况,采用自然断点分级法对指数变化进行状态划分,其中指数变化区间为 $[-0.156\ 2, -0.014\ 7)$,表示指数降低;指数变化区间为 $[-0.014\ 7, 0.043\ 6)$,表示基本不变;指数区间为 $[0.043\ 6, 0.152\ 3)$,表示指数升高。陕北黄土高原耕地生态安全指数变化见图 3。

从图 3 可以看出,相比 2013 年,2017 年陕北黄土高原地区耕地生态安全指数有 12 个县(区)基本不变,8 个县(市)耕地生态安全指数降低,5 个县耕地生态安全指数升高。其中,耕地生态安全指数升高分别是定边县、靖边县、甘泉县、洛川县、黄龙县。定边县和靖边县由Ⅱ级敏感区提高到Ⅳ级次安全区,耕地生态安全指数等级提升幅度较大;甘泉县由Ⅲ级临界安全提升到Ⅴ级安全区,提升了 2 个安全等级;黄龙县由Ⅳ级次安全区提升到Ⅴ级安全区;洛川县虽然耕地生态安全等级没有提高,但耕地生态安全指数由 0.498 5 提升到 0.590 9。耕地生态安全指数降低的县域分别是府谷县、神木市、子洲县、清涧县、吴起县、宝塔区、宜川县、黄陵县,其中神木市、宝塔区、宜川县的耕地生态安全等级没有发生变化,只是耕地生态安全安全指数降低;

清涧县和吴起县均是由Ⅳ级次安全区降低为Ⅲ级临界安全区;子洲县由Ⅲ级临界安全区降低为Ⅱ级敏感区。

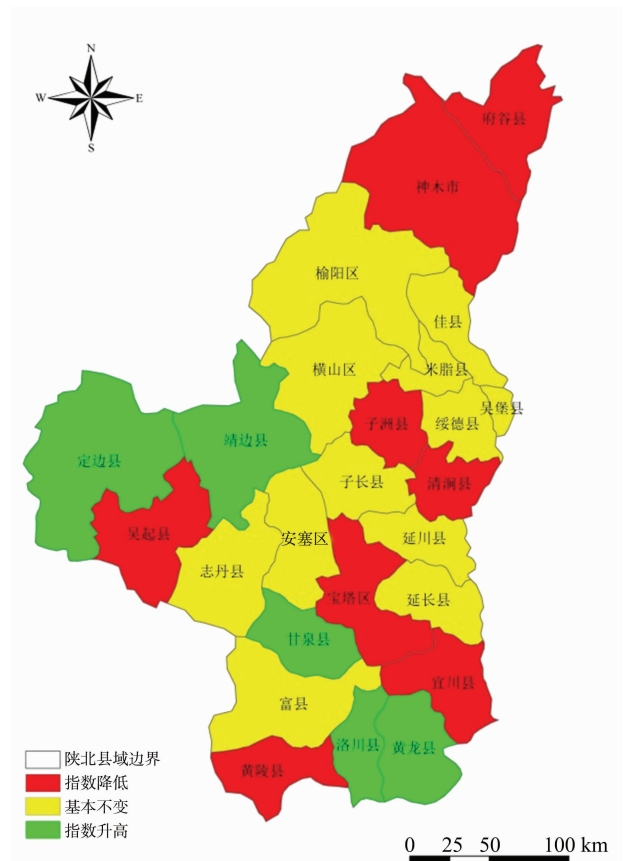


图3 2017 年的陕北黄土高原耕地生态安全指数相对于 2013 年的变化情况

2.3 障碍因子诊断

利用障碍度模型进行障碍因子诊断,研究陕北黄土高原各县(区、市)的障碍因子和障碍度。计算结果见表 5。

表 5 2017 年陕北黄土高原耕地生态安全指标层
主要障碍因子障碍度

地区	指标	位序 1	位序 2	位序 3	位序 4	位序 5
神木市	障碍因素	C_2	C_5	C_7	C_{10}	C_{12}
	障碍度(%)	6.60	6.33	6.01	6.00	4.74
府谷县	障碍因素	C_5	C_{10}	C_2	C_6	C_8
	障碍度(%)	6.80	5.97	5.80	5.58	4.98
横山区	障碍因素	C_5	C_{11}	C_8	C_{10}	C_6
	障碍度(%)	6.71	4.86	4.56	4.48	4.09
靖边县	障碍因素	C_5	C_2	C_4	C_{10}	C_6
	障碍度(%)	6.85	5.70	5.32	4.94	4.47
定边县	障碍因素	C_5	C_7	C_6	C_8	C_{10}
	障碍度(%)	9.51	5.37	5.18	4.99	4.89

