

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.04.004.

文高辉, 王子诚, 何庆, 等. 洞庭湖平原化肥面源污染生态环境风险及脱钩效应[J]. 水土保持研究, 2023, 30(4): 301-308.

WEN Gaohui, WANG Zicheng, HE Qing, et al. Eco-environmental Risks and Decoupling Effects of Fertilizer Non-Point Source Pollution in Dongting Lake Plain[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(4): 301-308.

洞庭湖平原化肥面源污染生态环境风险及脱钩效应

文高辉^{1,2}, 王子诚¹, 何庆³, 丁学谦⁴, 夏卫生¹

(1.湖南师范大学 地理科学学院, 长沙 410081; 2.地理空间大数据挖掘与应用湖南省重点实验室, 长沙 410081; 3.湖南省测绘科技研究所, 长沙 410007; 4.南京农业大学 公共管理学院, 南京 210095)

摘要: [目的]推动实现农业经济增长与化肥面源污染生态环境风险的脱钩, 为有效治理耕地面源污染和耕地可持续利用提供理论支持。 [方法]基于生态环境风险评价模型, 从县域尺度评价洞庭湖平原各地区化肥面源污染生态环境风险程度, 采用非参数核密度估计洞庭湖平原化肥面源污染生态环境风险区域差异, 进而采用脱钩模型进一步分析了洞庭湖平原农业经济增长与耕地化肥面源污染生态环境风险的脱钩关系。 [结果] (1) 2009—2019年洞庭湖平原化肥面源污染生态环境风险指数呈现先升后降的趋势, 化肥面源污染生态环境风险指数先由2009年的0.749升至2014年的0.762, 然后降至2019年的0.732, 经历了由中度风险转为高度风险, 后又降为中度风险的过程; 中部地区污染更严重; (2) 化肥面源污染生态环境风险区域差异明显, 呈现两极分散化集聚特征, 内部差距先扩大后缩小; (3) 洞庭湖平原农业经济增长与化肥面源污染生态环境风险的脱钩关系呈现出明显的阶段性特征: 第一阶段为波动期(2009—2013年), 第二阶段为强脱钩期(2014—2019年)。 [结论]在面源污染治理工作的推进下, 洞庭湖平原化肥面源污染生态环境风险经历了先上升后下降的变化趋势, 且呈现出明显的区域分异, 基本实现与农业经济增长的稳定脱钩, 整体呈现出绿色可持续发展趋势。

关键词: 耕地; 面源污染; 风险评价; 脱钩关系; 洞庭湖平原

中图分类号: X592; F303.4

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)04-0301-08

Eco-environmental Risks and Decoupling Effects of Fertilizer Non-Point Source Pollution in Dongting Lake Plain

WEN Gaohui^{1,2}, WANG Zicheng¹, HE Qing³, DING Xueqian⁴, XIA Weisheng¹

(1.School of Geographical Sciences, Hunan Normal University, Changsha 410081, China; 2.Human Key Laboratory of Geospatial Big Data Mining and Application, Changsha 410081, China; 3.Hunan Institute of Geomatics Sciences and Technology, Changsha 410007, China; 4.College of Public Administration, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: [Objective] The decoupling of agricultural economic growth from the eco-environmental risk of fertilizer non-point source pollution was promoted, so as to provide theoretical support for the effective control of the non-point source pollution of cultivated land and the sustainable use of cultivated land. [Methods] Based on the eco-environmental risk assessment model, the eco-environmental risk of fertilizer non-point source pollution in each area of the Dongting Lake Plain was evaluated at the county level, and the regional difference of the eco-environmental risk of fertilizer non-point source pollution in Dongting Lake Plain was estimated by non-parameter kernel density, and then the decoupling model was used to further analyze the decoupling relationship between agricultural economic growth in the Dongting Lake Plain and the eco-environmental risk of fertilizer non-point source pollution on cultivated land. [Results] (1) From 2009 to

收稿日期: 2022-06-09

修回日期: 2022-07-14

资助项目: 国家自然科学基金(41801190); 湖南省哲学社会科学基金(18YBQ097); 国家级大学生创新创业训练计划支持项目(202110542045); 湖南师范大学大学生创新创业训练计划项目(2021152)

第一作者: 文高辉(1990—), 男, 江西萍乡人, 博士, 副教授, 主要从事土地经济与管理研究。E-mail: wengaoahui360101@sina.com

通信作者: 夏卫生(1966—), 男, 湖南益阳人, 博士, 教授, 主要从事土地资源管理与水土保持研究。E-mail: 575661398@qq.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

2019, the eco-environmental risk index of fertilizer non-point source pollution in the Dongting Lake Plain showed a trend of rising first and then falling. The eco-environmental risk index of fertilizer non-point source pollution first rose from 0.749 in 2009 to 0.762 in 2014, and then decreased to 0.732 in 2019, first from moderate risk to high risk, and then to moderate risk. Pollution in the central region was more serious. (2) The regional differences in the ecological environment risk of fertilizer non-point source pollution were obvious, showing the characteristics of decentralized agglomeration of two poles, and the internal gap was first expanded and then narrowed. (3) The decoupling relationship between agricultural economic growth and the eco-environmental risk of fertilizer non-point source pollution in the Dongting Lake Plain showed obvious stage characteristics: the first stage was the fluctuation period (2009—2013), and the second stage was the strong decoupling period (2014—2019). [Conclusion] With the promotion of cultivated land source pollution control, the eco-environmental risks of fertilizer non-point source pollution in Dongting Lake Plain had experienced a trend of first rising and then falling, showing obvious regional differences, and the stable decoupling from agricultural economic growth had been basically achieved, and the overall trend of green and sustainable development had been presented.

