洞庭湖平原耕地面源污染时空特征及脱钩效应

胡贤辉，张紫怡，王子诚，方龙俊，田雨萌，文高辉
（湖南师范大学 地理科学学院，湖南 长沙 410081）

摘　要：［目的］揭示 2009—2019 年洞庭湖平原耕地面源污染时空演变规律，探究耕地面源污染与农业生产的脱钩关系，为洞庭湖平原耕地面源污染治理提供科学参考。［方法］采用化肥农药施用强度和粮食单产分别描述洞庭湖平原耕地面源污染和农业生产状况，利用空间分析法和脱钩模型揭示 2009—2019 年洞庭湖平原耕地面源污染和农业生产的时空演变规律及其脱钩关系。［结果］①2009—2019 年洞庭湖平原化肥、农药施用强度均呈现“先升后降”的趋势，且具有明显的空间差异性，化肥、农药生产率总体上呈现出上升趋势；②2009—2019 年洞庭湖平原粮食单产呈现出倒 U 形趋势，且具有明显的空间差异性；③洞庭湖平原粮食单产与化肥农药施用强度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—2015 年），第三阶段为弱负脱钩和衰退脱钩期（2016—2019 年）；④洞庭湖平原农业生产与耕地面源污染的脱钩关系在县级空间尺度上逐渐呈现出较高的趋同性和聚集特征。［结论］应进一步加强耕地面源污染源头防治，并采取多种举措提高粮食单产，最终实现耕地面源污染与农业生产的强脱钩。

关键词：耕地；面源污染；农业；时空规律；脱钩关系；洞庭湖平原

文献标识码：A　　**文章编号：**1000-288X(2022)04-0258-09　　**中图分类号：**F323.2

文献参数：胡贤辉，张紫怡，王子诚，等.洞庭湖平原耕地面源污染时空特征及脱钩效应[J].水土保持通报，2022，42（4）：258-266. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2022.04.033；Hu Xianhui，Zhang Ziyi，Wang Zicheng，et al. Spatiotemporal characteristics and decoupling effect of non-point source on cultivated land pollution in Dongting Lake plain [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2022，42(4)：258-266.

Spatiotemporal Characteristics and Decoupling Effect of Non-point Source Pollution on Cultivated Land in Dongting Lake Plain

Hu Xianhui，Zhang Ziyi，Wang Zicheng，Fang Longjun，Tian Yumeng，Wen Gaohui
（*School of Geographic Sciences*，*Hu'nan Normal University*，*Changsha*，*Hu'nan* 410081，*China*）

Abstract：［Objective］The temporal and spatial evolution law of non-point source pollution on cultivated land in the Dongting Lake plain from 2009 to 2019 was studied to define the decoupling relationship between cultivated land non-point source pollution and agricultural production in order to provide a scientific reference for the treatment of non-point source pollution on cultivated land in the Dongting Lake plain. ［Methods］The application rates of chemical fertilizers and pesticides in addition to grain yield per unit area were used to describe the status of cultivated land non-point source pollution and agricultural production in the Dongting Lake plain. Spatial analysis and a decoupling model were used to determine the temporal and spatial evolution law and the decoupling relationship between non-point source pollution on cultivated land and agricultural production in the Dongting Lake plain from 2009 to 2019. ［Results］① From 2009 to 2019，the application rates of chemical fertilizers and pesticides in the Dongting Lake plain initially increased and then decreased，

收稿日期：2021-11-26　　**修回日期：**2022-02-13
资助项目：国家自然科学基金项目“耕地利用生态效率评价、驱动因子及提升机制研究：以洞庭湖平原为例”（41801190）；湖南省自然科学基金项目（2019JJ50390）；湖南省哲学社会科学基金项目（18YBQ097）；湖南省教育厅创新平台开放项目（19K062）；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：胡贤辉（1978—），男（汉族），江西省上饶市人，博士，副教授，硕士生导师。主要从事国土规划与评价方面的研究。Email：hxh66698@sohu.com。
通讯作者：文高辉（1990—），男（汉族），江西省萍乡县人，博士，副教授，硕士生导师，主要从事土地经济与管理方面的研究。Email：wengaohui360101@sina.com。

and exhibited obvious spatial differences. The productivity of chemical fertilizers and pesticides showed an overall upward trend; ② From 2009 to 2019, grain yield per unit area in the Dongting Lake plain showed an inverted U-shaped trend, with obvious spatial differences; ③ The decoupling relationship between grain yield per unit area and the rates of chemical fertilizer and pesticide applications in the Dongting Lake plain showed obvious stage characteristics: the first stage was a fluctuation period (2009—2013); the second stage was a strong decoupling period (2014—2015); and the third stage was a weak negative decoupling and declining decoupling period (2016—2019); ④ The decoupling relationship between agricultural production and cultivated land non-point source pollution in the Dongting Lake plain gradually showed high convergence and aggregation characteristics on the county-level spatial scale. [Conclusion] Efforts should be taken to further strengthen the prevention and control of the source of non-point source pollution on cultivated land through the use of a variety of measures in order to improve grain yield, and to finally realize the strong decoupling between cultivated land non-point source pollution and agricultural production.

