中国生态农业学报(中英文)
Chinese Journal of Eco-Agriculture
中文核心期刊
中国科技核心期刊
中国精品科技期刊
百种中国杰出学术期刊
中国科学引文数据库源刊

中国省域化肥面源污染时空格局演变与分组预测

雷俊华，苏时鹏，余文梦，孙小霞

引用本文:
雷俊华, 苏时鹏, 余文梦, 等. 中国省域化肥面源污染时空格局演变与分组预测[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(7): 1079–1092.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190923

(向下翻页，阅读全文)

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

省域农用地猪粪负荷强度时空演变分析

Temporal and spatial changes in pig manure load in agricultural lands in China

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(3): 494–506 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.180709

四川省化肥面源污染环境风险评估及趋势模拟

Environmental risk assessment and trend simulation of non–point source pollution of chemical fertilization in Sichuan Province, China

中国生态农业学报. 2018, 26(11): 1739–1751 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.180244

台湾地区农业面源污染的环境库兹涅茨曲线验证与分析

Authentication and analysis of Environmental Kuznets curve for agricultural non–point source pollution in Taiwan Region

中国生态农业学报. 2015(11): 1455–1462 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.150365

2000—2016年四川省耕地种植指数时空变化及其自然潜力分析

Spatio–temporal evolution and potential analysis of cropping index in Sichuan Province during 2000–2016

中国生态农业学报. 2018, 26(8): 1206–1216 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.171086

延安市退耕还林(草)工程对生境质量时空格局的影响

Impact of the ‘Grain for Green’ project on the spatial and temporal pattern of habitat quality in Yan’an City, China

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(4): 575–586 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190762

中国生态农业学报(中英文) 2020 年 7 月 第 28 卷 第 7 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Jul. 2020, 28(7): 1079−1092

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.190923

雷俊华, 苏时鹏, 余文梦, 孙小霞. 中国省域化肥面源污染时空格局演变与分组预测[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(7): 1079−1092
LEI J H, SU S P, YU W M, SUN X X. Temporal and spatial pattern evolution and grouping prediction of non-point source pollution of chemical fertilizers in China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(7): 1079−1092

中国省域化肥面源污染时空格局演变与分组预测*

雷俊华[1], 苏时鹏[1], 余文梦[2], 孙小霞[1**]

(1. 福建农林大学农村区域竞争力研究中心 福州 350002; 2. 中国人民大学环境学院 北京 100872)

摘 要: 减少化肥面源污染的同时保持农业产值持续增长是实现农业产业生态化和农业高质量发展的必然要求。中国各省均制定并实施了化肥零增长行动计划, 但进展和成效并不一致, 并可能相互影响。论文运用化肥流失系数法对中国 1997—2018 年 31 个省(市、自治区)化肥面源污染排放强度进行核算, 再运用空间自相关和热点分析对其进行时空格局演变分析, 揭示化肥面源污染的时空演变规律, 探讨区域间的相互影响。根据时空格局特征将全国分为热点区、冷点区和非热(冷)点区, 在考虑相邻省份间空间异质性和相关性的条件下, 分组模拟和预测化肥面源污染排放强度与人均农业产值间的环境库兹涅茨曲线(EKC)时间路径。结果表明: 1)化肥面源污染排放强度省际差异较大, 表现为空间正自相关, 呈集聚模式。热点分析显示, 化肥面源污染时空格局相对稳定, 热点区主要集中在中南部, 长江中下游地区尤其显著, 黄淮海地区近年热点程度下降较明显; 冷点区主要集中在西部地区和黑龙江。2)基于时空格局分组的环境库兹涅茨曲线(EKC)趋势模拟表明, 各组均存在显著的非线性 EKC 关系但趋势和拐点差异明显, 热点区为“倒 U 型”, 冷点区和非热(冷)点区为“倒 N 型”, 多数省份正处于曲线上升阶段且距拐点较远。3)产业结构的调整和转移促使区域间存在化肥面源污染空间溢出效应, 要从整体上把握区域间的协同治理。根据研究结果, 提出热点区应研发推广适用施肥设备, 提高化肥利用率; 冷点区应保护性耕作, 增施有机肥; 非热(冷)点区应合理调整农业产业结构, 注重种养循环。区域间则应当通过生态补偿、排污权交易等方式实现协同治理。