Keywords: cultivated land; non-point source pollution; risk assessment; decoupling relationship; Dongting Lake Plain

耕地是人类赖以生存和发展的基本资源和条件,对保障国家粮食安全、社会安全和生态安全具有重要意义。伴随着农业生产集约化和现代化进程加快,农户为追求生产利益最大化,化肥、农药等化学投入品被大量使用,导致耕地面源污染问题突出,使得耕地生态系统遭受破坏、功能缺失^[1],严重影响人类生命健康。2020年《第二次全国污染源普查公报》显示,农业污染源中的化学需氧量(COD)、总氮(TN)和总磷(TP)的排放量分别占全部同类污染物的49.77%,46.52%,67.22%。可见,中国农业面源污染形势依然严峻,耕地生态安全面临巨大挑战。因此,治理农业面源污染,降低面源污染造成的生态环境风险显得尤为迫切。

面源污染相对于点源污染,具有广泛性、分散性和潜伏性,监测技术要求高、治理难度较大^[2-3],已经造成了严重的生态环境问题,引起国内外学者的重点关注。其中,化肥面源污染是中国耕地面源污染问题主要来源,主要表现为农业生产中化肥过度施用、化肥利用率较低^[4-6]。当前,中国耕地化肥污染问题的深度和广度已远超发达国家,潜在压力和面临的环境风险巨大^[7]。因此,科学评价化肥面源污染引发的耕地生态环境风险尤为重要。由于面源污染实地监测成本高、难度大,SWAT, AnnAGNPS等模型常被用于面源污染环境风险评价^[8-9],但这些模型模拟过程较为复杂。在风险评价对象方面,现有文献关于农业氮磷污染的风险评价较多^[10],而关于农业面源污染的第一位污染物的化肥施用^[11]引起的生态环境风险评价研究较少;在耕地生态环境风险评价方面,国外

更多关注耕地土壤重金属污染^[12]以及不同土地利用类型的生态环境风险评价^[13]。国内在耕地生态环境风险评价模型、方法和指标体系等有较坚实的基础,主要围绕生态安全、重金属污染、生态足迹、社会价值和耕地保护等方面展开^[14-18]。但与国外相比,缺乏对耕地利用污染的风险源分析、受体评价、暴露评价、危害评价和风险表征等方面的详细研究^[1];在脱钩分析方面,当前关于碳排放与农业经济增长的脱钩关系研究较多^[19-21],关于面源污染与农业经济增长的脱钩关系的研究较少,基于生态环境风险视角探讨农业经济增长与生态环境风险的脱钩关系的文献更少。在过去很长一段时间内,造成化肥面源污染生态环境风险的实质上是地方一味地追求农业经济的快速增长,农业生产活动过度依赖化肥大量投入,未充分考虑化肥投入带来的负外部性,造成了严重的生态环境问题,危害了生态系统和人类健康。近年来,中国大力推行生态文明建设,农业经济增长已由过去的数量式增长转向追求高质量发展模式。在此背景下,农用化肥投入造成的面源污染生态环境风险到底呈怎样的变化规律?与农业经济发展呈何种关系?值得深入探讨。探究二者的关系有利于推进区域生态环境治理,持续巩固发展农业农村经济,以期实现坚决打好面源污染防治攻坚战与农业经济高质量发展的双赢局面。

洞庭湖平原是我国重要的商品粮生产基地,但同时存在着严重的化肥面源污染问题。鉴于此,以洞庭湖平原作为研究区域,以耕地面源污染中的化肥污染这一暴露性和危害性比较强的污染源为出发点,基于

县级尺度,科学评价由化肥面源污染引发的耕地生态环境风险,进而构建脱钩模型分析农业经济增长与化肥面源污染生态环境风险指数的脱钩关系,以期为洞庭湖平原实现化肥减量增效,防治因化肥面源污染引发生态环境风险问题,推动洞庭湖平原绿色农业高质量发展提供科学参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