Keywords: cultivated land; non point source pollution; agriculture; temporal and spatial law; decoupling relationship; Dongting Lake plain

耕地是人类赖以生存的物质基础,具有重要的生态价值、经济价值和社会价值。在经济发展、人口剧增和居民消费结构升级等因素驱动下,耕地利用强度不断增加,随之产生了一系列的面源污染问题[1-3],耕地利用造成的面源污染问题是指化肥、农药以及其他田间有机或无机污染物质,通过地表径流、地下渗漏、挥发或残留等过程,造成的水体富营养化、土壤板结、大气酸化等生态环境污染问题和食品安全危机[4-6]。自 20 世纪 80 年代中国农地制度改革以来,农民进行农业生产的积极性大幅提高,农业经济也得到了快速发展,但因不合理地使用化肥、农药等化学投入品,造成了严重的耕地面源污染问题。党和国家高度重视耕地面源污染治理,出台了系列政策文件,现已取得一定的成绩,但是中国耕地面源污染形势依然严峻。《第二次全国污染源普查公报》显示,2017 年种植业污染物排放(流失)量中,氨氮达 8.30×10^4 t,总氮达 7.20×10^5 t,总磷达 7.62×10^4 t。

相对于点源污染,面源污染来源复杂,迁移途径多样化,具有不确定性、分散性、滞后性和潜伏性的特性,不易监测和防治[7-9]。鉴于此,学术界非常重视面源污染的形成机理和时空演变规律等方面研究。如,梁流涛等[10]从理论和实证上分析了农业面源污染的形成机制;武淑霞等[11]论述了农业面源污染成因及其现状;刘钦普[12]分析了中国粮食主产区化肥施用时空特征及生态经济合理性;丘雯文等[13]分析了中国农业面源污染的空间差异及其动态演变规律;卢少勇等[14]分析了洞庭湖农业面源污染排放特征。在此基础上,也有部分学者开始关注面源污染治理与农业生产的脱钩关系。例如,张郁等[15]对黑龙江垦区农业生产与面源污染进行脱钩分析与调控模拟;杨建辉[16]分析了华东 6 省 1 市的农业化学投入与农业经济增长的脱钩关系;彭甲超等[17]探讨了长江经济带农业废水面源污染与农业经济增长的脱钩关系。上述研究分别从不同视角采用不同指标揭示了不同区域的农业面源污染的时空特征,也对其与农业经济增长的关系进行了有益的探讨,为本文提供了很好的参考价值。但以上研究大多基于省级或市级以上较大尺度的评价单元来研究面源污染问题,鲜有文献基于县级尺度进行探讨;关于农业生产与面源污染的脱钩关系研究中农业生产的表征指标常采用农业产值,但该表征指标易受到价格因素的影响,而粮食产量更能准确地反映地区农业特别是种植业的生产状况,实现粮食稳定增产是保障粮食安全的基础;此外,鲜有文献探讨农业生产与耕地面源污染的脱钩关系的空间格局。

洞庭湖平原是中国重要的商品粮生产基地,保护其耕地生态健康对保障国家粮食安全、生态安全和社会安全具有重大意义。然而当前洞庭湖平原农户长期不合理的农业生产行为造成了严重的耕地面源污染,有研究表明,1991—2015 年洞庭湖 TN 和 TP 浓度的年均值均呈现上升趋势[18]。当前,洞庭湖平原是中国耕地面源污染的重点治理区域。鉴于此,本文以洞庭湖平原为研究区域,采用化肥、农药施用强度来表征耕地面源污染状况,基于县级尺度揭示 2009—2019 年洞庭湖平原耕地面源污染时空演变规律,并进一步探究耕地面源污染与农业生产的脱钩关系,以期为洞庭湖平原耕地面源污染治理提供科学参考。

1　研究方法

脱钩理论最初是由经济发展与合作组织

(OECD)对经济增长与环境消耗关系的研究中提出的,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[19]。通常认为,在实现经济增长的同时,若环境消耗增速为负或者其小于经济增速时,认为经济增长与环境消耗为脱钩关系。当前农业农村环境问题日益突出,脱钩理论也被广泛地引入到农业农村环境与经济等领域。因此,本文运用脱钩理论,采用脱钩模型来揭示农业生产与耕地面源污染的关系,借此来判断农业生产与面源污染排放的协调状况。其具体公式为:

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

式中:DI 为农业生产与耕地面源污染的脱钩指数;E_i,E_{i-1} 分别为基期、末期的化肥(农药)施用强度;Y_{i-1},Y_i 分别为基期、末期的粮食单产;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,本文参考张田野等[20]的观点,依据农业生产与耕地面源污染的脱钩状态及含义,划分为 6 种脱钩类型(表 1)。

表 1 农业生产与面源污染排放脱钩状态分类

状 态	E_i	Y_i	DI	指标意义
强脱钩	−	+	DI≤0	最理想状态:粮食单产增(+),而化肥(农药)施用强度下降(−)
弱脱钩	+	+	0<DI<1	较理想状态:粮食单产与化肥(农药)施用强度都在增加,且粮食单产增长幅度大于化肥(农药)施用强度增加幅度
扩张性负脱钩	+	+	DI≥1	一般状态:粮食单产与化肥(农药)施用强度都在增加,但化肥(农药)施用强度增加幅度大于粮食单产增长幅度
衰退性脱钩	−	−	DI≥1	较消极状态:粮食单产与化肥(农药)施用强度都在下降,但化肥(农药)施用强度下降幅度大于粮食单产下降幅度
弱负脱钩	−	−	0<DI<1	消极状态:粮食单产与化肥(农药)施用强度都在下降,但粮食单产下降幅度大于化肥(农药)施用强度下降幅度
强负脱钩	+	−	DI≤0	最消极状态:粮食单产下降,而化肥(农药)施用强度却增加,环境恶化

注:DI 为农业生产与耕地面源污染的脱钩指数;E_i 为化肥(农药)施用强度;Y_i 为粮食单产;i 为年份。

2 研究区域与数据来源

2.1 研究区概况

洞庭湖平原土地肥沃、物产丰饶,是中国重要的商品粮基地和工业原料供应地,其位于湖南省东北部和长江中游荆江以南,地跨湘、鄂两省,属于亚热带季风湿润气候,光照充足、雨水丰沛。本文以洞庭湖平原湖南省部分的 21 个县(区、市)为研究区域,其国土面积为 3.14×10^4 km^2,约占湖南省的 15%。2019 年洞庭平原的有效灌溉面积为 930.97×10^3 hm^2,粮食作物播种面积达到 $1\ 203.84\times10^3$ hm^2,粮食总产量为 777.36×10^4 t,分别达到湖南省的 29.31%,26.08%和 26.13%,而化肥施用强度和农药施用强度也一直处于高位,2019 年分别达到 2.22×10^3,25.5 kg/hm^2。高强度的化肥农药施用使得洞庭湖平原同时也是严重的耕地面源污染区域,2019 年的《中国生态环境状况公报》显示,洞庭湖的水质为 Ⅳ类,总磷和化学需氧量超标。国家高度重视洞庭湖平原耕地面源污染治理,洞庭湖平原多个区(县、市)为农业面源污染综合治理试点地区。因此,研究洞庭湖平原耕地面源污染时空特征及其与农业生产的关系具有重要现实意义。

