

原伟鹏, 刘新平. 基于熵权-集对模型的耕地面源污染生态风险评价与防控——以新疆昌吉州为例[J]. 农业资源与环境学报, 2019, 36(5): 630-639.

YUAN Wei-peng, LIU Xin-ping. Ecological risk assessment and control of non-point source pollution in cultivated land based on the entropy weight-set pair model: Using Changji Prefecture, Xinjiang, China as an example[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, 36(5): 630-639.

基于熵权-集对模型的耕地面源污染生态风险评价与防控——以新疆昌吉州为例

原伟鹏¹, 刘新平^{1,2*}

(1.新疆农业大学管理学院, 乌鲁木齐 830046; 2.新疆农业大学土地科学研究所, 乌鲁木齐 830052)

摘要:为构建以化肥、农药、农膜为主要风险源的生态风险评价与防控模型,基于熵权-集对分析模型尝试评价新疆昌吉州不同县市空间区域耕地面源污染风险等级异质性。结果表明,2004—2017年昌吉州化肥施用总量、农药使用总量和农膜使用总量逐年大幅增加,呈现未来增长态势。耕地质量等别年度监测数据的样本调查结果显示,土壤理化性质、质地、结构等多项指标均呈现不同程度的恶化。昌吉州耕地面源污染的生态风险强度空间上主要分布于昌吉州西部的昌吉市、呼图壁县和玛纳斯县,生态风险中度区主要分布于昌吉州中部的阜康市、吉木萨尔县,生态风险轻度区主要分布于昌吉州最东部的奇台县和木垒哈萨克自治县。研究表明,新疆昌吉州耕地面源污染存在空间格局的生态风险异质性,呈现东、中、西污染聚集且由西向东依次减轻的空间分布规律,耕地面源污染的生态风险与区域产业经济发展、农民传统耕作方式、水文地质条件、地理位置、周边环境基础状况等因素相关。基于此,运用Bow-Tie模型构建了耕地面源污染生态风险的防控与差异化治理体系。

关键词:面源污染;生态风险;耕地;昌吉州;化肥;农药;农膜;Bow-Tie模型

中图分类号:X592

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2019)05-0630-10

doi: 10.13254/j.jare.2019.0076

Ecological risk assessment and control of non-point source pollution in cultivated land based on the entropy weight-set pair model: Using Changji Prefecture, Xinjiang, China as an example

YUAN Wei-peng¹, LIU Xin-ping^{1,2*}

(1.School of Management, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830046, China; 2.Institute of Land Science, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

Abstract: The ecological risk assessment and control model with chemical fertilizer, pesticide, and agricultural film as the main risk sources was constructed to strengthen the prevention, control, and governance of non-point source pollution. Using the entropy weight-set pair analysis model, this study attempted to evaluate the risk grade heterogeneity of non-point source pollution of cultivated land in different counties and cities of Changji Prefecture, Xinjiang, China. The results showed that the total amount of chemical fertilizer application, pesticide use, and agricultural film use increased yearly in Changji Prefecture during 2004—2017, indicating a continuous growth trend for the future. The sample survey of cultivated land quality from annual monitoring data showed that the physical and chemical properties, texture, and structure of soil were deteriorated to some extent. The high ecological risk area of non-point source pollution of cultivated land in Changji Prefecture was mainly distributed in Changji City, Hutubi County, and Manas County in the western part of Changji Prefecture, and the moderate risk ecological area was mainly distributed in Fukang City and Jimusaer County in the middle part of Changji Prefecture. The

收稿日期:2019-02-13 录用日期:2019-03-28

作者简介:原伟鹏(1991—),男,山西晋城人,博士研究生,从事资源配置与可持续发展研究。E-mail: ywpywp33@163.com

*通信作者:刘新平 E-mail: lxping16@163.com

基金项目:国家自然科学基金项目(71363054,71663051)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(71363054,71663051)

low ecological risk areas were mainly distributed in Qitai County and Mulei County in the easternmost part of Changji Prefecture. The regional characteristics showed a spatial distribution of pollution accumulation in the east, middle, and west, which decreased from the west to the east. The reason for the ecological risk of non-point source pollution of cultivated land was related to the development of regional industry and economy, traditional farming methods of farmers, hydrogeological conditions, geographical location, and basic conditions of the surrounding environment. Based on this, the Bow-Tie model was used to construct the ecological risk prevention and control system of non-point source pollution in cultivated land.

Keywords: non-point source pollution; ecological risk; cultivated land; Changji Prefecture; chemical fertilizer; pesticide; agricultural film; Bow-Tie model

农村生态文明建设是关系到乡村振兴战略和全面建成小康社会的重要一环。我国作为世界第一农业大国,以仅占世界7%的耕地养活了占世界22%的人口,耕地资源供需约束趋紧,粗放低效利用必然造成耕地生产能力下降、耕地土壤污染严重,甚至生态退化、难以恢复的严峻后果,究其根源,农业化肥、农药、农膜等农业高强度投入是主因。基于此,打赢耕地面源污染攻坚战,防控污染转移生态风险,构建现代农业生产体系,以质量兴农、绿色兴农实现我国农业大国向强国转变,必须坚持以农业供给侧结构性改革为主线的藏粮于地、藏粮于技的绿色创新驱动发展战略,以高质量发展的农业现代化引领美丽宜居的乡村振兴建设。

中央一号文件连续16年聚焦农业粮食质量安全的国家首要战略,强调耕地资源数量、质量、生态的“三位一体”农业现代化发展,尤其要加大农业面源污染防治与治理力度,开展节肥节药行动和农业化肥负增长行动。目前,赵敬敬等^[1]、刘宏斌等^[2]、梁增芳等^[3]分别以三峡库区、地下水、水库为典型面源污染区域进行了深入研究;刘钦普^[4]、孟敏等^[5]、高如梦等^[6]、张继宁等^[7]、王春光等^[8]和张金婷等^[9]立足时间与空间尺度,认为面源污染的主要风险源有农业化肥(氮、磷、钾肥料)、农药(有机氯、有机磷、拟除虫菊酯、酰胺类等化学药剂)、重金属(铅、镉、铬等生物毒性元素)等方面。研究发现评价面源污染或生态风险较为成熟的方法主要有统计经验模型、过程机理模型两类^[10-15]。国内专家学者也借鉴国外理论方法探索、研究与指导国内实践,在面源污染风险源的数据获取、调查分析和生态风险的评价方法、模型构建、防控框架、治理技术、行为经济、路径启示、对策措施等防控治理体系方面有诸多探讨^[16-19],为本研究提供了详实的主题铺垫、理论基础参考和实践防控借鉴。