洞庭湖平原位于湖南省东北部,北与湖北省江汉平原相接,为泥沙堆积而成。洞庭湖平原土壤肥沃,质地疏松,光热资源充足,水资源丰富,是我国重要的粮食生产基地,其中湖南省部分的面积占总面积的81%。本文以洞庭湖平原湖南省部分的21个县(市、区)为研究区域,该区域地理坐标为东经111°14′—113°15′,北纬28°15′—30°45′,国土面积为 $3.14 \times 10^4 \text{ km}^2$,达到湖南省的15%。2019年洞庭湖平原有效灌溉面积 $9.31 \times 10^5 \text{ hm}^2$,粮食播种面积为 $1.2 \times 10^6 \text{ hm}^2$,粮食总产量为 $7.77 \times 10^6 \text{ t}$,农业产值为801.994 9亿元,分别达到湖南省的29.31%,26.06%,26.13%,26.28%;相较于2009年,2019年洞庭湖平原粮食单产和农业产值分别增加 600 kg/hm^2 ,442.844亿元,增长的背后离不开科技进步,化肥等增产性要素大量使用也是主要原因之一。2019年洞庭湖平原化肥施用总量为2 217 901 t,达湖南省的30.78%,其中氮肥施用量为971 492 t,磷肥施用量为510 732 t,钾肥施用量为218 559 t,复合肥施用量为517 118 t,分别达到湖南省的31.15%,32.29%,29.54%,29.29%。但化肥等化学投入品的使用造成了严重的农业面源污染问题。国家高度重视农业面源污染治理,2015年发布了《到2020年化肥使用量零增长行动方案》等重要文件。洞庭湖流域是重点水源保护区和环境敏感流域,已被纳入国家农业面源污染重点流域之一,并在一些县(市、区)开展了面源污染综合治理试点。洞庭湖平原农业面源污染治理现已取得了一定的成绩,但面源污染形势依然严峻。2019年的《湖南省环境质量状况》显示,洞庭湖总磷和化学需氧量仍有超标情况,仍有突出的生态环境问题。因此,科学评价洞庭湖平原化肥面源污染所引发的耕地生态风险状况,并探究其与农业经济增长的脱钩关系具有重要的现实意义。

1.2 数据来源

洞庭湖平原21个县(市、区)的氮磷钾及复合肥施用量、农业产值以及耕地面积等原始数据来源于

2009—2020年《湖南农村统计年鉴》《湖南省统计年鉴》《长沙统计年鉴》《岳阳统计年鉴》《常德统计年鉴》和《益阳统计年鉴》。

2 研究设计

2.1 化肥面源污染生态环境风险评价模型

2.1.1 基本概念及假设 瑞典科学家 Hakanson^[22]

于1980年提出了潜在生态危害指数法模型,用于重金属污染生态风险评价。刘钦普^[23]在此基础上进行改进,提出了化肥面源污染环境风险评价模型,该模型考虑了化肥施用率、化肥利用率、生态安全标准、环境影响权重和作物复种指数等因素,且将环境风险指数计算结果限制在0~1,较Hakanson的模型而言,设置了综合指数上限值,便于风险程度的认识和比较。本文对化肥面源污染生态环境风险评价时基于以下3个方面的基本假设^[24]:

(1) 化肥施用造成的生态环境污染风险是非突发性的,具有不确定性,可以用 $[0, 1]$ 区间表示生态环境风险大小,风险越大越趋近于1,反之趋近于0;

(2) 化肥施用是正常的农业生产活动,而化肥施用是否产生生态环境风险与化肥施用生态环境安全阈值有关。化肥施用生态环境安全阈值是指为获得某种当季作物产量而不危害生态环境所施用的化肥最大量。化肥施用量大于生态环境安全阈值,则说明存在化肥污染的生态环境风险;

(3) 化肥施用生态环境风险还与化肥利用率、复种指数、土壤条件和作物类型有关。由于土壤条件和作物类型差异较大,基于化肥施用总量控制和评价的目的,可以忽略不计。而化肥利用率低使得氮、磷等营养物质进入环境,是引起化肥污染生态环境风险的主要原因;如果复种指数越大,则表示作物利用的化肥越多,污染环境的风险也越小^[24]。因此,假设在一定施肥条件下,环境风险指数与化肥利用率呈现负相关指数关系,与作物复种指数呈现负相关线性关系。

2.1.2 模型构建 根据以上假设,构建如下化肥施用生态环境风险指数经验模型:

$$R_i = \sum_{i=1}^3 W_i R_i \quad (1)$$

$$R_i = \left(\frac{F_i}{F_i + m T_i} \right)^{2\mu_i} \quad (2)$$

$$F_i = \frac{M_i}{A} \quad (3)$$

式中: R_i 为化肥污染生态环境风险总指数; W_i 为单质肥料(氮肥、磷肥或钾肥)污染环境效应权重, $\sum W_i = 1$,考

考虑到氮、磷、钾3种元素对生态环境的影响不同,根据已有研究成果,将氮、磷、钾3种肥料的权重分别设定为0.648,0.230,0.122^[25]; R_i 为单质肥料污染生态环境风险指数; F_i 为单质肥料施用强度; T_i 为单质肥料生态环境安全阈值,原环境保护部在2014年印发的《国家生态文明建设示范村镇指标(试行)》中规定农用化肥施用强度每公顷播种面积小于220 kg,这里将这一标准作为总的化肥施用环境安全阈值;参考发达国家氮磷钾1:0.5:0.5的施肥经验^[23]以及我国水稻等作物氮磷钾施肥比例为1:0.5:0.5的养分需求^[26],确定氮肥生态环境安全阈值为110 kg/hm²,磷肥和钾肥生态环境安全阈值均为55 kg/hm²; m 为复种指数,即作物播种面积与耕地面积之比; μ_i 为化肥利用率; M_i 为当年化肥施用量,按折纯量来计算; A 为耕地面积。为便于比较在不同化肥利用率和复种指数条件下,不同化肥对生态环境风险指数的影响,将参比基准复种指数设定为1,化肥利用率设定为50%。化肥氮磷钾的投入除了单质氮磷钾肥,还有复合肥中的氮磷钾,复合肥中氮、磷、钾的比例根据经验以1:1:1进行计算^[27]。