2.2 数据来源

本文所需的 2009—2019 年洞庭湖平原 21 个县(区、市)的化肥施用量、农药施用量、粮食产量等数据均来自 2010—2020 年的《湖南农村统计年鉴》,耕地面积数据来源于 2009—2019 年湖南省土地利用变更调查数据。

3 结果与分析

3.1 洞庭湖平原耕地面源污染时空特征

3.1.1 *洞庭湖平原耕地面源污染时间规律* 本文采用化肥、农药施用强度来表征洞庭湖平原耕地面源污染状况。图 1 和图 2 分别反映了 2009—2019 年洞庭湖平原化肥农药施用总量和化肥农药施用强度的变化状况。

(1) 由图 1 可知,近 10 a 来,洞庭湖平原化肥施用量呈现出先增后降的趋势,化肥年施用总量从 2009 年的 2.64×10^9 kg 增至 2013 年的 2.80×10^9 kg,然后降至 2019 年的 2.22×10^9 kg,10 a 间共降低了 15.8%;农药施用量也呈现先增后降的趋势,农药年施用总量从 2009 年的 3.32×10^7 kg 增至 2014 年的 3.73×10^7 kg,然后降至 2019 年的 2.55×10^7 kg,10 a 间共降低了 23.3%。

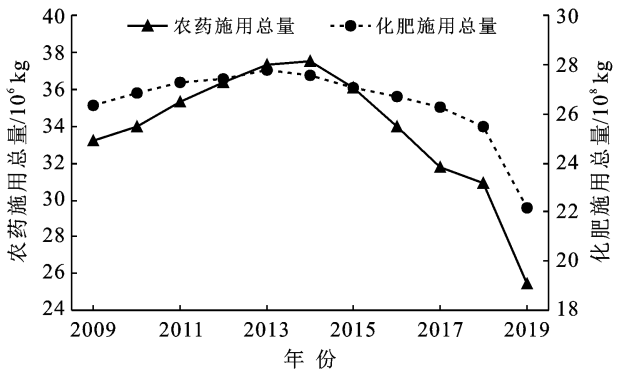

图 1　洞庭湖平原 2009—2019 年化肥与农药施用总量

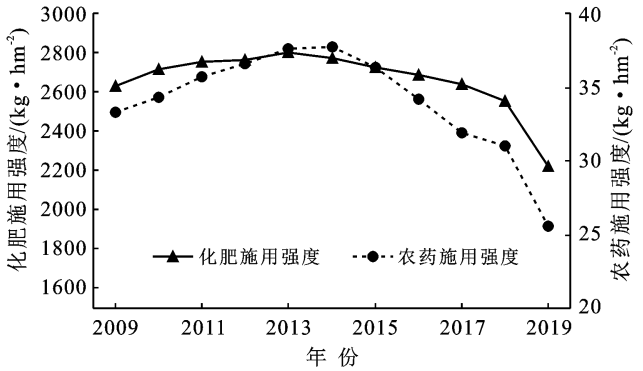

图 2　洞庭湖平原 2009—2019 年化肥与农药施用强度

(2) 由图 2 可知,近 10 a 来,洞庭湖平原化肥施用强度(即单位耕地面积的化肥施用量)呈现出先增后降的趋势,从 2009 年的 2.63×10^3 kg/hm^2 增至 2013 年的 2.80×10^3 kg/hm^2,然后稳定降至 2019 年的 2.22×10^3 kg/hm^2。农药施用强度(即单位耕地面积的农药施用量)也呈现出先增后降的趋势,从 2009 年的 33.2 kg/hm^2 升至 2014 年的 37.7 kg/hm^2,然后连续降至 2019 年的 25.5 kg/hm^2。近年来,化肥和农药过量施用引起环境污染日渐严重,受到社会各界广泛关注。特别是 2012 年党的十八大提出了生态文明建设,中国生态文明建设被提升到“五位一体”的战略高度,国务院研究部署了土壤环境保护和农业农村面源综合治理工作。湖南省高度重视耕地面源污染治理,洞庭湖平原化肥施用总量和施用强度在 2013 年达到峰值并于 2014 年开始下降,农药施用总量和施用强度在 2014 年达到峰值并于 2015 年开始下降,特别是在 2015 年中国政府提出《到 2020 年化肥施用量零增长行动方案》后,化肥施用量和农药施用量下降趋势更加明显,说明政策的执行已初见成效。此外,中国也高度重视粮食主产区农地整治工作,在洞庭湖平原开展了大量高标准农田建设、中低产田改造等农地整治项目,耕地数量和质量都得到了提升。耕地面源污染治理和农地整治共同推动了洞庭湖平原化肥和农药施用强度的降低。

(3) 图 3 反映了 2009—2019 年洞庭湖平原化肥和农药生产率状况,整体来看,两者变化趋势表现为极强的相似性。近 10 a 来,洞庭湖平原化肥生产率(即单位化肥施用量的粮食产量)总体呈上升趋势。洞庭湖平原化肥生产率从 2009 年的 2.97 kg/kg 升至 2019 年的 3.50 kg/kg。主要原因是,2014 年后洞庭湖平原化肥施用总量开始下降,使得化肥生产率得以上升。洞庭湖平原农药生产率(即单位农药施用量的粮食产量)总体也呈上升趋势,洞庭湖平原农药生产率由 2009 年的 235.61 kg/kg 波动降至 2013 年的 221.84 kg/kg,然后上升至 2019 年的 304.88 kg/kg。随着生态文明建设不断推进,2014 年开始农药施用量持续下降,使得农药使用效率逐步上升。