本研究基于前人的研究成果,以新疆典型农业大规模种植区昌吉州作为典型研究区域,通过统计分析

2004—2017年化肥、农药和农膜的施用量情况,结合1980年、2018年新疆耕地监测采集的土壤普查样本,确定风险源对耕地面源污染的影响,通过评价昌吉州耕地面源污染的生态风险空间分异格局,初步探索适合新疆干旱半干旱地区耕地面源污染的生态风险评价框架与防控治理体系,推进有机肥替代化肥、废弃农膜回收、病虫害绿色防控,实现农业投入品减量化、生产清洁化、废弃物资源化、产业模式生态化,对于破解农产品质量安全保障工程中“量”与“质”的两难困境具有理论价值与实践意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区域昌吉回族自治州(简称昌吉州)位于天山北麓、准噶尔盆地东南缘(北纬43°20′~45°00′,东经85°17′~91°32′)。昌吉州总面积7 348 395.04 hm²,包括昌吉市、阜康市、玛纳斯县、呼图壁县、吉木萨尔县、奇台县、木垒哈萨克自治县共7个县(市)。

昌吉州2017年末耕地总面积70.05万hm²,其中90%以上为水浇地,人均耕地面积为0.53 hm²。结合1980年、2018年耕地监测采集的土壤普查样本数据,耕地土壤中的耕层含盐量、全氮、有机质、速效磷、速效钾含量和土壤pH都有较大幅度的增高,全氮含量增长最大,提高了175.00倍。耕地土壤的重金属累积越来越严重,有效铜、有效锌、有效锰、有效钼和有效镉含量都有所增加,其中有效镉(11.60~17.55 mg·kg⁻¹)和有效铜(2.19~3.37 mg·kg⁻¹)的增量最多,增幅分别为51.29%和53.88%。据新疆统计年鉴显示,单位面积地膜覆盖量为42.00 kg·hm⁻²,农膜覆盖面积占总播种面积的85%以上,残膜回收率普遍不足30%,导致农田耕作层平均残膜量达285.51 kg·hm⁻²,每公顷农膜的残留量远高于国家和国际平均水平。耕地土壤的障碍层平均深度和有效土层厚度分别减少了约4.00 cm和2.50 cm。具体耕地质量等别年度监测

点见图1。

1.2 数据来源

本研究数据主要来源于新疆统计年鉴(2005—2018年)、昌吉回族自治州统计年鉴(2005—2018年)和1980年、2018年新疆耕地质量等别年度监测数据(包括数据Shape底图)的定量数据。昌吉州面源污染的生态风险评价体系中关于自然生态环境方面指标(耕层土壤含盐量、速效钾、全氮、土壤pH和速效磷)数据来源于新疆耕地土壤监测点1980年度和2018年度数据,生产利用能力和农业经济发展指标(有效灌溉保证率、单位耕地农膜覆盖面积、单位耕地农药投入、单位耕地农用化肥施用量、人均纯收入、单位面积粮食产量、单位耕地农业机械拥有量、经济密度)数据来源于昌吉州各县市统计年鉴或间接计算得出。

1.3 研究方法与评价体系

1.3.1 指标权重的确定

首先,由于各指标量纲的差异性,运用极差法进行数据标准化。

$$\text{对于正向指标, } y_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{\min j}}{x_{\max j} - x_{\min j}} \quad (1)$$

$$\text{对于负向指标, } y_{ij} = \frac{x_{\max j} - x_{ij}}{x_{\max j} - x_{\min j}} \quad (2)$$

式中: y_{ij} 为评价指标标准化值; x_{ij} 为指标的初始值; $x_{\min j}$ 为第 j 列的最小值; $x_{\max j}$ 是第 j 列的最大值。

其次,采用熵权法计算权重^[20]。先计算第 i 年份第 j 项指标值的熵值 Y_{ij} ,然后计算指标权重 W_j 。

$$Y_{ij} = X_{ij} \sum_{i=1}^n X_{ij} \quad (3)$$

$$W_j = \left[1 - \frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n (Y_{ij} \times \ln Y_{ij}) \right] / n - \sum_{i=1}^n \left[\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n (Y_{ij} \times \ln Y_{ij}) \right] \quad (4)$$

式中: $i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m; X_{ij}$ 表示第 i 年第 j 项指标标准化值。

1.3.2 集对分析方法

集对分析(Set pair analysis)理论简称集对论,由中国学者赵克勤等^[21]于1989年首次提出,是从整体上研究确定性与不确定性的理论^[22],现已广泛应用于政治、经济、社会等多个领域。假设在特定问题 Q 下,相互联系集合 A 和 B 构成集对 H ,有 $H(A, B)$ 的 N 项特性,其中两集合共有特性 S 项,对立特性 P 项,差异特性 $F=N-S-P$ 项,则联系度表达式为:

$$\varphi(Q) = \frac{S}{N} + \frac{F}{N}i + \frac{P}{N}j \quad (5)$$

令 $a=S/N, b=F/N, c=P/N$,则式(5)改写为:

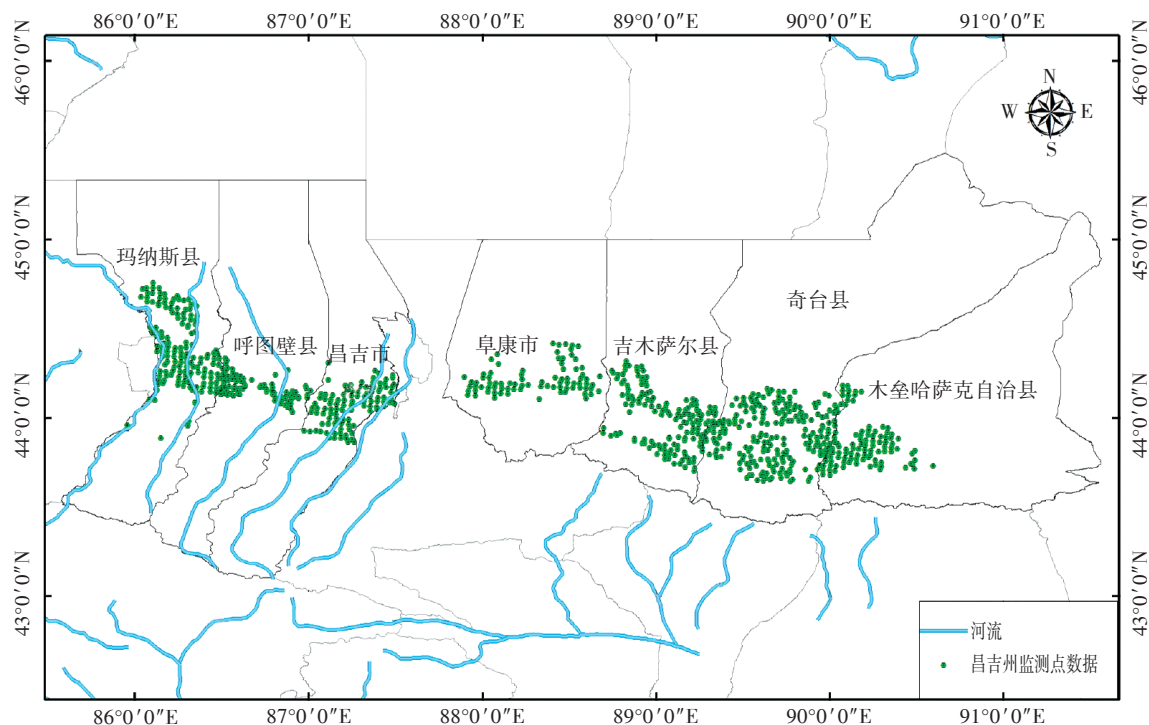


图1 昌吉州耕地土壤监测点分布图

Figure 1 The map of Changji cultivated land soil monitoring points

$$\varphi(Q)=a+bi+cj \quad (6)$$

式中: S/N 为同一度,简记 a ; F/N 为差异度,简记 b ; P/N 为对立度,简记 c 。其中联系度为 φ ,且 $\varphi \in [-1, 1]$; a 、 b 、 c 为联系度的同、异、反系数,且 $a, b, c \in [0, 1]$,满足 $a+b+c=1$ 。当 $i=1$ 时,差异度向同一度转化;当 $i=-1$ 时,差异度转化为对立度。

联系熵权法计算的特性的权重 $W_j(j=1, 2, \dots, S, \dots, F, \dots, N, \sum_{j=1}^N w_j=1)$,则联系度为:

$$\varphi(Q)=a+bi+cj=\sum_{j=1}^S w_j + \sum_{j=S+1}^{S+F} w_j i + \sum_{j=S+F+1}^N w_j j \quad (7)$$

1.3.3 评价体系构建

本研究参考中国知网(CNKI)中耕地生态风险和安全方面引用频次较高的核心文献,初步筛选出26个评价指标,再考量数据的可获得性,并向相关专家多次咨询,最后甄选最具典型代表性的13个评价指标^[23]。耕地面源污染主要受到农业生产资料投入、水文灌溉、立地条件、地形地理等诸多因素影响^[24]。根据卓凤莉^[25]的研究方法,基于熵权-集对模型构建立足自然生态环境、生产利用能力和农业经济发展三方面的综合评价体系,具体见表1。

1.3.4 生态风险评价模型

首先,根据生态风险评价指标体系建立评价矩阵 $D=(d_{ke})_{m \times n}$:

$$D=\begin{bmatrix} d_{11} & \cdots & d_{1n} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ d_{m1} & \cdots & d_{mn} \end{bmatrix} \quad (8)$$

其次,单一子系统A下第 k 个评价对象的第 e 个评价指标为 $d_{ke}(k=1, 2, \dots, m)$,研究子系统有3个。研判昌吉州耕地面源污染生态风险水平的相对高低,采用最优集 $U(u_1, u_2, \dots, u_e, \dots, u_n)$ 和最劣集 $V(v_1, v_2, \dots, v_e, \dots, v_n)$, U 中 u_e 取评价指标的最大值, V 中 v_e 取最小值。第 k 个评价对象的第 e 项指标 d_{ke} 的同一隶属度 a_{ke} 、对立隶属度 c_{ke} 分别为:

$$\begin{aligned} a_{ke} &= d_{ke} / (u_e + v_e), \\ c_{ke} &= u_e v_e / (u_e + v_e) d_{ke} \end{aligned} \quad (9)$$

再次,分别计算第 k 个评价对象各子系统的指标标准级别:

$$f_1 = \sum_{e=1}^m w_e a_{ke}; \quad f_3 = \sum_{e=1}^m w_e c_{ke} \quad (10)$$

其中, w_e 为各指标权重; f_1 、 f_3 为样本分别接近肯定、否定程度的可能性。

最后,采用相对贴近度 R 衡量与最佳状态的贴近程度, R 值越小生态风险越小。

$$R=f_1/(f_1+f_3) \quad (11)$$

2 结果与分析

2.1 集对模型结果

基于集对模型计算昌吉州各县(市)耕地面源污染生态风险的同一隶属度、对立隶属度及相对贴近度值,得到昌吉州7县(市)耕地面源污染生态风险排序情况,见表2。

由表2可知,玛纳斯县、昌吉市和呼图壁县相对贴近度较大,排序靠前;而奇台县、木垒哈萨克自治县

表1 耕地面源污染生态风险评价指标体系

Table 1 Eco-risk evaluation index system of non-point source pollution in cultivated land

目标层 Target layer	准则层 Criterion level	指标层 Index level	指标属性 Index attribute
耕地面源污染生态风险评价	自然生态环境	耕层土壤含盐量($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	+
		速效钾($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	+
		全氮($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	+
		土壤pH	*
		速效磷($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	+
	生产利用能力	有效灌溉保证率(%)	+
		单位耕地农膜覆盖面积(hm^2)	+
		单位耕地农药投入量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	+
		单位耕地农用化肥施用量($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)	+
	农业经济发展	人均纯收入(元)	+
		单位面积粮食产量($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)	+
		单位耕地农业机械拥有量($\text{kWh} \cdot \text{hm}^{-2}$)	-
		经济密度(万元 $\cdot \text{hm}^{-2}$)	+

注:“+”代表正向指标,“-”代表负向指标,“*”代表区间定性指标。

Note: “+” represents positive index, “-” represents negative index, “*” represents qualitative index of interval.