根据上式,可确定不同化肥施用强度时的生态环境风险指数分级标准。当 F_i 与 T_i 相等时,即 $R_i = 0.50$ 时,可认为是化肥施用的安全临界值。根据生态环境风险指数值,将化肥污染生态环境风险程度划分为6个等级^[24](表1)。

2.2 脱钩模型

2002年,经济发展与合作组织(OECD)在研究经济增长与环境污染关系中首先提出脱钩理论,其实质是度量经济增长是否以资源消耗和环境破坏为代价^[28]。在社会发展与经济正向增长的同时,资源利用与环境污染程度增速为负或小于经济增速,则认定

经济增长与环境消耗实现脱钩。伴随我国农业集约化与现代化的发展,为实现粮食稳步增产的目标,化肥施用量一直处于持续增长的状态,对生态环境的污染越来越大,环境风险日渐增加,农业面源污染问题日趋严重。基于此,将脱钩理论引入到农业经济增长与环境风险评价关系的研究中,借此评判地区农业发展健康状况。

表1 化肥污染生态环境风险指数分级类型

施肥量≤或> 安全阈值的倍数	生态环境 风险指数(R)	风险 等级	预警 级别
≤1	[0,0.50]	安全	0
≤2	(0.50,0.65]	低度风险	I
≤3	(0.65,0.75]	中度风险	II
≤4	(0.75,0.80]	高度风险	III
≤6	(0.80,0.85]	严重风险	IV
>6	(0.85,1]	极严重风险	V

具体采用 Tapio 脱钩模型来评价农业经济增长与化肥面源污染生态环境风险的关系,用指标的变化量表征,即一定时段内化肥面源污染生态环境风险指数与农业产值的变化量之比率,计算公式为:

$$DI = \frac{\Delta E}{\Delta Y} = \left(\frac{E_i}{E_{i-1}} - 1 \right) / \left(\frac{Y_i}{Y_{i-1}} - 1 \right) \quad (4)$$

式中:DI为农业经济增长与化肥面源污染生态环境风险的脱钩指数; E_{i-1} , E_i 分别为基期、末期的化肥面源污染生态环境风险指数; Y_{i-1} , Y_i 分别为基期、末期的农业产值; i 为年份。Tapio 脱钩模型是以0, 0.8, 1.2为临界值将脱钩弹性指数分成了8类,但鉴于弹性值(如0.8, 1.2)的设定较为主观且容易产生混淆^[29]。本文参考张田野等^[29]的脱钩状态划分观点,依据农业产值与化肥面源污染生态环境风险指数的关系,划分出6种脱钩类型(表2)。

表2 脱钩状态分类

状态	E_i	Y_i	DI	意义
强脱钩	—	+	$DI \leq 0$	最理想状态:农业产值增长,而化肥面源污染生态环境风险指数下降
弱脱钩	+	+	$0 < DI < 1$	较理想状态:农业产值与化肥面源污染生态环境风险指数都在增加,且农业产值增长幅度大于化肥面源污染生态环境风险指数增加幅度
扩张性负脱钩	+	+	$DI \geq 1$	一般状态:农业产值与化肥面源污染生态环境风险指数都在增加,但化肥面源污染生态环境风险指数增加幅度大于农业产值增长幅度
衰退性脱钩	—	—	$DI \geq 1$	较消极状态:农业产值与化肥面源污染生态环境风险指数都在下降,但化肥面源污染生态环境风险指数下降幅度大于农业产值下降幅度
弱负脱钩	—	—	$0 < DI < 1$	消极状态:农业产值与化肥面源污染生态环境风险指数都在下降,但农业产值下降幅度大于化肥面源污染生态环境风险指数下降幅度
强负脱钩	+	—	$DI \leq 0$	最消极状态:农业产值下降,而化肥面源污染生态环境风险指数却增加,环境恶化

2.3 非参数核密度估计

核密度估计(kernel density estimation)是一种

常见的非参数估计方法,其不需要事先对数据做出任何假定,仅是采用连续的密度曲线对样本本身的数据

分布特征与分布规律进行描述,是目前分析地理事物区域差异变化较具代表性的统计手段^[30]。因此,采用核密度估计方法分析洞庭湖平原化肥面源污染生态环境风险在县级尺度上的区域差异性的变化趋势,其估计表达式为^[31]:

$$f(x) = \frac{1}{Nh} \sum_{i=1}^N K\left(\frac{x_i - \bar{x}}{h}\right) \quad (i=1, 2, \dots, 21) \quad (5)$$

式中: $f(x)$ 为化肥面源污染生态环境风险密度函数; x_i 为洞庭湖平原21个区(县、市)化肥面源污染生态环境风险指数计算值; \bar{x} 为洞庭湖平原化肥面源污染生态环境风险指数均值; N 为研究区域个数(个); h 为窗宽; K 为核函数,因为高斯核函数最为普遍广泛,具有优良的可导性,且计算过程简便,故采用高斯核密度函数对洞庭湖平原各县(市、区)化肥面源污染生态环境风险进行核密度估计,估计过程基于RStudio软件。