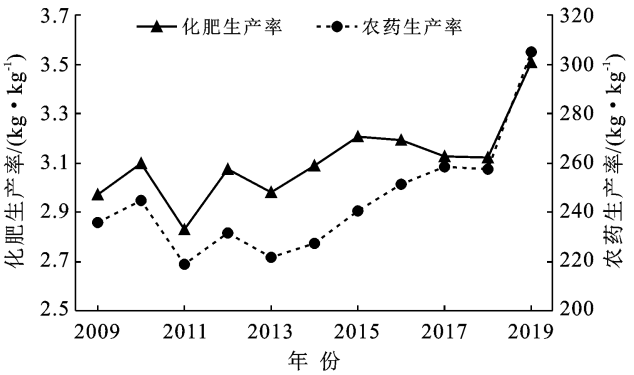

图 3　洞庭湖平原 2009—2019 年化肥及农药的生产率

3.1.2　洞庭湖平原耕地面源污染空间分布特征　为揭示 2009—2019 年洞庭湖平原耕地面源污染的空间分布特征,按研究时段的前中后选取 2009,2014,2019 年这 3 个年份来研究洞庭湖平原化肥施用强度和农药施用强度空间分布特征。图 4 展示了 2009—2019 年洞庭湖平原化肥施用强度空间分布状况。利用 ArcGIS 软件采用相等间隔法将洞庭湖平原化肥施用强度分为 6 个等级:高施用强度(>4 000 kg/hm^2)、较高施用强度(3 500～4 000 kg/hm^2)、中高施用强度(3 000～3 500 kg/hm^2)、中低施用强度(2 500～3 000 kg/hm^2)、较低施用强度(2 000～2 500 kg/hm^2)和低施用强度(<2 000 kg/hm^2)。随着时间的推移,大多数县(区、市)的化肥施用强度呈现出下降趋势,如化肥高施用强度区由 2009 年的 2 个(武陵区、资阳区)减至 2019 年的 0 个。洞庭湖平原中部化肥施用强度最高且呈现聚集的态势,东部其次,西部最低。具体来看,桃源县和岳阳楼区一直保持着低施用

强度。2009 年，化肥施用高强度区为武陵区、资阳区，分别达 4 429.07 和 4 503.5 kg/hm²，主要原因是武陵区与资阳区人均耕地少，粮食生产压力较大，为了提高粮食产量和增加农业收入，农户往往大量施用化肥，故而导致化肥施用强度偏高。2014 年，安乡、南县的化肥施用强度也超过 4 000 kg/hm²，成为高强度区，武陵区降为较高强度区。2019 年，洞庭湖平原不存在化肥施用高强度区和较高强度，低施用强度和较低施用强度的县（区、市）数量增加，化肥施用中高强度区主要分布在洞庭湖平原的中北部，且呈现聚集的态势，可见湖南省化肥施用量零增长行动已初见成效。

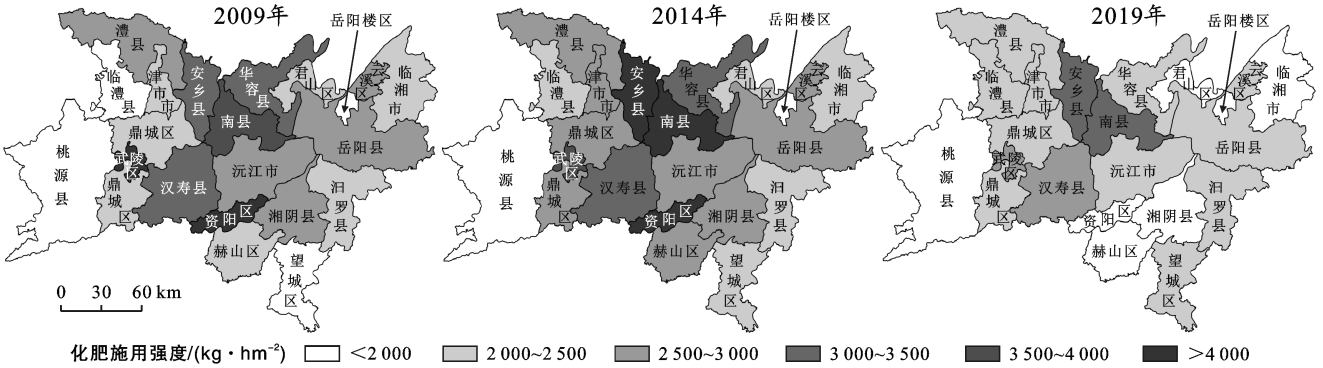

图 4 洞庭湖平原 2009—2019 年化肥施用强度空间分布状况

图 5 展示了 2009—2019 年洞庭湖平原农药施用强度空间分布状况。利用 ArcGIS 软件采用相等间隔法将洞庭湖平原农药施用强度分为 6 个等级：高施用强度（>75 kg/hm²）、较高施用强度（60～75 kg/hm²）、中高施用强度（45～60 kg/hm²）、中低施用强度（30～45 kg/hm²）、较低施用强度（15～30 kg/hm²）和低施用强度（<15 kg/hm²）。

总体来看，农药施用高强度区大多分布在东南部，西部仅武陵区施用强度高。具体来看，桃源县和安乡县一直保持为低施用强度区，可能原因是桃源县是湖区最大的肉牛养殖县之一，安乡县是重要的水产品基地县之一，为了提高养殖品质，减少了农药施用量。2009 年，农药施用高强度区为华容县、武陵区、资阳区和汨罗市，武陵区农药施用强度高达 96.43 kg/hm²，是农药施用强度最低县（临澧县 7.84 kg/hm²）的12.30 倍，洞庭湖平原西部地区整体施用强度较低。2014 年，湘阴县农药施用强度也超过 75 kg/hm²，也成为高施用强度区，西部地区和东北部地区施用强度较低。2019 年，农药施用高强度区全部清零，中施用强度与低施用强度的地区明显增多，洞庭湖平原县际间的农药施用强度差异在不断缩小，农药施用强度较高的区域仍分布在东南部，西部施用强度较低，可见湖南省农药施用量零增长行动已初见成效。