的相对贴近度较小,排序靠后;阜康市和吉木萨尔县则处于中间等级。

2.2 耕地面源污染分析

2004—2017年昌吉州化肥施用总量(折纯)、农药使用总量和农膜使用总量逐年大幅增加,呈现未来连续蔓延的增长态势。结合1980年全国第二次土壤普查和2018年新疆耕地质量等别年度监测数据分析,耕地土壤中的理化性质、质地、结构等多项指标在30多年间变化较大,特别是耕地土壤中的耕层盐分、全氮、有机质、速效磷、有效镉、有效铜含量,以及每公顷农膜残留量、耕地土壤障碍层平均深度等指标均有不同程度的增高。

2.2.1 化肥污染

2004—2017年昌吉州年均化肥施用总量(折纯)总体上呈逐年增长态势,年平均增长率为10.00%,总体提高了108.37%。尤其2007—2008年化肥施用量增长了23.60%。2004—2017年昌吉州氮肥施用量总体上不断提高,磷肥施用量和钾肥施用量稳中有升,复合肥施用量基本趋于稳定。从化肥使用种类看,氮肥施用量最多,约占化肥施用总量的50.40%;其次为磷肥和复合肥,分别占化肥施用总量的23.19%和21.35%;钾肥施用量最少,为4.80%。通过1980—2018年30多年的精耕细作,土壤的养分(有机质含量)已得到极大地提升,但因新疆广袤的地域水资源严重匮乏,土壤盐碱化和富营养化的形势日趋严重;2018年速效钾和速效磷含量比1980年分别提高了1.67倍和2.92倍。

2.2.2 农药污染

2004—2017年昌吉州农药使用总量为2.42万t,年均使用量为1728.57t,年均单位耕地面积的使用量为 $3.14\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,2017年农药使用量比2004年提高了1.12%。2006—2007年,农药使用量增长了

12.86%。农药使用量从时间发展视角分为三个时期:2004—2007年为农药使用量大幅增长期,2007—2010年农药使用量稳定在一定的区间波动,2010—2017年农药使用量减少率为14.86%,趋向于衰减稳定。农药的大量使用导致耕地土壤的重金属污染加剧。究其根源,农业重金属主要来源于污水灌溉、工业生产和超量农药喷洒,土壤中的农药主要来源于杀虫剂、除草剂和杀菌剂等,由于农药难以降解,经长年累积必然造成持续性的耕地土壤农药污染。

2.2.3 农膜污染

2004—2017年昌吉州农膜使用总量整体上呈大幅上涨态势,总增长率133.63%,年均增长率为9.54%。其中农用塑料薄膜使用量增长129.44%,年均增长9.25%;地膜使用量增长138.22%,年均增长9.87%。农用塑料薄膜和地膜使用量在14年间波动趋势基本相同。自2008年,农业自动化、规模化、精细化程度不断提高,2008—2017年农膜使用量提高了87.27%。农村普遍使用的农膜是厚度为0.007mm的超薄膜,中后期易破碎、难回收,造成农膜面源污染较为严重。

2.3 生态风险等级划分

根据相应评价指标的标准值计算贴近度标准 R 值,因相对贴近度区间为[0.36~0.61],据此将昌吉州耕地面源污染的生态风险等级均等设计划分为轻度、中度和强度三等,对应贴近度区间分别为[0.36~0.44)、[0.44~0.53]和(0.53~0.61],“[]”表示上下界限均含,“()”表示上下界限均不含。依据贴近度区间进行耕地面源污染生态风险等级划分及状态描述,见表3。

2.4 生态风险宏观评价

依据昌吉州耕地面源污染生态风险评价等级划分,利用ArcGIS可视化工具对昌吉州耕地质量等别年度监测Shape点数据进行点集转线、线要素转面,

表2 基于集对模型的昌吉州各县(市)生态风险排序

Table 2 Ranking of ecological risks of seven counties in Changji Prefecture based on set pair model

昌吉州县(市) Counties or cities in Changji Prefecture	同一隶属度 The same degree of membership	对立隶属度 Opposite membership	相对贴近度 Relative closeness	风险排序 Risk ranking
玛纳斯县	0.78	0.50	0.61	1
昌吉市	0.73	0.50	0.59	2
呼图壁县	0.51	0.42	0.55	3
阜康市	0.48	0.46	0.51	4
吉木萨尔县	0.43	0.48	0.47	5
奇台县	0.35	0.55	0.39	6
木垒哈萨克自治县	0.24	0.43	0.36	7

进而从宏观尺度较为直观地显示昌吉州各县市耕地监测点的面源污染生态风险空间等级格局,见图2。

从图2可知,昌吉州耕地面源污染的生态风险强度区主要分布于昌吉州的西部,包括昌吉市、呼图壁县和玛纳斯县;风险中度区主要分布于昌吉州中部的阜康市、吉木萨尔县;生态风险轻度区主要分布于昌吉州最东部的奇台县和木垒哈萨克自治县。造成此种生态风险分布格局的原因如下。

2.4.1 产业粗放型发展与农业生产资料的过度投入是首要原因

在新型工业化、现代农业化和城乡一体化不断推

进和发展过程中,粗放污染型产业陆续由中心城市转移到郊区农村,比如昌吉市作为昌吉州州府所在地,与乌鲁木齐市毗邻,交通发达便利,城市化水平较高,人口高度密集,也是水泥、钢铁、化工等传统工业产业相对集中发展的地区,产业快速发展的背后是超量的废气、废水、废渣等废弃物排放。玛纳斯县与呼图壁县农业机械化水平和农业种植能力较高,农业专业合作社和农业服务发展较快,农业现代化发展的基础较为深厚,但依旧遵循传统落后的高生产资料投入型种植方式,逐年对耕地投入过量的农药、肥料和农膜等农业生产资料,不利于耕地土壤的养护和休养。综上,耕地必然面

表3 昌吉州耕地面源污染生态风险等级标准及描述
Table 3 Ecological risk level and description of non-point source pollution of cultivated land in Changji Prefecture