3 结果与分析

3.1 化肥面源污染生态环境风险时空分析

2006年农业税的废除提高了农民生产积极性,我国农业发展得到了进一步提升。2012年,党的十八大作出“大力推进生态文明建设”的战略决策。2015年,我国启动化肥农药使用量零增长行动,出台了《到2020年化肥使用量零增长行动方案》等重要文件,标志着中国农业面源污染防治正式提上日程。2017年,农业部办公厅印发了《重点流域农业面源污染综合治理示范工程建设规划(2016—2020年)》;2018年,出台了《中共中央国务院关于全面加强生态环境保护坚决打好污染防治攻坚战的意见》《关于加快推进长江经济带农业面源污染治理的指导意见》等重要文件。考虑到各时期政策出台后过渡见效期,选取2009年、2014年、2019年为研究时点来分析洞庭湖平原近3个五年计划中后期的化肥面源生态环境风险时空特征。

3.1.1 化肥面源污染生态环境风险时间规律 就洞庭湖平原整体而言,2009—2019年洞庭湖平原化肥面源污染生态环境风险指数呈现先缓慢上升再显著下降的特征。2009年洞庭湖平原化肥污染生态环境风险总指数为0.749,处于中度风险(Ⅱ级预警),2014年升至0.762,处于高度风险(Ⅲ级预警),主要原因是在这时期,基于增产增收的发展目标,化肥施用量高,同时地方政府在这时期对环境保护和污染治理的意识不强,缺乏合理有效的化肥管制政策手段,使得化肥施用量短期内迅速增加而形成峰值。而到2019年化肥污染生态环

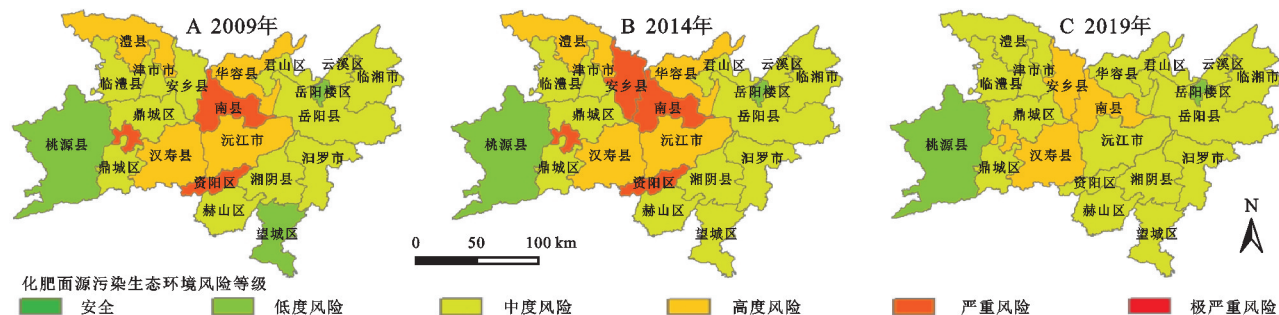
境风险指数逐步降到0.732,降回中度风险(Ⅱ级预警),这主要得益于国家面源污染治理政策文件的相继出台,推动了洞庭湖平原生态治理措施的完善,加强了面源污染防治的监督与管控,如洞庭湖平原全面推广测土配方技术,推广水肥一体化技术,实施化肥使用量零增长行动,强化耕地污染治理技术的投入,开展农业面源污染综合治理试点,进而降低了洞庭湖平原的化肥面源污染生态环境风险程度。

3.1.2 化肥面源污染生态环境风险评价空间特征

图1展示了洞庭湖平原2009年、2014年和2019年的化肥面源污染生态环境风险空间分布特征。由图1可知,洞庭湖平原化肥面源污染生态环境风险在县级尺度上存在较明显的区域差异,洞庭湖平原中部地区的化肥面源污染生态环境风险程度高于东部和西部地区。总体来看,区域差异正在不断缩小。桃源县化肥面源污染生态环境风险等级在各时期均为低度风险(Ⅰ级预警),主要原因可能是桃源县为洞庭湖平原首批纳入全国农业面源污染综合治理试点的地区,很重视农业面源污染综合治理,相比其他地区,对于化肥污染的治理和控制已具有比较成熟的经验;南县化肥面源污染生态环境风险等级不容乐观,常年处于高度风险(Ⅲ级预警)和严重风险(Ⅳ级预警)状态,主要是因为南县化肥施用强度高,面源污染防治滞后,导致生态环境风险高。分年度来看,2009年,资阳区、武陵区 and 南县3个地区化肥面源污染生态环境风险最为严重,这是因为农业税取消后农民农业生产积极性大幅提高,农户投入大量的化肥以增加农业产量和提高收入,导致氮、磷等元素大量积累,造成严重的农业面源污染。到2014年,安乡县化肥污染生态环境风险则上升至严重风险(Ⅳ级预警),但风险指数上升幅度不大,主要是前期化肥施用量逐年增加,使得累计的化肥污染相比周围地区更为严重。而2014—2019年,洞庭湖平原所有县(市、区)的化肥面源污染生态环境风险等级保持不变或有所下降。严重风险区减至0个,其中资阳区从严重风险(Ⅳ级预警)降低至中度风险(Ⅱ级预警),主要得益于资阳区政府对于面源污染防治政策的高度落实,加大科技兴农、农技推广工作的投入力度,其他污染防治重视程度较高区域如澧县、沅江市、华容县,也降低至中度风险(Ⅱ级预警)。说明当地政府在重新认识人地矛盾及耕地生态安全现状后采取的一系列耕地生态安全改善措施开始显现成效^[32],进而导致洞庭湖平原化肥面源污染生态环境风险整体下降,有向好的趋势。2009—