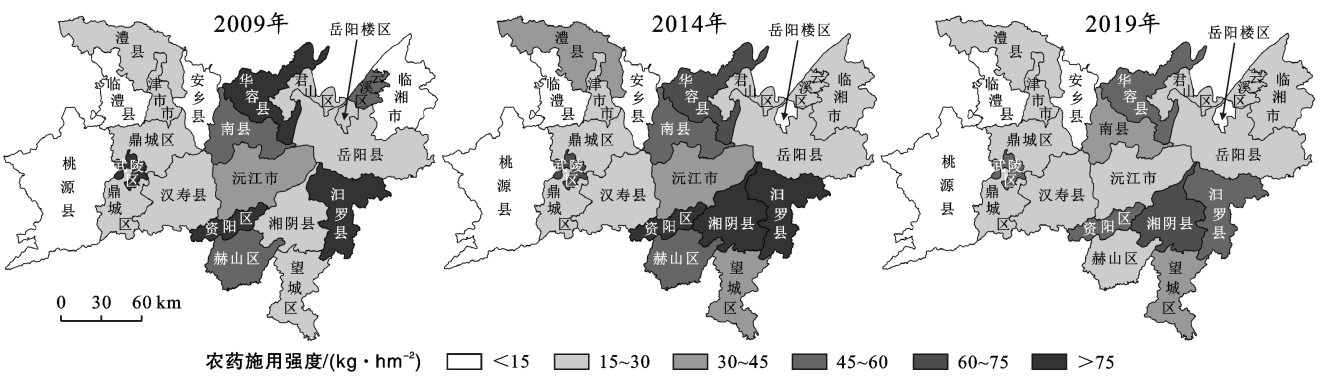

图 5 洞庭湖平原 2009—2019 年农药施用强度空间分布状况

3.2 洞庭湖平原农业生产时空特征

3.2.1 洞庭湖平原粮食产量时间规律 为了保证年际间的数据可比性，本文采用粮食产量来刻画洞庭湖平原农业生产状况。图 6 反映了 2009—2019 年洞庭

湖平原粮食总产量和粮食单产(即单位耕地面积的粮食产量)的变化状况。

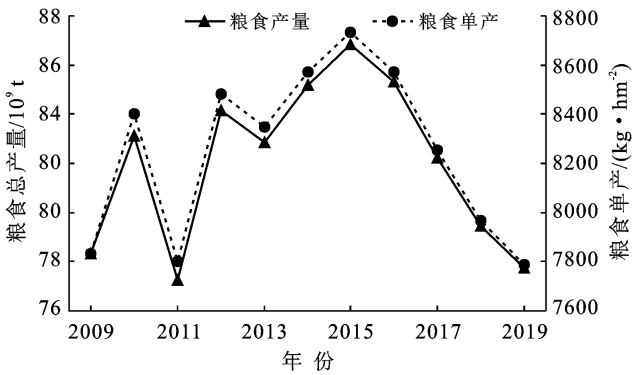

图 6　洞庭湖平原 2009—2019 年粮食总产量及粮食单产变化

近 10 a 以来,洞庭湖平原粮食总产量前期波动较大,但总体上呈现出倒 U 形趋势,2009 年洞庭湖平原粮食总产量为 7.83×10^{10} t,2010 年达到一个小高峰(8.31×10^{10} t),2011 年降至最低谷(7.72×10^{10} t),2015 年粮食总产量达到最高峰(8.68×10^{10} t),随后逐年下降,2019 年降至 7.77×10^{10} t,10 a 间洞庭湖平原粮食共减产 0.7%,其中 2015—2019 年年均减产 2.7%。洞庭湖平原粮食单产的变化趋势与粮食总产量一致,前期波动较大,但总体上呈现出倒 U 形趋势。2009 年洞庭湖平原粮食单产为 7.83×10^3 kg/hm^2,2010 年达到一个小高峰(8.40×10^3 kg/hm^2),2011 年降至 7.80×10^3 kg/hm^2,2015 年粮食单产达到最高峰(8.73×10^3 kg/hm^2),随后逐年下降,2019 年降至 7.79×10^3 kg/hm^2。2009—2019 年粮食单产总的变化率很小,但在 2015—2019 年粮食单产年均下降 2.8%,其原因之一是化肥施用量和农药施用量的减少带来粮食单产下降,但洞庭湖平原耕地面源污染总体得到好转。

3.2.2　*洞庭湖平原粮食单产空间分布特征*　图 7 展示了 2009—2019 年洞庭湖平原粮食单产空间分布状况。利用 ArcGIS 软件采用相等间隔法将洞庭湖平原粮食单产分为 6 个等级:高单产(>10 000 kg/hm^2)、较高单产(9 000～10 000 kg/hm^2)、中高单产(8 000～9 000 kg /hm^2)、中低单产(7 000～8 000 kg/hm^2)、较低单产(6 000～7 000 kg/hm^2)和低单产(<6 000 kg/hm^2)。洞庭湖平原粮食单产在区域上总体上表现出"先升后降"的趋势,湘阴县一直保持为最高的粮食单产,而沅江市是洞庭湖平原粮食单产的洼地。2009 年,湘阴县粮食单产突破 10 000 kg/hm^2,率先成为高单产区,君山区、云溪区属于低单产区。2014 年,岳阳县、望城区、赫山区、资阳区、武陵区均上升为高单产量区,高单产区数量明显增多,但君山区、云溪区仍为低单产区,且安乡县由较低单产区降为低单产区,洞庭湖平原内粮食单产差距拉大。2019 年,高单产区降为 1 个(湘阴县),较高单产区居多,君山区、云溪区仍为低单产区,岳阳楼区降为低单产区,其原因可能是这 3 个地区均为岳阳市的市辖区,城市化水平较高,不太重视农业生产。总体来看,洞庭湖平原粮食单产整体呈现出"东高西低"的空间分布格局。