昌吉州县(市) Counties or cities in Changji Prefecture	贴近度区间 Closeness interval	耕地生态系统状态描述 Description of cultivated land ecosystem	生态风险等级 Ecological risk grade
玛纳斯县 昌吉市 呼图壁县	(0.53~0.61]	耕地生态系统结构较大改变或严重破坏,生态服务严重退化或功能丧失,受到外界干扰生态重建较为困难,生态环境问题非常严重	强度
阜康市 吉木萨尔县	[0.44~0.53]	耕地生态系统结构基本或较为完整,生态服务功能已有退化,受到外界干扰不易恢复,生态环境问题显现	中度
奇台县 木垒哈萨克自治县	[0.36~0.44)	耕地生态系统结构完整,生态服务功能基本完整,生态恢复自愈能力强,生态环境问题不显著	轻度

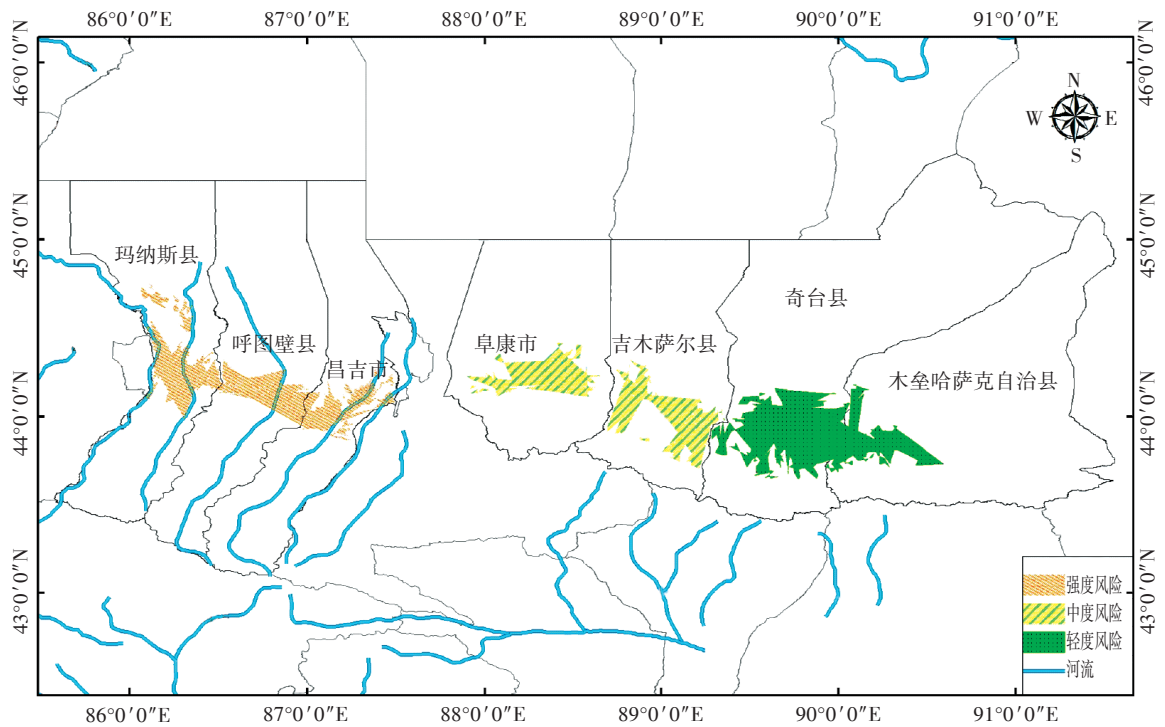


图2 昌吉州各县(市)耕地面源污染生态风险分布格局
Figure 2 Distribution pattern of ecological risk of non-point source pollution of cultivated land in counties and cities of Changji Prefecture

临严峻超负荷的生态污染风险。

2.4.2 水文条件与地理区位是主要客观因素

在新疆以水定地的背景下,物质循环和能量流动促使耕地面源污染广泛扩散。昌吉州境内玛纳斯河、塔西河、头屯河、呼图壁河、三屯河等主要河流流向从西北向东南倾斜,昌吉州偏东部的各县(市)实际有效灌溉保证率的多年均值为86.66%,远高于西部县市的57.86%。从地理位置来讲,昌吉市、呼图壁县和玛纳斯县位于乌鲁木齐以西,阜康市与吉木萨尔县接壤,位于乌鲁木齐以东。在水资源的循环流动传播途径下,耕地面源污染的有毒有害污染物通过农田斑块、廊道和基质景观的地表径流、渗透和地下水的循环流动,以及生物群落中动植物食物链的能量、物流逐级交换,必然造成昌吉州耕地面源污染的生态风险等级由西北向东南逐渐减弱。

2.4.3 各县(市)区域生态环境状况是重要的承载基础

相比昌吉市、呼图壁县和玛纳斯县,阜康市、吉木萨尔县两县境内种类繁多的野生植物、广阔的天然草原、较高的森林覆盖率和北部沙漠广泛的沙生植物,形成集草原、森林和沙漠为一体的“天然净化反应堆”生态系统,耕地生态系统对面源污染的自净作用和环境承载能力大幅提高。奇台县南北纵距较长,地势中间低,呈马鞍形状,融沙漠戈壁、绿洲山谷、草原森林和冰雪等自然风貌景观于一体;木垒哈萨克自治县以牧业为主的大农业生产,牧业、旅游业产值远高于农业种植业产值,人为开垦破坏较弱,自然养护较好。后天“藏粮于地”的开发利用活动与先天保存较为原始的景观格局在一定程度上达到了统一与均衡,因此耕地面源污染的风险程度较低。

3 基于Bow-Tie模型的耕地面源污染生态风险防控

3.1 Bow-Tie生态风险防控框架

Bow-Tie,也称领结或蝴蝶结,是一种基于安全屏障理论的分析方法。旨在从危险源、顶级事件、威胁和后果的相互关系,采取预防、控制和处置风险的具体措施,主要用于风险评估、风险管理和风险沟通。“危险源”是顶级事件运营中可能引起损害的因素。“顶级事件”指可能偏离或对危险源失去控制尚未达到灾难程度的一类事件。“屏障”,即预防、控制与处置措施,“升级因素”也称干扰因素。具体见图3。

(1)运用Bow-Tie模型。通过专家德尔菲法、头脑风暴法,尽可能设想顶级事件的各种威胁以及引起的潜在后果,评估和设置应对危险源和后果的防控策略与措施屏障,即事前预防和事后控制。研究设置“危险源”为“耕地农业面源污染风险源”;假设“顶级事件”是“耕地面源污染存在潜在或显性的生态风险”。