2019年,洞庭湖平原各县(市、区)化肥面源污染生态环境风险指数变化率控制在5%以内,主要是洞庭湖平原化肥施用强度常年较高,湖南省专项治理农业面

源污染相对较晚,主要集中于2017—2018年才发布关于面源污染治理和生态环境整治等方面的文件,洞庭湖平原农业面源污染治理效果尚未完全显现。



注:基于标准地图服务系统下载的审图号GS(2022)1873号的标准地图制作,底图未做修改。

图1 洞庭湖平原2009—2019年化肥面源污染生态环境风险等级空间分布特征

为深入探究洞庭湖平原化肥面源污染生态环境风险在县级尺度上的区域差异性的变化趋势,采用核密度估计法,对洞庭湖平原2009年、2014年、2019年化肥面源污染生态环境风险进行核密度估计(图2)。从分布动态演进趋势上看,2009—2014年洞庭湖平原化肥面源污染生态环境风险核密度曲线在横轴方向上基本保持稳定,呈现相对不显著的向左移动趋势,2014—2019年核密度曲线中心及其变化区间都表现出明显左移之势,意味着洞庭湖平原化肥面源污染生态环境风险整体水平在2009—2019年呈现降低的趋势,且后期风险降低趋势更加迅速。从分布形状上看,主峰与侧峰高度在2009—2019年呈现出“先下降再上升”的变化特征,主峰与侧峰宽度经历了“变大—变小”的变化态势,表明洞庭湖平原化肥面源污染生态环境风险极化现象有所增强,内部差距经历了“先扩大后缩小”的演变历程。从波峰演变进程来看,核密度曲线在2009—2014年均均为“一主一小”的双峰格局,左侧峰峰值下降,曲线渐趋平缓,“双峰”分布特征逐渐不明显,说明耕地化肥面源污染生态环境风险呈现出两级分散化的区域集聚特征,但两级分化态势渐趋弱化,2014—2019年逐渐演变为三峰格局,呈现出轻微多极化态势,分散化现象进一步显著。从分布延展性来看,区域分布延展性大致经历了“轻微拓宽—明显左收敛”变化过程,总体趋于小幅收敛趋势,这说明洞庭湖平原内部化肥面源污染生态环境风险低的县(市、区)与高的县(市、区)之间的差距有一定程度的缩小,但缩小幅度并不十分显著。该现象背后的主要原因可能是洞庭湖平原化肥施用强度常年保持在较高水平,初期面源污染治理欠缺治理经验,前期污染治理效果并不显著。地区农业经济发展规模与污染防治力度的区域差异,造成了洞庭湖平原各地区化肥施用量与化肥施用过程中风险管控的不均衡。经济较差的单元往往

面临着更为强烈的破坏生态环境的压力^[33],且对于风险管控的技术能力较弱,从而导致各地区化肥面源污染生态环境风险的差异比较明显,但后期洞庭湖平原开展农业面源污染综合治理试点,以面源污染治理示范区带动周边地区开展面源污染防治工作,使得洞庭湖化肥面源污染生态环境风险内部差距逐步缩小,且呈现出轻微多极化分散局面。

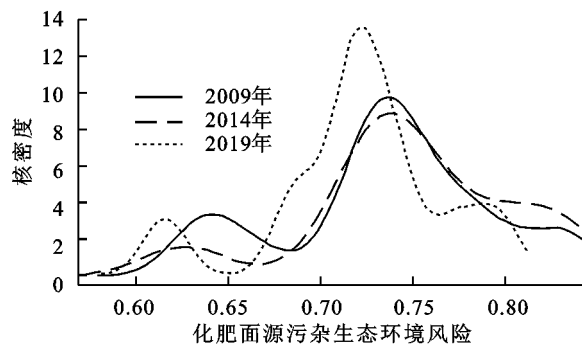


图2 洞庭湖平原2009—2019年化肥面源污染生态环境风险核密度估计

3.2 洞庭湖平原农业经济增长与化肥面源污染生态环境风险的脱钩关系

表3展示了洞庭湖平原农业经济增长与化肥面源污染生态环境风险的脱钩关系。考虑到以实价计算的农业产值不能进行纵向比对,故采用农业产值可比价,以研究基期(2008年)作为价格基准,对后10a的数据采用农业产值可比价进行分析。

由表3可知,自2008年来,洞庭湖平原农业产值由33 560.75万元增长到2019年的76 745.92万元,农业产值年均增速达7.94%,除2017年外,农业产值总体上呈逐年连续增长趋势;而化肥面源污染生态环境风险与其存在明显关联,多次同期增长。农业产值与化肥面源污染生态环境风险的脱钩系数为-0.433~0.069,呈现强脱钩、弱脱钩、强负脱钩3种状态。纵向比较分析发现,农业产值与化肥污染生态环境风险评价指数之