关键词: 化肥面源污染; 时空格局演变; 空间相关性; 环境库兹涅茨曲线(EKC); 分组预测

中图分类号: S19 开放科学码(资源服务)标识码(OSID):

Temporal and spatial pattern evolution and grouping prediction of non-point source pollution of chemical fertilizers in China*

LEI Junhua[1], SU Shipeng[1], YU Wenmeng[2], SUN Xiaoxia[1**]

(1. Research Center for Rural Regional Competitiveness, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 2. School of Environment & Natural Resources, Renmin University of China, Beijing 100872, China)

Abstract: Reducing pollution caused by chemical fertilizers while continuously increasing the output value of agriculture at the same time is an inevitable requirement to improve high quality development of agriculture. Actions aimed at achieving zero growth in

* 教育部人文社科项目(15YJCZH153)、国家自然科学基金项目(71273051)和福建省社科规划重大项目(FJ2017Z003)资助
** 通信作者: 孙小霞, 主要研究方向为农业生态管理。E-mail: joesxiaox@163.com
雷俊华, 主要研究方向为自然资源与环境管理。E-mail: junhuaray@163.com
收稿日期: 2019-12-29 接受日期: 2020-03-25
* The study was supported by the Humanities and Social Science Project of the Ministry of Education of China (15YJCZH153), the National Natural Science Foundation of China (71273051) and the Social Science Planning Major Project of Fujian Province (FJ2017Z003).
** Corresponding author, E-mail: joesxiaox@163.com
Received Dec. 29, 2019; accepted Mar. 25, 2020

chemical fertilizer use have been formulated and implemented in provinces across China. However, inconsistencies in progress and effectiveness among provinces may affect each other. The fertilizer loss coefficient method was used to calculate the emission intensity of non-point source pollution in 31 provinces across the Chinese mainland from 1997 to 2018. Spatial autocorrelation and hotspot analysis methods, based on the calculated emission intensity, were used to reveal the emission intensity temporal and spatial characteristics, and to analyze the interaction effect on neighboring provinces. According to these characteristics, the country was grouped into three regions: a hot spot region, a cold spot region, and a non-hot (cold) spot region. Then, the Environmental Kuznets Curve (EKC) trend between the non-point source pollution emission intensity of fertilizers and the per capita agricultural output value in each group was simulated and predicted under spatial heterogeneity and spatial correlation conditions. The results showed that the emission intensity varied considerably among provinces across the country. The emission intensity was spatially positively autocorrelated across the country with a cluster mode. A hot spot analysis showed that the spatiotemporal pattern for non-point source pollution caused by fertilizers was relatively stable. The hot spot region was mainly concentrated in the central and southern parts of China, especially in the middle and lower reaches of the Yangtze River. However, in recent years, the number of hotspots in the Huanghuaihai region had significantly decreased. The cold spot region was mainly concentrated in the western region and Heilongjiang Province. The EKC trend simulation, based on temporal and spatial pattern feature grouping, showed that there was a significant nonlinear EKC relationship between agricultural economic growth and chemical fertilizer non-point source pollution in each group. However, the trend and the inflection point of each curve were clearly different. The hot spot region appeared as an "inverted U-type" curve, but both the cold spot region and the non-hot (cold) spot region had "inverted N-type" curves. Most provinces in each region were in the ascending phase of the curves. Industrial structure adjustment and industrial transfer promoted the spatial spillover effect of fertilizer derived non-point source pollution among the regions. Therefore, coordinated governance among regions needs to be introduced. Based on the above results, we propose that there should be corresponding policy implications, and that suitable fertilization equipment should be developed and promoted to increase fertilizer utilization in the hot spot region. Conservation farming should be applied and the use of organic fertilizer promoted in the cold spot region. The non-hot (cold) spot region should reasonably adjust the structure of its agricultural industry and focus on the crop-livestock and poultry farming cycle. Ecological compensation and emissions trading should be implemented to achieve collaborative governance.