表 5(续)

地区	指标	位序 1	位序 2	位序 3	位序 4	位序 5
绥德县	障碍因素	C ₉	C ₆	C ₇	C ₈	C ₁₂
	障碍度(%)	6.46	5.88	5.10	4.67	4.64
米脂县	障碍因素	C ₉	C ₆	C ₅	C ₁	C ₁₁
	障碍度(%)	6.10	5.70	4.92	4.30	4.26
佳县	障碍因素	C ₅	C ₉	C ₇	C ₈	C ₁₁
	障碍度(%)	8.08	6.50	5.83	4.93	4.9
清涧县	障碍因素	C ₄	C ₉	C ₆	C ₁₁	C ₁
	障碍度(%)	8.15	6.47	5.52	4.31	4.29
子洲县	障碍因素	C ₉	C ₅	C ₆	C ₄	C ₁₁
	障碍度(%)	6.27	5.72	5.64	4.78	4.67
吴堡县	障碍因素	C ₉	C ₅	C ₆	C ₁	C ₁₁
	障碍度(%)	6.52	4.51	4.33	4.29	4.25
延长县	障碍因素	C ₉	C ₆	C ₁₂	C ₈	C ₁
	障碍度(%)	5.89	5.71	4.94	4.63	4.58
延川县	障碍因素	C ₂	C ₉	C ₁₂	C ₈	C ₁₀
	障碍度(%)	6.61	6.08	5.05	4.98	4.63
子长县	障碍因素	C ₄	C ₂	C ₉	C ₁₀	C ₁₁
	障碍度(%)	8.65	6.01	5.12	4.97	4.61
安塞区	障碍因素	C ₁₁	C ₈	C ₆	C ₁₀	C ₁₂
	障碍度(%)	4.85	4.74	4.71	4.60	4.14
志丹县	障碍因素	C ₁₀	C ₂	C ₁₁	C ₈	C ₇
	障碍度(%)	5.50	5.24	4.75	4.72	4.69
吴起县	障碍因素	C ₄	C ₁₀	C ₂	C ₇	C ₈
	障碍度(%)	12.67	5.61	5.30	4.53	4.27
甘泉县	障碍因素	C ₄	C ₁	C ₂	C ₃	C ₉
	障碍度(%)	14.51	4.75	4.59	4.16	3.97
富县	障碍因素	C ₄	C ₃	C ₁	C ₇	C ₁₂
	障碍度(%)	15.06	7.74	4.85	4.84	4.77
洛川县	障碍因素	C ₃	C ₁	C ₁₀	C ₁₂	C ₆
	障碍度(%)	44.11	5.03	3.81	3.77	3.62
宜川县	障碍因素	C ₃	C ₇	C ₁₂	C ₂	C ₈
	障碍度(%)	9.05	5.72	4.54	4.46	4.46
黄陵县	障碍因素	C ₃	C ₂	C ₁₀	C ₁	C ₄
	障碍度(%)	9.05	5.28	5.07	4.82	4.35
黄龙县	障碍因素	C ₂	C ₃	C ₉	C ₁₁	C ₇
	障碍度(%)	7.80	6.70	5.07	4.06	3.87
榆阳区	障碍因素	C ₅	C ₂	C ₁₀	C ₇	C ₁₁
	障碍度(%)	7.85	7.22	5.52	5.20	4.36
宝塔区	障碍因素	C ₁₀	C ₁₂	C ₁	C ₁₁	C ₂
	障碍度(%)	5.50	5.03	4.91	4.83	4.69

从表 5 可以看出,2017 年陕北黄土高原各个县(区、市)的耕地生态安全指标层主要障碍因子障碍度可以得出以下结论:(1)各个县(区、市)耕地生态安全主要障碍度不尽相同,障碍因素有第一产业比