间的脱钩关系具有明显阶段性特点。其脱钩关系具体可以分为两个阶段:一是波动期(2009—2013 年),农业产值与风险评价指数的脱钩关系呈现出“强脱钩—弱脱钩—弱脱钩—强脱钩—弱脱钩”的动态变化趋势。该阶段脱钩关系以弱脱钩为主,共出现了 3 次,占统计期数的 60%,但农业产值的增长速度明显远超前于化肥面源污染生态环境风险的增长速度,说明湖南省正在逐步脱离原有的高度依赖化肥施用的传统农业模式,更加重视农业科技的投入,生态环境风险与农业经济发展的脱钩关系正呈现着理想的发展趋势。农业产值一直在年度持续增长,两者脱钩关系的动态变化主要取决于化肥面源污染生态环境风险评价指数的变化,而其又是随三类化肥施用强度的变化而变化,由于初期对洞庭湖平原农业面源污染治理的重视程度欠缺与污染防治手段不合理,化肥污染生态环境风险指数仍然在增加与减少中反复波动,尚未得到稳定控制。二是强脱钩期(2014—2019 年),此阶段内,2017 年农业产值因受湖南省全省经济下行

压力影响而出现下降,其余年份农业产值保持年度持续增长趋势。除去 2017 年个别特殊状态,此时段内农业产值与化肥面源污染生态风险指数稳定实现强脱钩,即伴随农业产值增加,生态环境风险指数降低,实现最理想的绿色农业发展状态。这主要得益于国务院于 2014 年批复设立洞庭湖生态经济区,将洞庭湖农业引入特色化、新型农业现代化、绿色化发展的新阶段。且伴随十三五期间“化肥使用量零增长行动”等政策的实施,化肥施用量得到有效控制,生态环境风险指数稳步下降。可见,洞庭湖平原化肥面源污染治理取得初步成效,接下来应进一步扩大化肥面源污染治理成果,继续加强对化肥施用量的控制,改进施肥方式,根据洞庭湖平原耕地条件推进精准施肥,贯彻落实化肥“减量增效”的目标,提升化肥利用率,在降低化肥面源污染造成的生态环境风险的同时,保证粮食增产提质能力,不断提高农业质量与效益,以期尽快实现农业高质量发展与打赢农业面源污染攻坚战的双赢理想状态。

表 3 2009—2019 年洞庭湖平原农业经济增长与化肥面源污染生态环境风险的脱钩状态

年份	农业产值/ 万元	农业产值 变化率/%	化肥污染生态 环境风险指数	化肥污染生态 环境风险指数变化率/%	脱钩 系数	脱钩 状态
2008	33560.751		0.760			
2009	35259.268	5.061	0.749	−1.482	−0.293	强脱钩
2010	39848.207	13.015	0.755	0.901	0.069	弱脱钩
2011	46321.361	16.245	0.759	0.478	0.029	弱脱钩
2012	49199.785	6.214	0.759	−0.003	−0.001	强脱钩
2013	53762.000	9.273	0.762	0.462	0.050	弱脱钩
2014	57136.670	6.277	0.762	−0.021	−0.003	强脱钩
2015	61625.571	7.856	0.761	−0.142	−0.018	强脱钩
2016	65313.967	5.985	0.749	−1.604	−0.268	强脱钩
2017	63485.236	−2.800	0.758	1.213	−0.433	强负脱钩
2018	66438.714	4.652	0.753	−0.614	−0.132	强脱钩
2019	76745.923	15.514	0.732	−2.807	−0.181	强脱钩

4 结 论

(1) 2009—2019 年洞庭湖平原化肥面源污染生态环境风险指数先由 0.749(2009 年)上升至 0.762(2014 年),后又下降至 0.732(2019 年),呈现先升后降的变化趋势,变化速度较缓慢;洞庭湖平原化肥面源污染生态环境风险区域分异现象明显,中部地区生态环境风险等级高于东部与西部地区;2019 年仍有少数地区处于高度风险状况。

(2) 2009—2019 年洞庭湖平原耕地化肥面源污染生态环境风险区域差异现象明显,呈现出两级分散化的区域集聚特征,期间内极化现象有所增强,内部

差距经历了“先扩大后缩小”的演变历程。

(3) 2009—2019 年洞庭湖平原农业经济增长与化肥面源污染生态环境风险的脱钩效应呈现明显的阶段性特征,由开始的“强脱钩与弱脱钩”波动状态转向基本稳定的“强脱钩”状态,整体呈现向好的绿色可持续发展趋势。

参考文献:

[1] 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.