(2)立足实际。顶级事件的“威胁”主要来自当地政府、农户、消费者三方,政策制定者(政府)可能的威胁包括:地方具体实施办法和政策细则不够规范科学,存在执行“一刀切”现象,基层组织存在权利寻租性腐败行为,政策法律监管不严、耕地质量调查监测评价欠缺;农户面临的威胁有:化肥的过度施用、农药的过量使用、秸秆燃烧、农膜难以回收;消费者面临的威胁有:环保消费意识淡薄、绿色农产品购买消费行为缺乏、家庭食物意外支出。引发顶级事件的“升级因素”可能有农业自然灾害、农产品市场风险等。

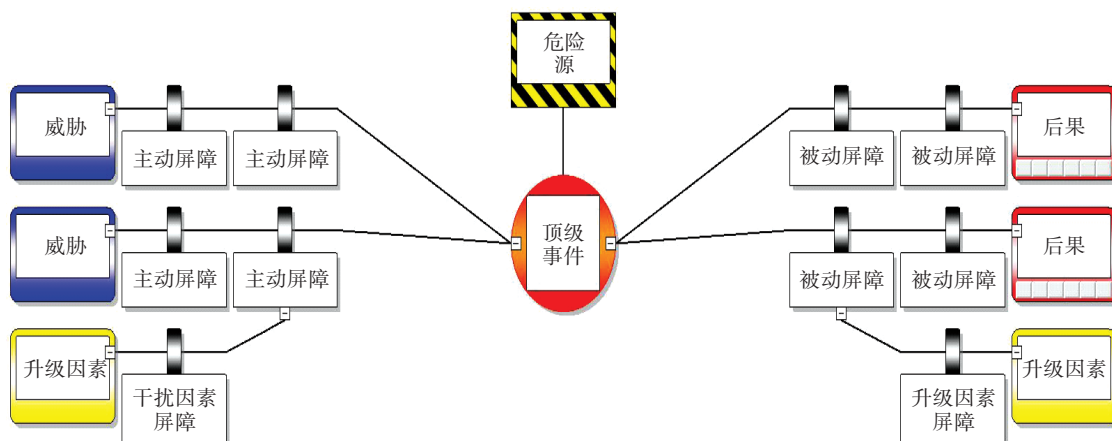


图3 Bow-Tie风险防控模型

Figure 3 Bow-Tie risk prevention and control model

(3)合理推断。作为政策顶层设计的政府可能存在的后果是民众对于政策公信力的降低、法律公正力的质疑、民众上访等激发社会矛盾和影响社会大局稳定的事件,概括为社会不和谐风险;其次,农户可能面临耕地面源污染扩散、污染防治技术的欠缺等困难,统称为失地失业风险;再者,消费者因信息不对称,主动参与保护的意识欠缺、环保农产品的消费行为偏好薄弱,统称为农产品安全风险。“升级因素”后果包括互联网、新闻报道等媒体网络舆论炒作、谣传和道德绑架压力。见图4。

3.2 生态风险防控与差异化治理

结合昌吉州各县(市)耕地风险等级评价结果,因地制宜地进行差异化治理。

对于玛纳斯县、昌吉市和呼图壁县风险强度区,有选择地划分为耕地生态综合治理试点区,主要采取的措施有:①推进粗放型工业供给侧结构性改革,对高排放污染型产业进行停产整顿与设施改造升级,使其污染排放符合相应标准;②控制耕地面源污染源,实行化肥、农药和农膜等生产资料减量负增长化投入,创建有机绿色的创新驱动型农产品优质生产基地;③对于污染特别严重区通过退耕休耕、植树种草等行为提升改善耕地生态系统的自我重建、自净调节

功能。

对于阜康市、吉木萨尔县风险中度区,有选择地将耕地中度污染地块划分为农业转型创新试点区,主要采取的措施为:①借助现代农业智能化网络监控平台,培育创新型农业生产种植方式,不断探索耕地种植功能用途分区管制;②推进耕地种植布局的调整,寻找适合实际特色的粮油优质区、蔬菜园地区、林果特色区、休闲农业区、旅游观光区、生态农业区等分区分块种植模式,增加耕地生态系统的多样性和特色性。

对于奇台县、木垒哈萨克自治县风险轻度区,有选择地划分为基础设施提升试点区,主要采取的措施为:①结合实地自然立地条件,科学规划田间通道、水渠灌溉、排水等基础配套设施,推进科学测土配方施肥的耕地生产方式,提高农产品质量安全与品质;②提倡使用可降解农药治理虫害,大力推广秸秆还田、农膜等废弃物的回收再利用,利用生物技术发展新型、清洁、可降解的物质进行耕地农业生产活动;③借鉴以往耕地污染防治经验,不走以往“先污染后治理”的老路,从政府政策引导、农户技术指导和消费者行为倡导三方面落实好耕地面源污染生态风险防控治理工程的事前预防、事中控制和事后处置。