重 C₁₀、城镇化率 C₂、森林覆盖率 C₆、单位耕地面积农业机械动力 C₁₁、单位耕地粮食产量 C₈、农民人均纯收入 C₉、人均耕地面积 C₁、年均降水量 C₅、复种指数 C₇、粮食安全系数 C₁₂; (2)最大障碍因素障碍度比较大的有吴起县、甘泉县、富县的单位耕地面积农膜负荷(C₄) (其障碍度分别为 12.76%、14.51%、15.06%)及洛川县的单位耕地面积化肥负荷(C₃)。 (3)在陕北黄土高原的 25 个县(区、市)中有 6 个县(区)的最大障碍度都为年均降水量(C₅)。依据障碍度模型计算各县(区、市)的障碍因子与障碍度,可以为提升研究区耕地生态安全提供依据,为研究提升研究区耕地生态安全策略提供有效参考。

3 结论与讨论

基于微观视角,利用 PSR 模型建立耕地生态安全评价指标体系,以熵值法计算权重,用多目标综合评价法对陕北黄土高原的耕地生态安全进行评价,利用障碍度模型得出陕北黄土高原各县(区、市)影响耕地生态安全的主要障碍因素和障碍度。

2013—2017 年 5 年间,在时间变化尺度上,陕北黄土高原耕地生态安全水平变化明显。Ⅰ级风险区及Ⅱ级敏感区数量逐渐减少,Ⅲ级临界安全区及Ⅴ级安全区数量明显增加,Ⅳ级次安全区数量基本处于不变状态,整体上向耕地生态安全度更高趋势发展。

2013—2017 年 5 年间,陕北黄土高原耕地生态安全水平空间格局差异性明显,整体呈现发展较好的趋势。Ⅰ级风险区主要集中于中部地区,Ⅱ级敏感区分布相对较散,Ⅲ级临界安全区分布在Ⅱ级风险区之间以及Ⅱ级敏感区与Ⅳ级次安全区之间,Ⅳ级次安全区主要集中于陕北黄土高原的南部和西部地区,Ⅴ级安全区主要分布在陕北黄土高原南部地区。耕地生态安全分布情况为南部>西部>中部>北部>东部。

2017 年陕北黄土高原 25 个县(区、市)耕地生态安全障碍度有一定差异,障碍因素有第一产业比重 C₁₀、城镇化率 C₂、森林覆盖率 C₆、单位耕地面积农业机械动力 C₁₁、单位耕地粮食产量 C₈、农民人均纯收入 C₉、人均耕地面积 C₁、年均降水量 C₅、复种指数 C₇、粮食安全系数 C₁₂,其中有 6 个县(区)的主要障碍因素均为年均降水量(C₅)。

耕地生态安全评价是一个动态评价的过程,基

于 PSR 模型建立典型的陕北黄土高原耕地生态安全评价指标体系,运用多目标综合评价法评价 2013 年与 2017 年陕北黄土高原耕地生态安全状况,分析 2013、2017 年陕北黄土高原耕地生态安全变化与时空分布状况,利用障碍度模型计算各县(区、市)的障碍因子与障碍度,为研究提升陕北黄土高原耕地生态安全策略提供依据。未来对于提高陕北黄土高原的耕地生态安全,应重点加强东部地区的耕地生态安全,主要从“惠民惠农”政策保护、生态安全知识普及、加大土地整治投资力度等方面来加强。

在空间尺度方面,本研究以县(区、市)为评价单元,在耕地生态安全评价时同一个县(区、市)的评价指标具有相同值,掩盖了县域内指标的差异性;在将来研究中应以乡(镇)为基本评价单元,以提高研究精确度,更加准确地反映耕地生态安全状况。在时间尺度方面,本研究采用 2013 年与 2017 年 2 年时间点来评价,存在一定的片面性,今后应利用长时间序列数据进行研究,从而更好地反映出耕地生态安全时空变化情况。

参考文献:

- [1] 祖 健,郝晋珉,陈 丽,等. 耕地数量、质量、生态三位一体保护内涵及路径探析[J]. 中国农业大学学报,2018,23(7):84-95.
- [2] 董作继. 新时期耕地保护的总方略[J]. 中国土地,2017(2):8-11.
- [3] 陈 正,王建强,王 健. 新形势下耕地占补平衡监管体系建设[J]. 中国土地,2018(2):39-41.
- [4] Beesley K B, Ramsey D. Agricultural land preservation[J]. International Encyclopedia of Human Geography,2009,25(6):65-69.
- [5] Rasul G, Thapa G B. Sustainability analysis of ecological and conventional agricultural systems in Bangladesh[J]. World Development,2003,31(10):1721-1741.
- [6] 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.
- [7] 朱红波,张安录. 我国耕地资源生态安全的时空差异分析[J]. 长江流域资源与环境,2007,16(6):754-758.
- [8] 范胜龙,杨玉珍,陈训争,等. 基于 PSR 和无偏 GM(1,1)模型的福建省耕地生态安全评价与预测[J]. 中国土地科学,2016,30(9):19-27.
- [9] 江春燕,罗志军,赵 杰,等. 基于 DPSIR-TOPSIS 模型的江西省土地生态安全动态评价[J]. 江苏农业科学,2018,46(17):294-298.
- [10] 王大海,张荣群,艾 东,等. 基于 EES-PSR 的土地生态安全物元模型评价方法实证研究[J]. 农业机械学报,2017,48(增刊1):228-237.
- [11] 李 根,杨庆媛,马寅华,等. 基于熵值法的中国省域耕地生态安全评价[J]. 江苏农业科学,2017,45(9):223-228.
- [12] 郭荣中,杨敏华,申海建. 基于组合赋权法的长沙市耕地生态安全时空测度与演化[J]. 应用基础与工程科学学报,2018,26(1):35-46.
- [13] 王露梅. 丝绸之路经济带建设背景下我国西北地区生态安全评价及预警研究[D]. 西安:陕西师范大学,2018.
- [14] 窦学诚,付 滨. 基于 PSR 模型的河西制种基地耕地生态安全物元分析评价[J]. 西南农业学报,2018,31(9):1919-1926.
- [15] 邵红娟,蔡广鹏,罗绪强,等. 基于能值分析的贵州省 2000—2010 年耕地生态安全预警研究[J]. 水土保持研究,2013,20(6):307-310.
- [16] 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.
- [17] 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(4):1317-1325.
- [18] 赵宏波,马延吉. 东北粮食主产区耕地生态安全的时空格局及障碍因子——以吉林省为例[J]. 应用生态学报,2014,25(2):515-524.
- [19] 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.
- [20] 张 锐,刘友兆. 我国耕地生态安全评价及障碍因子诊断[J]. 长江流域资源与环境,2013,22(7):945-951.
- [21] 李 政,何 伟,吴冬林,等. 四川省耕地生态安全的时空格局及生态阻力分析[J]. 江苏农业科学,2018,46(18):286-292.
- [22] 李明薇,陈伟强,鄢雨旱,等. 基于投影寻踪模型的河南省耕地生态安全评价[J]. 水土保持研究,2018,25(4):257-263,269.
- [23] 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.
- [24] 邱凌婧,范胜龙,茹凯丽,等. 基于熵权物元模型的福建山区耕地生态安全评价——以清流县为例[J]. 福建农业学报,2018,33(3):313-320.
- [25] 宋振江,杨 俊,李 争. 长江中下游粮食主产区耕地生态安全评价——基于省级面板数据[J]. 江苏农业科学,2017,45(20):290-294.
- [26] 曹 珞,王燕辉,张立强,等. 基于 PSR 模型的耕地生态安全时空分异特征研究——以河北省沧州市为例[J]. 水土保持研究,2016,23(6):290-295,302.
- [27] 张祥义,许 皞,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(1):18-23.
- [28] 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):19-24,128.
- [29] 璩路路,师学义,荣联伟. 黄土山丘区耕地生态安全动态评价及预测[J]. 江苏农业科学,2016,45(5):532-536,596.
- [30] 左 伟,王 桥,王文杰,等. 区域生态安全评价指标与标准研究[J]. 地理学与国土研究,2002,18(1):67-71.