[2] 丁学谦,吴群,文高辉,等.2005—2019 年洞庭湖平原耕地面源污染迁移轨迹及空间格局[J].农业工程学报,

- 2021, 37(15): 258-266.
- [3] 林兰稳, 朱立安, 曾清苹. 广东省农业面源污染时空变化及其防控对策[J]. 生态环境学报, 2020, 29(6): 1245-1250.
- [4] 金书秦, 沈贵银. 中国农业面源污染的困境摆脱与绿色转型[J]. 改革, 2013(5): 79-87.
- [5] 张维理, 武淑霞, 冀宏杰, 等. 中国农业面源污染形势估计及控制对策: I. 21 世纪初期中国农业面源污染形势估计[J]. 中国农业科学, 2004, 37(7): 1008-1017.
- [6] 朱兆良, 孙波. 中国农业面源污染控制对策研究[J]. 环境保护, 2008(8): 4-6.
- [7] 向平安, 周燕, 黄璜, 等. 氮肥面源污染控制的绿税激励措施探讨: 以洞庭湖区为例[J]. 中国农业科学, 2007, 40(2): 330-337.
- [8] Chaplot V. Impact of DEM mesh size and soil map scale on SWAT runoff, sediment, and $\text{NO}_3\text{-N}$ loads predictions[J]. Journal of hydrology, 2005, 312(1/4): 207-222.
- [9] 田耀武, 黄志霖, 肖文发. 基于 AnnAGNPS 模型的三峡库区秭归县非点源污染输出评价[J]. 生态学报, 2011, 31(16): 4568-4578.
- [10] 彭畅, 朱平, 牛红红, 等. 农田氮磷流失与农业非点源污染及其防治[J]. 土壤通报, 2010, 41(2): 508-512.
- [11] 左喆瑜. 农户对环境友好型肥料的选择行为研究: 以有机肥及控释肥为例[J]. 农村经济, 2015(10): 72-77.
- [12] Kumwimba M N, Zhu B, Wang T, et al. Distribution and risk assessment of metals and arsenic contamination in man-made ditch sediments with different land use types [J]. Environmental Science & Pollution Research, 2016, 23(24): 1-16.
- [13] Wang Z, Yang S, Zhao C, et al. Assessment of non-point source total phosphorus pollution from different land use and soil types in a mid-high latitude region of China [J]. Water, 2016, 8 (11). DOI: 10. 3390/w8110505.
- [14] 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.
- [15] 马芊红, 张光辉, 耿韧, 等. 我国水蚀区坡耕地土壤重金属空间分布及其污染评价[J]. 水土保持研究, 2017, 24(2): 112-118.
- [16] 王琦, 易桂花, 张廷斌, 等. 基于生态足迹模型的四川省耕地资源评价[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(1): 80-87.
- [17] 蔡银莺, 李晓云, 张安录. 耕地资源非市场价值评估初探[J]. 生态经济: 学术版, 2006(2): 10-14.
- [18] 牛海鹏, 张杰, 张安录. 耕地保护经济补偿的基本问题分析及其政策路径[J]. 资源科学, 2014, 36(3): 427-437.
- [19] 田云, 张俊飏, 李波. 中国农业碳排放研究: 测算、时空比较及脱钩效应[J]. 资源科学, 2012, 34(11): 2097-2105.
- [20] 苏洋, 马惠兰, 李凤. 新疆农牧业碳排放及其与农业经济增长的脱钩关系研究[J]. 干旱区地理, 2014, 37(5): 1047-1054.
- [21] 赵先超, 宋丽美. 湖南省农地利用碳排放与农业经济关系研究[J]. 生态与农村环境学报, 2018, 34(11): 976-981.
- [22] Hakanson L. An ecology risk index for aquatic pollution control: a sedimentological approach [J]. Water Research, 1980, 14(8): 995-1001.
- [23] 刘钦普. 中国化肥投入区域差异及环境风险分析[J]. 中国农业科学, 2014, 47(18): 3596-3605.
- [24] 刘钦普. 淮河流域化肥施用空间特征及环境风险分析[J]. 生态环境学报, 2015, 24(9): 1512-1518.
- [25] 高志红, 陈晓远, 林昌华, 等. 不同施肥水平对粤北坡岗地木薯干物质积累和产量的影响[J]. 广东农业科学, 2011, 38(4): 70-71, 93.
- [26] 刘钦普. 中国化肥施用强度及环境安全阈值时空变化[J]. 农业工程学报, 2017, 33(6): 214-221.
- [27] 宋大平, 陈巍, 高彦征. 淮河流域氮肥农药施用的合理性及其环境影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(6): 1144-1151.
- [28] 栾江, 马瑞, 李浩, 等. 1998—2013 年中国主要农作物化肥消费的脱钩分析[J]. 农林经济管理学报, 2015, 14(5): 460-466.
- [29] 张田野, 孙炜琳, 王瑞波. 化肥零增长行动对农业污染的减量贡献分析: 基于 GM(1, 1) 模型及脱钩理论[J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(1): 265-274.
- [30] 刘蒙罢, 张安录, 文高辉. 长江中下游粮食主产区耕地利用生态效率区域差异与空间收敛[J]. 自然资源学报, 2022, 37(2): 477-493.
- [31] 叶阿忠. 非参数计量经济学[M]. 天津: 南开大学出版社, 2005.
- [32] 文高辉, 袁泉, 赵懿, 等. 2007—2017 年洞庭湖平原耕地生态安全评价及障碍因子诊断[J]. 水土保持通报, 2021, 41(2): 178-187.
- [33] 秦晓楠, 卢小丽, 武春友. 国内生态安全研究知识图谱: 基于 Citespace 的计量分析[J]. 生态学报, 2014, 34(13): 3693-3703.