Keywords: Fertilizer non-point source pollution; Spatio-temporal pattern evolution; Spatial correlation; Environmental Kuznets Curve (EKC); Group prediction

化肥既是重要的农业生产要素，又是导致农业面源污染的主要因素之一。中国化肥施用强度较大，利用效率总体较低[1]，对粮食增产的边际贡献率不断下降[2]，单位耕地面积化肥施用量远超国际安全使用水平[3]，严重威胁到中国农业经济的可持续发展[4-5]。过量的化肥投入不仅增加了农业生产的经济成本，还带来了严重的生态环境负担[6]。探讨农业发展与化肥面源污染之间时空演化关系，可以更好地推动化肥零增长行动，促进中国农业高质量绿色发展。

环境库兹涅茨曲线(Environment Kuznets Curve, EKC)是经济增长与环境关系实证研究的重要理论。Grossman 等[7]提出环境与经济之间可能存在类似库兹涅茨曲线的"倒 U 型"关系。Antle 等[8]和 McConnell[9]较早探讨了农业面源污染与经济发展间的关系，认为农业面源污染也有 EKC 的变化特征。相关研究表明，农业面源污染 EKC 可能呈现为"倒 U 型"[10-12]、"U 型"[13-15]、"N 型"或"倒 N 型"[16-18]以及线性增长[19-20]等多种演变趋势。然而，以上研究存在两方面的不足：1)用化肥投入量来表征农业面源污染，忽视了农业面源污染是化肥施用后，流失的养分进入水体才构成污染的事实[21]，从而无法反映化肥面源污染实际状况。2)基于同质性假设，只关注国家或地区的整体状况，忽略了区域间异质性的影响。各地区经济发展水平、地理环境、资源禀赋、劳动力水平等差异都可能对当地农业面源污染带来不同影响[22]，使得基于同质性假设的 EKC 拟合结果不符合区域特质。部分研究按照东、中、西部分组[23]、省份单独检验[24]、数理方法选取分类变量[22]等方式进行分组 EKC 拟合，试图克服同质性问题。然而，东、中、西部的划分方法不能合理反映化肥面源污染的地区特质[25]，而各省份分别检验的方法则忽视了面源污染在区域间的流动性和分散性[26]，以及省份间产业流动和劳动力转移等因素导致的空间上的相关性，进而影响估计结果的准确性。数理方法分组虽有利于运用数据的内生特性优势，但指标选取往往具有主观性且假定一个区域的环境污染与相邻区域在地理空间上不存在空间相关性[18]，从而可能使拟合结果与实际情况产生偏差。

本文利用全国 1997—2018 年的省际面板数据，首先对各省化肥面源污染排放强度进行核算，更加

准确地反映各省历年化肥面源污染状况。在此基础上，利用 ArcGIS 空间统计模型对其进行空间自相关分析和热点分析，综合时空格局演变分析结果对各省份进行分组。此种分组方式既考虑了不同区域化肥面源污染的实际情况，又考虑了区域的空间相关性，更加符合各区域的实际。基于分组，拟合各组化肥面源污染排放强度与人均农业生产总值之间 EKC 关系的时间路径，考察空间异质性条件下各组时间路径的差异性，最后对时间路径的未来演变趋势进行预测，试图为化肥减量化和农业面源污染防治工作提供一定参考。

1　研究方法与数据来源

1.1　研究方法

1.1.1　面源污染排放强度核算

当前相关研究多采用单元调查评估方法[27-28]和清单分析法[29]进行大尺度区域的化肥面源污染核算，然而此类方法没有考虑土地类型、自然条件(如气候)等因素的差异对化肥流失产生的异质性影响，利用化肥施用强度和施用比例确定的化肥流失率也可能导致估计结果不够准确[30]。因此，本文在单元调查评估法和清单分析法的基础上，结合流失系数法进行化肥面源污染的核算。参考《第一次全国污染源普查—农业污染源—肥料流失系数手册》的 6 大分区，综合考虑各省气候、地形、土壤等主要影响因素，将全国化肥面源污染源分为 6 个区域类别，各类别的流失系数主要运用“一污普”后发布的《农业污染源肥料流失系数手册》中各区域各模式流失系数的均值，并通过广泛的文献调研对各类区域的流失系数进行确认和校正，以使流失系数更符合各区域的实际情况，保证流失系数的科学性和准确性，流失系数见表 1。

本文核算的化肥面源污染单元为磷肥、氮肥与复合肥。污染物指标采用总氮(TN)、硝氮(NO_3^--N)、氨氮(NH_4^+-N)、总磷(TP)和可溶性总磷(DTP)[31]。运用化肥流失系数法，核算氮的总排放量和磷的总排放量，进而核算化肥面源污染排放总量及强度。计算公式为:

表 1　中国 31 省(市、自治区)化肥流失情况分区表
Table1　Fertilizer loss rate in different regions of China

区域类别 Regional category	省(市、自治区) Province (city, autonomous region)	流失系数(η) Loss coefficient (%)				
		总氮 Total N	总磷 Total P	硝态氮 NO_3^--N	氨态氮 NH_4^+-N	可溶性总磷 Dissolved total phosphorus
Ⅰ	云南、广西、福建、江西、广东、重庆、四川、贵州、海南 Yunnan, Guangxi, Fujian, Jiangxi, Guangdong, Chongqing, Sichuan, Guizhou, Hainan	0.868	0.497	0.239	0.149	0.086
Ⅱ	北京、天津、山东、河北、河南 Beijing, Tianjin, Shandong, Hebei, Henan	1.173	0.199	0.489	0.122	0.041
Ⅲ	湖南、湖北、浙江、上海、安徽、江苏 Hunan, Hubei, Zhejiang, Shanghai, Anhui, Jiangsu	1.536	0.410	0.867	0.147	0.147
Ⅳ	山西、陕西、宁夏 Shanxi, Shaanxi, Ningxia	0.293	0.215	0.05	0.041	0.039
Ⅴ	黑龙江、吉林、辽宁 Heilongjiang, Jilin, Liaoning	0.422	0.096	0.133	0.054	0.012
Ⅵ	内蒙古、甘肃、新疆、青海、西藏 Inner Mongolia, Gansu, Xinjiang, Qinghai, Tibet	0.511	0.108	0.184	0.025	0

$$E = \sum E_{ij} = \sum C_i \times \eta_{ij} \tag{1}$$

$$I = E/A \tag{2}$$

式中: E 为化肥面源污染总排放量; E_{ij} 为污染单元 i 产生并流失进入水体的第 j 种污染物的量; C_i 是污染单元 i 的指标统计数(氮肥的统计数为 N 的量，磷肥统计数为 P_2O_5 的量，复合肥按 32%折算 P_2O_5 的量，按 40%折算 TN 的量[32]); η_{ij} 为污染单元 i 中第 j 种污染物的流失系数; A 为各省农作物播种面积[22,27]; I(kg·hm^{-2})为单位面积的污染排放量，即化肥面源污染排放强度。

1.1.2　空间统计模型

1)全局空间自相关。化肥面源污染排放强度在全局空间上的相关程度用 Global Moran's I 测度，其含义是空间相邻省份的化肥面源污染排放强度在整体区域内空间相关的总体趋势[33]。在给定的显著水平下，若 Moran's I 值为负，则污染排放强度呈显著的空间离散趋势；若 Moran's I 值为正，则污染排放强度呈显著的空间集聚趋势[34]。Global Moran's I 的计算公式为:

$$I = \frac{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} W_{ij}(X_i - \bar{X})(X_j - \bar{X})}{S^2 \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} W_{ij}} \tag{3}$$

式中: n 为省份个数，W_{ij} 为空间权重矩阵(两省相邻

为 1，不相邻为 0)，X_i 和 X_j 为 i 省和 j 省的观测值，$\overline{X}$ 为观测值的平均值，S^2 为观测值的方差。

2)局部空间自相关。局部自相关特征用热点分析的 G_i^* 指数进行测算，用于识别区域内的冷点区和热点区。若 G_i^* 指数显著为正，则 i 省周围污染排放强度相对较高，属于热点区；若 G_i^* 指数显著为负，则 i 省周围污染排放强度相对较低，属于冷点区；若 G_i^* 指数不显著，则 i 省不是热(冷)点区。计算公式为：

$$G_i^*(d)=\sum_{j=1}^{n}W_{ij}(d)X_j\Big/\sum_{j=1}^{n}X_j \tag{4}$$

式中：$W_{ij}(d)$是根据距离规则定义的空间权重。

1.1.3 EKC 模型设定

EKC 模型通常先设为三次曲线，若不显著，则再设为二次曲线，若二次曲线仍不显著，则拟合成线性模型[35]。因此，EKC 曲线可能表现为“N 型”“倒 N 型”“U 型”“倒 U 型”或者直线型。为减少异方差，本文对各指标进行对数化处理，设定化肥面源污染排放的 EKC 模型为：

$$\ln I_{it}=\beta_0+\beta_1(\ln G_{it})^3+\beta_2(\ln G_{it})^2+\beta_3\ln G_{it}+\beta_4\ln P_{it}+\beta_5\ln M_{it}+\beta_6\ln S_{it}+\beta_7\ln R_{it}+\beta_8\ln N_{it}+\beta_9\ln U_{it}+\beta_{10}\ln A_{it}+\mu_{it} \tag{5}$$