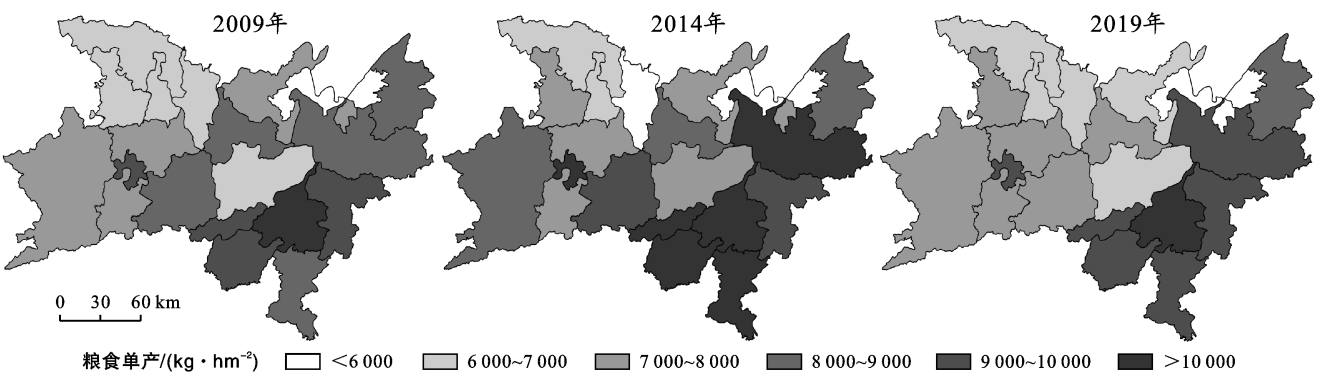

图 7　洞庭湖平原 2009—2019 年粮食单产空间分布状况

3.3　洞庭湖平原农业生产与耕地面源污染的脱钩效应

3.3.1　*洞庭湖平原农业生产与耕地面源污染的脱钩效应的时间规律*　本文采用粮食单产和化肥农药施用强度的脱钩关系来刻画洞庭湖平原农业生产与耕地面源污染的脱钩关系。表 2 反映了 2009—2019 年洞庭湖平原粮食单产与化肥农药施用强度的脱钩状态。粮食单产分别与化肥施用强度、农药施用强度、化肥农药总施用强度三者间的脱钩状态趋势大致一致。2009—2013 年,洞庭湖平原粮食单产一直处于正增长和负增长之间反复波动,尚未形成稳定态势;在 2014—2015 年经过了粮食单产出现短期增长后,于 2016 年开始呈现年度连续下降趋势。化肥及农药的施用强度与粮食单产存在着明显关联,2009—2010,2012 和 2016—2019 年这些年份同期增长或减少态势。

由表 2 可知,只有在个别年份(2010,2012,2014,

2015 年),粮食单产与化肥、农药施用强度的脱钩关系是理想(强脱钩)或比较理想(弱脱钩)的;而其他年份,粮食单产与化肥农药施用强度的脱钩关系是非理想的、消极的。鉴于粮食单产与化肥施用强度、农药施用强度、化肥农药总施用强度三者的脱钩关系有较高的相似性,故本文仅从粮食单产与化肥农药总施用强度的脱钩关系来揭示洞庭湖平原农业生产与耕地面源污染的脱钩状况变化规律。

表 2 洞庭湖平原 2009—2019 年粮食单产与化肥农药施用强度的脱钩状态

年份	粮食单产变化率/%	与化肥施用强度的脱钩关系			与农药使用强度的脱钩关系			与化肥农药总施用强度的脱钩关系		
		化肥施用强度变化率/%	脱钩系数	脱钩状态	农药使用强度变化率/%	脱钩系数	脱钩状态	化肥农药总施用强度变化率/%	脱钩系数	脱钩状态
2009	−6.31	−5.88	0.93	弱负脱钩	−7.99	1.26	衰退性脱钩	−5.91	0.94	弱负脱钩
2010	7.26	2.94	0.41	弱脱钩	3.21	0.44	弱脱钩	2.95	0.41	弱脱钩
2011	−7.10	1.69	−0.24	强负脱钩	3.99	−0.56	强负脱钩	1.72	−0.24	强负脱钩
2012	8.67	0.09	0.01	弱脱钩	2.63	0.30	弱脱钩	0.12	0.01	弱脱钩
2013	−1.57	1.50	−0.95	强负脱钩	2.76	−1.76	强负脱钩	1.51	−0.96	强负脱钩
2014	2.68	−0.93	−0.35	强脱钩	0.26	0.09	弱脱钩	−0.92	−0.34	强脱钩
2015	1.89	−1.85	−0.98	强脱钩	−3.78	−2.00	强脱钩	−1.87	−0.99	强脱钩
2016	−1.86	−1.41	0.76	弱负脱钩	−6.02	3.24	衰退性脱钩	−1.48	0.79	弱负脱钩
2017	−3.71	−1.76	0.47	弱负脱钩	−6.44	1.74	衰退性脱钩	−1.82	0.49	弱负脱钩
2018	−3.44	−3.19	0.93	弱负脱钩	−3.00	0.87	弱负脱钩	−3.19	0.93	弱负脱钩
2019	−2.27	−13.01	5.73	衰退性脱钩	−17.49	7.71	衰退性脱钩	−13.06	5.76	衰退性脱钩