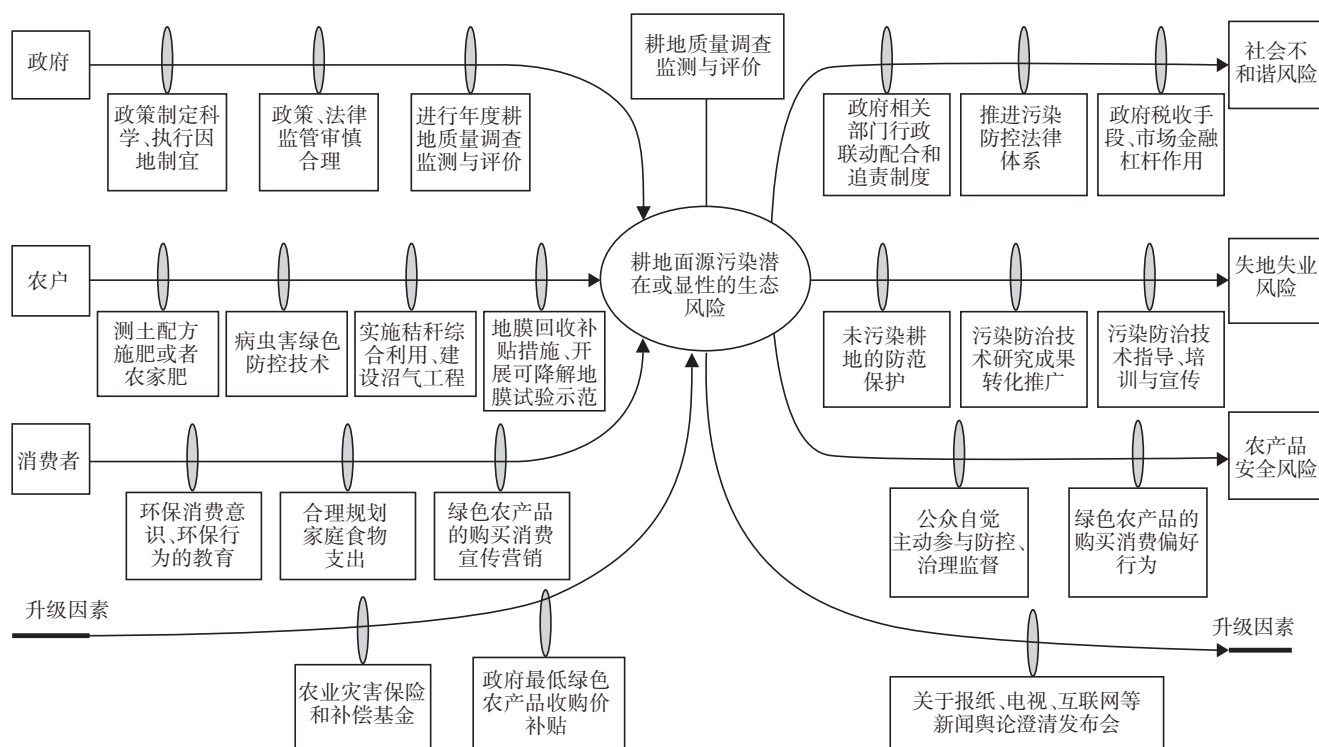


图4 基于Bow-Tie模型的耕地面源污染的生态风险防控

Figure 4 Ecological risk prevention and control of non-point source pollution of cultivated land based on the Bow-Tie model

4 结论

(1)新疆昌吉州耕地面源污染的生态风险在空间上存在明显异质格局,地域上为连片抱团集聚的特征,呈现“西高东低”的分布规律。

(2)昌吉州各县(市)耕地面源污染的生态风险与区域产业经济发展、农牧民生产生活方式、水文地理区位条件、生态环境基本状况等因素关系密切。

(3)运用Bow-Tie分析框架,以政府政策引导、农户技术指导和消费者行为倡导三方主体为立足点,从主动预防与被动处置双重视角构建了风险防控管理体系,并结合昌吉州各县(市)耕地风险强弱状况,提出了因地制宜地进行差异化治理的方案。

参考文献:

- [1] 赵敬敬,李长青,向新志,等.三峡库区重庆段水源地沉积物重金属污染特征与生态风险评估[J].中国卫生工程学,2019,18(2):161-165.
ZHAO Jing-jing, LI Chang-qing, XIANG Xin-zhi, et al. Heavy metal pollution characteristics and ecological risk assessment of sediments in the water source of the Chongqing section of the Three Gorges reservoir [J]. *Chinese Journal of Public Health Engineering*, 2019, 18(2): 161-165.
- [2] 刘宏斌,李志宏,张云贵,等.北京平原农区地下水硝态氮污染状况及其影响因素研究[J].土壤学报,2006(3):405-413.
LIU Hong-bin, LI Zhi-hong, ZHANG Yun-gui, et al. Nitrate contamination of groundwater and its affecting factors in rural areas of Beijing plain[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006(3): 405-413.
- [3] 梁增芳,肖新成,倪九派,等.水土流失和农业面源污染视角下三峡库区农户施肥行为探讨[J].中国水土保持,2019(1):55-57.
LIANG Zeng-fang, XIAO Xin-cheng, NI Jiu-pai, et al. Approach to the fertilization behavior of farmers in the Three Gorges reservoir area from the view point of soil and water loss and agricultural non-point source pollution[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2019(1): 55-57.
- [4] 刘钦普.中国化肥面源污染环境风险时空变化[J].农业环境科学学报,2017,36(7):1247-1253.
LIU Qin-pu. Spatio-temporal changes of fertilization environmental risk of China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(7): 1247-1253.
- [5] 孟敏,杨林生,韦炳干,等.我国设施农田土壤重金属污染评价与空间分布特征[J].生态与农村环境学报,2018(11):1019-1026.
MENG Min, YANG Lin-sheng, WEI Bing-gan, et al. Contamination assessment and spatial distribution of heavy metals in greenhouse soils in China[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2018(11): 1019-1026.
- [6] 高如梦,杜江,李晓涛.农业增长与环境污染的动态分析——基于2006—2015年面板数据的验证[J].中国农业资源与区划,2018,39(12):138-145.
GAO Ru-meng, DU Jiang, LI Xiao-tao. Dynamic analysis of agricultural growth and environmental pollution: Verification based on panel data from 2006 to 2015[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2018, 39(12): 138-145.
- [7] 张继宁,周胜,孙会峰,等.生物质炭在我国蔬菜地应用的研究现状与展望[J].农业现代化研究,2018,39(4):543-550.
ZHANG Ji-ning, ZHOU Sheng, SUN Hui-feng, et al. Research progress and prospects on the biochar's application in Chinese vegetable field[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2018, 39(4): 543-550.
- [8] 王春光,刘军省,殷显阳,等.基于IDW的铜陵地区土壤重金属空间分析及污染评价[J].安全与环境学报,2018,18(5):1989-1996.
WANG Chun-guang, LIU Jun-sheng, YIN Xian-yang, et al. Spatial analysis and pollution assessment of heavy metals in the soils of Tongling urban area based on IDW[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2018, 18(5): 1989-1996.
- [9] 张金婷,谢贵德,孙华.基于改进模糊综合评价法的地质异常区土壤重金属污染评价——以江苏灌南县为例[J].农业环境科学学报,2016,35(11):2107-2115.
ZHANG Jin-ting, XIE Gui-de, SUN Hua. Evaluation of soil heavy metal pollution of geological anomaly area based on improved fuzzy comprehensive evaluation method: A case study of Guannan in Jiangsu Province, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(11): 2107-2115.
- [10] 金书秦,邢晓旭.农业面源污染的趋势研判、政策评述和对策建议[J].中国农业科学,2018,51(3):593-600.
JIN Shu-qin, XING Xiao-xu. Trend analysis, policy evaluation, and recommendations of agricultural non-point source pollution[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(3): 593-600.
- [11] 张雪琪,满苏尔·沙比提,马国飞.基于生态足迹改进模型的叶尔羌河平原绿洲生态安全评价[J].生态与农村环境学报,2018,34(9):840-849.
ZHANG Xue-qi, MANSOUR Shabiti, MA Guo-fei. Appraisal of ecological security based on improved ecological footprint model in Yarkant River plain oasis[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2018, 34(9): 840-849.
- [12] 郑涛,马友华,胡宏祥,等.农业面源污染生态风险评价研究进展[J].环境保护与循环经济,2016,36(7):35-39,46.
ZHENG Tao, MA You-hua, HU Hong-xiang, et al. Research progress on ecological risk assessment of agricultural non-point source pollution[J]. *Environmental Protection and Circular Economy*, 2016, 36(7): 35-39, 46.
- [13] 黎怡姗,吴大放,刘艳艳.耕地生态风险评价研究热点与趋势——基于CiteSpace可视化分析[J].农业资源与环境学报,2019,36(4):502-512.
LI Yi-shan, WU Da-fang, LIU Yan-yan. Hotspots and trends of cultivated land ecological risk evaluation: Visualization analysis based on CiteSpace[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, 36(4): 502-512.
- [14] 周勤利,王学东,李志涛,等.宁夏贺兰县土壤重金属分布特征及其生态风险评价[J].农业资源与环境学报,2019,36(4):513-521.