粮食单产与化肥农药总施用强度的脱钩关系呈现出明显的阶段性特点,可分为 3 个阶段:第一阶段为波动期(2009—2013 年)。这时期粮食单产与化肥农药总施用强度两者呈现出“弱负脱钩—弱脱钩—强负脱钩—弱脱钩—强负脱钩”的动态变化状态,这时期除 2009 年外化肥农药总施用强度一直在持续稳定增加,故两者的脱钩关系的变化状态主要取决于粮食单产的反复波动,受亚热带季风气候等外在不可控因素和农户生产经营管理与对抗自然灾害能力差异的影响,洞庭湖平原耕地粮食产量出现年度波动。第二阶段为强脱钩期(2014—2015 年)。这时期粮食单产与化肥农药总施用强度的脱钩关系呈现出短期稳定强脱钩状态,即粮食单产增长的同时化肥农药施用强度降低,这是一种最理想的状态。其主要原因可能是 2014 年国务院批复设立洞庭湖生态经济区,开始注重洞庭湖特色新型农业现代化绿色发展道路。第三阶段为弱负脱钩和衰退脱钩期(2016—2019 年)。受“十三五”期间“实施化肥农药使用量零增长行动”的政策影响,化肥农药施用呈现稳定下降趋势,但由于洞庭湖平原粮食增产长期依赖于高强度的化肥农药施用量,使得长期面源污染的控制以粮食减产代价。其中,2016—2018 年粮食单产减产幅度大于化肥农药施用强度降低幅度,2019 年粮食单产减产幅度小于化肥农药施用强度降低幅度,有向好的发展趋势。因此,未来应继续重视洞庭湖平原的耕地面源污染治理,但同时应设法采取有力措施提高粮食单产,以期实现打赢耕地面源污染治理攻坚战与实现粮食稳定增产的双赢,确保国家粮食安全和生态安全。

3.3.2 *洞庭湖平原农业生产与耕地面源污染的脱钩效应的空间分布特征* 图 8 展示了 2009—2019 年洞庭湖平原农业生产与耕地面源污染的脱钩关系的空间分布状况。近 10 a 以来,洞庭湖平原各县(区、市)的农业生产与耕地面源污染的脱钩关系发生了较大的变化。2009 年,洞庭湖平原各县(区、市)农业生产与耕地面源污染的脱钩关系在空间上具有较大的差异性,脱钩与负脱钩的现象并存。具体来看,澧县的农业生产与耕地面源污染率先达到强脱钩状态,武陵区与沅江市也达到弱脱钩状态;呈弱负脱钩和衰退性脱钩状态的县(区、市)数量分别为 10 个和 7 个,比例达 47.6%和 33.3%;呈强负脱钩和扩张性负脱钩状态的县(区、市)各有 1 个。2014 年,实现强脱钩或弱脱钩状态的县(区、市)数量明显增多,其中 52.4%(11 个)的县(区、市)实现了强脱钩的理想状态,38.1%(8 个)的县(区、市)实现了弱脱钩的较理想状态,但湘阴县、津市市、安乡县呈衰退性脱钩状态,是耕地面源污染治理攻坚战中难啃的硬骨头。然而,2019 年,仅有君山区、云溪区由 2014 年的弱脱钩状态提升至强脱钩状态,实现了最理想脱钩状态;61.9%(13 个)的县(区、市)农业生产与耕地面源污染的关系转变为衰退性脱钩状态,赫山区为强负脱钩状态,其余 23.8%(5 个)的县(区、市)皆为弱负脱钩状态。总体上来看,洞庭湖平原农业生产与耕地面源污染的脱钩关系在县级空间尺度上由过去的无序状态逐渐转变为较高的趋同性和聚集特征。

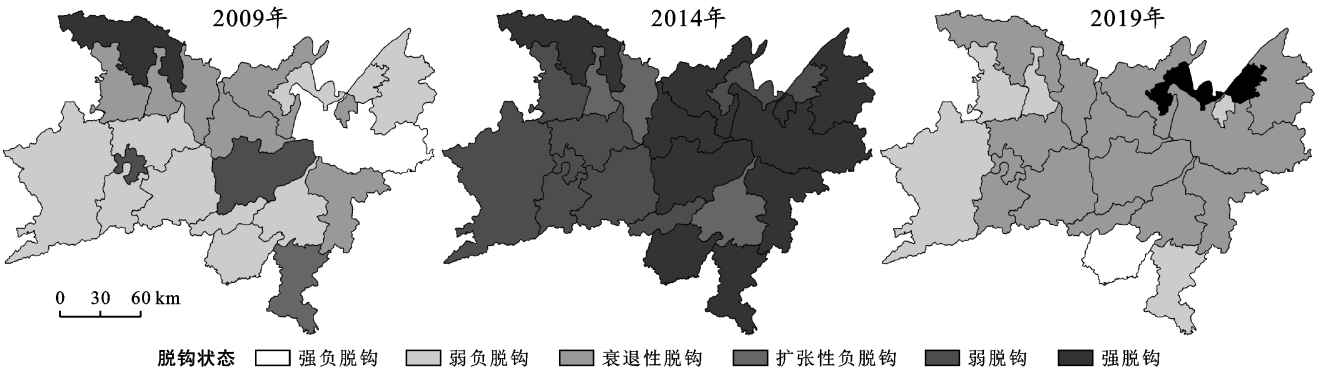

图 8　洞庭湖平原 2009—2019 年耕地面源污染与农业生产的脱钩效应的空间分布状况

4　结论与建议

4.1　结 论

(1) 洞庭湖平原耕地面源污染状况有所减轻,并呈现出聚集特征。2009—2019 年,化肥施用强度和农药施用强度均呈现“先升后降”的变化趋势,特别是从 2015 年开始,化肥施用强度和农药施用强度持续稳定下降;化肥生产率和农药生产率总体上也都呈现出上升趋势。

(2) 洞庭湖平原耕地面源污染表现出明显的空间差异性。耕地面源污染表征指标化肥施用强度和农药施用强度表现出不同的空间分布特征,具体表现为:化肥施用中高强度区主要分布在洞庭湖平原的中北部,且呈现聚集的态势,四周的施用强度相对较低;而农药施用强度较高的区域则分布在洞庭湖平原的东南部,西部施用强度较低。

(3) 洞庭湖平原粮食单产呈现出“倒 U”形趋势,且具有明显的空间差异性。洞庭湖平原粮食单产由 2009 年的 7.83×10^3 kg/hm^2 波动增至 2015 年的 8.73×10^3 kg/hm^2,随后逐年下降,2019 年降至 7.79×10^3 kg/hm^2。此外,洞庭湖平原粮食单产整体呈现出“东高西低”的空间分布格局。