- ZHOU Qin-li, WANG Xue-dong, LI Zhi-tao, et al. Distribution characteristics and ecological risk assessment of soil heavy metal in Helan County of Ningxia, China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, 36(4):513-521.
- [15] 江 宏, 马友华, 尹国庆, 等. 安徽省某县农田土壤重金属污染及潜在生态风险评价[J]. *农业资源与环境学报*, 2017, 34(4):352-359.
- JIANG Hong, MA You-hua, YIN Guo-qing, et al. Evaluation on heavy metal pollution and potential ecological risk of farmland soils in a county of Anhui Province, China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2017, 34(4):352-359.
- [16] 刘 坤, 任天志, 吴文良, 等. 英国农业面源污染防控对我国的启示[J]. *农业环境科学学报*, 2016, 35(5):817-823.
- LIU Kun, REN Tian-zhi, WU Wen-liang, et al. Prevention and control of agricultural non-point source pollutions in UK and suggestions to China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(5):817-823.
- [17] 刘宝存, 鲁赵芳, 赵同科, 等. 北京农村面源污染控制技术与工程示范[J]. *中国科技奖励*, 2008(10):43-44.
- LIU Bao-cun, LU Zhao-fang, ZHAO Tong-ke, et al. Research and demonstration of non-point source pollution control technology in rural areas of Beijing[J]. *China Awards for Science and Technology*, 2008(10):43-44.
- [18] 李 芳, 冯淑怡, 曲福田. 发达国家化肥减量政策的适用性分析及启示[J]. *农业资源与环境学报*, 2017, 34(1):15-23.
- LI Fang, FENG Shu-yi, QU Fu-tian. Fertilizer reduction policies in developed countries: Suitability and implications[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2017, 34(1):15-23.
- [19] 席利卿, 王厚俊, 彭可茂. 水稻种植户农业面源污染防控支付行为分析——以广东省为例[J]. *农业技术经济*, 2015(7):79-92.
- XI Li-qing, WANG Hou-jun, PENG Ke-mao. Payment behavior analysis of agricultural non-point source pollution prevention and control of rice growers: A case of Guangdong Province[J]. *Journal of Agrotechnical Economics*, 2015(7):79-92.
- [20] 程启月. 评测指标权重确定的结构熵权法[J]. *系统工程理论与实*
- 践, 2010, 30(7):1225-1228.
- CHENG Qi-yue. Structural entropy weight method for determining weights of evaluation indicators[J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2010, 30(7):1225-1228.
- [21] 赵克勤, 宣爱理. 集对论——一种新的不确定性理论方法与应用[J]. *系统工程*, 1996(1):18-23, 72.
- ZHAO Ke-qin, XUAN Ai-li. Set pair theory: A new method and application of uncertainty theory[J]. *Systems Engineering*, 1996(1):18-23, 72.
- [22] 梁彦庆, 纪树颖, 史思琪, 等. 基于集对分析的区域城市地价系统稳定性研究——以京津冀地区为例[J]. *干旱区资源与环境*, 2019, 33(3):7-12.
- LIANG Yan-qing, JI Shu-ying, SHI Si-qi, et al. Study on the stability of regional urban land price system based on set pair theory: A case of Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2019, 33(3):7-12.
- [23] 原伟鹏, 刘新平, 陈 玉. 耕地面源污染的生态风险评价指标体系探讨与防控——以新疆昌吉州为例[J]. *中南林业科技大学学报(社会科学版)*, 2019, 13(2):35-42.
- YUAN Wei-peng, LIU Xin-ping, CHEN Yu. Discussion on ecological risk evaluation index system of non-point source pollution of cultivated land and its prevention and control: Taking Changji Hui Autonomous Prefecture of Xinjiang as an example[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology(Social Sciences)*, 2019, 13(2):35-42.
- [24] 田丰收, 刘新平, 原伟鹏. 新疆和田地区耕地面源污染生态风险评价[J]. *干旱区地理*, 2019, 42(2):295-304.
- TIAN Feng-shou, LIU Xin-ping, YUAN Wei-peng. Ecological risk assessment of farmland non-point source pollution in Hotan Prefecture, Xinjiang[J]. *Arid Land Geography*, 2019, 42(2):295-304.
- [25] 卓凤莉. 基于熵权系数和集对分析法的土地生态安全评价——以河北省为例[J]. *地域研究与开发*, 2012, 31(6):111-114.
- ZHUO Feng-li. Land ecological security evaluation based on entropy weight and set pair analysis: A case of Hebei Province[J]. *Regional Research and Development*, 2012, 31(6):111-114.