(4) 受国家政策等因素的影响,洞庭湖平原农业生产与耕地面源污染的脱钩关系呈现出明显的阶段性特征,且各县(区、市)农业生产与耕地面源污染的脱钩关系在空间上逐渐呈现出较高的趋同性和聚集特征。2009 年洞庭湖平原各县(区、市)农业生产与耕地面源污染的脱钩关系在空间上具有较大的差异性,脱钩与负脱钩的现象并存;至 2019 年,洞庭湖平原农业生产与耕地面源污染的脱钩关系在县级空间尺度上逐渐呈现出较高的趋同性和聚集特征。

4.2　对策建议

(1) 进一步加强耕地面源污染源头防治。耕地面源污染源头防治,即主要是减施化肥和农药,提高化肥农药利用率,特别要强化洞庭湖平原中北部化肥减施力度和东南部农药减施力度,降低粮食增产对化肥农药施用量的过度依赖性,建立健全预警机制。农户是当前中国乃至很长第一段时期内最主要的经营主体,故而应采取适当举措增强农户维护耕地生态健康,进行绿色生产的意识,同时要保障农户的利益不受损,收入不降低,可通过建立耕地面源污染治理生态补偿机制激励农户积极参与耕地面源污染治理,提高耕地利用生态效率。

(2) 多举措提高粮食单产。在减施化肥农药的情况下,若不采取相关替代措施势必影响粮食产量,可采取以下举措来提高粮食单产:①全域特别是化肥施用强度偏高的洞庭湖平原中北部需全面推广测土配方施肥技术进行精准施肥以避免过度施肥;②可以通过种植绿肥、增施有机肥的方式来提高土壤肥力,改善耕地生态健康状况;③可以采取物理、生物防虫技术以减少农药的喷洒,尤其是在洞庭湖平原的东南部区域;④大力实施农地综合整治,积极推进中低产田改良工程、高标准基本农田建设,增加有效耕地面积,提高耕地质量,增强农业抵御自然灾害的能力,改善农业生产条件,以提升农田粮食综合生产能力。

4.3　讨 论

粮食产量高低不仅受到资本投入要素(化肥施用量、农药施用量等)的影响,还与作物种类、气候条件、土壤质量、水文条件、宏观政策等因素有关。洞庭湖平原主要种植水稻,各县(区、市)气候条件相近,土壤质量相近,水文条件也相近,因此,本文在探讨农业生产与耕地面源污染脱钩关系时不再考虑自然条件的影响;在洞庭湖平原,宏观政策以及农业产业定位极为相近,故也不再考虑政策的影响。

脱钩模型现已广泛应用于研究经济发展与环境消耗之间的关系,得到了广泛的认可。故此,本文利用此模型来探讨洞庭湖平原农业生产与耕地面源污

染的关系状态，以期实现最小的化肥农药投入量获得农业高产出，达到提高化肥农药利用率，减轻耕地面源污染程度，提高耕地利用效率的效果。

[参 考 文 献]

[1] 邓晴晴，李二玲，任世鑫.农业集聚对农业面源污染的影响：基于中国地级市面板数据门槛效应分析[J].地理研究，2020，39(4)：970-989.

[2] 贾陈忠，乔扬源.基于等标污染负荷法的山西省农业面源污染特征研究[J].中国农业资源与区划，2021，42(3)：141-149.

[3] Guignet D. The impacts of pollution and exposure pathways on home values：A stated preference analysis [J]. Ecologica Economics，2012，82：53-63.

[4] 闵继胜，孔祥智.我国农业面源污染问题的研究进展[J].华中农业大学学报(社会科学版)，2016(2)：59-66，136.

[5] Beharry B N，Smart J C R，Termansen M，et al. Evaluating farmers' likely participation in a payment programme for water quality protection in the UK uplands [J]. Regional Environmental Change，2013，13(3)：633-647.

[6] Huiliang Wang，Peng He，Chenyang Shen，et al. Effect of irrigation amount and fertilization on agriculture nonpoint source pollution in the paddy field [J]. Environmental Science and Pollution Research，2019，26(10)：10363-10373.

[7] Jabbar F K，Grote K. Statistical assessment of nonpoint source pollution in agricultural watersheds in the lower Grand River watershed，MO，USA [J]. Environmental Science and Pollution Research，2019，26(2)：1487-1506.

[8] Yuan Chengcheng，Liu Liming，Ye Jinwei，et al. Assessing the effects of rural livelihood transition on non-point source pollution：A coupled ABM-IECM model [J]. Environmental Science and Pollution Research，2017，24(14)：12899-12917.

[9] 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.

[10] 梁流涛，冯淑怡，曲福田.农业面源污染形成机制：理论与实证[J].中国人口·资源与环境，2010，20(4)：74-80.

[11] 武淑霞，刘宏斌，刘申，等.农业面源污染现状及防控技术[J].中国工程科学，2018，20(5)：23-30.

[12] 刘钦普，濮励杰.中国粮食主产区化肥施用时空特征及生态经济合理性分析[J].农业工程学报，2019，35(23)：142-150.

[13] 丘雯文，钟涨宝，原春辉，等.中国农业面源污染排放的空间差异及其动态演变[J].中国农业大学学报，2018，23(1)：152-163.

[14] 卢少勇，张萍，潘成荣，等.洞庭湖农业面源污染排放特征及控制对策研究[J].中国环境科学，2017，37(6)：2278-2286.

[15] 张郁，刘洁，杨青山.黑龙江垦区农业生产与面源污染的脱钩分析与调控模拟[J].经济地理，2017，37(6)：177-182.

[16] 杨建辉.农业化学投入与农业经济增长脱钩关系研究：基于华东6省1市数据[J].自然资源学报，2017，32(9)：1517-1527.

[17] 彭甲超，肖建忠，李纲，等.长江经济带农业废水面源污染与农业经济增长的脱钩关系[J].中国环境科学，2020，40(6)：2770-2784.

[18] 林日彭，倪兆奎，郭舒琨，等.近25年洞庭湖水质演变趋势及下降风险[J].中国环境科学，2018，38(12)：4636-4643.

[19] 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.

[20] 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.