式中：I 表示化肥面源污染排放强度；G 表示人均农业产值，作为解释变量，用来表征农业经济发展水平；G(元·人$^{-1}$)=农业总产值(狭义)/乡村总人口数(狭义农业总产值指种植业和其他农业的主产品和副产品的总产值，主要包括粮、棉、油料、麻类、烟叶、蔬菜、药材、瓜类和其他农作物的种植，以及茶园、桑园、果园的生产经营。狭义上的农业是化肥面源污染的主要来源，因而此处用狭义的农业总产值计算)。其他指标是参考现有相关研究选取的控制变量：P 表示作物种植结构，用粮食播种面积与农作物总播种面积的比值表征，作物种植结构差异可能致使化肥施用量的差异；M 表示农业机械投入强度(kg·hm^{-2})，用单位农作物播种面积的农业机械投入强度表征，机械化水平提高可能会对化肥施用量产生正负两面的影响；S 表示产业结构，用农业产值占 GDP 的比重表征

农业产值占 GDP 的比重=农业产值(狭义)/地区国内生产总值×100% (6)

农业产值所占比重大小影响到化肥施用量的大小，地区产业结构会影响当地的环境质量；R 表示农村居民收入结构，农村居民收入结构用农村居民人均工资性收入与农村居民人均纯收入的比值表征，农村居民人均工资性收入比重的高低可能影响化肥施用量的大小；N 表示农村居民人均纯收入，农村居民收入的高低会影响化肥的投入；U 表示城乡居民收入差距，用城镇居民人均可支配收入与农村居民人均纯收入之比表征，收入差距可能是环境退化的重要因素，均衡的收入分配可能减少污染[36]；A 表示农业产业结构，用狭义农业总产值占农林牧渔业总产值的比重表征，以反映种养结构调整对化肥面源污染的影响；μ 为随机误差项；i 表示省份，t 表示年份；回归模型的估计系数 β_n (n=1~10)表示弹性系数。

1.2 数据来源

本文在我国化肥面源污染排放强度核算的基础上，对其进行时空格局演变分析，并以时空特征为分类条件，对空间异质性条件下化肥面源污染 EKC 的时间路径进行拟合与预测。研究数据为 1997—2018 年 31 省(市、自治区，港澳台数据缺失，以下均称省)共 22 年的面板数据，来源于《中国农村统计年鉴》(1998—2019 年)和《中国统计年鉴》(1998—2019 年)，并用插值法补齐少量年份因年鉴统计口径变化造成的缺失值。为实现数据的可比性，农业总产值通过农业产值指数折算为 1997 年不变价，农村居民人均纯收入和城镇居民人均可支配收入运用消费者价格指数折算为 1997 年不变价。

2 化肥面源污染排放强度核算及其时空格局演变

2.1 化肥面源污染排放强度核算

根据公式(1)和(2)对我国 1997—2018 年各省化肥面源污染排放强度进行核算，各分区核算结果如图 1 所示。我国化肥面源污染排放强度省际差异较大。北京、江苏、上海、浙江、湖北等经济发达省份排放强度较大，22 年间大多数年份在 5 kg·hm^{-2} 以上，超过其他省份的平均强度。青海、西藏、黑龙江等省份排放强度较小。各省 22 年间化肥面源污染排放强度的走势各异，表现出不同升降趋势，表明我国化肥面源污染排放强度时空差异较大。各区域内各省份排放强度差异较小，因此高(低)强度区域可能呈现一定的集聚特征。所以有必要进一步分析化肥面源污染排放强度的总体和局部时空格局演变。

2.2 省际化肥面源污染排放强度时空格局演变特征

2.2.1 总体时空格局演化特征

运用 ArcGIS 10.2 软件计算 1997—2018 年各省域化肥面源污染排放强度的 Global Moran’s I 指数，结果如表 2 所示。1997—2018 年间，我国省域化肥面源污染排放强度的 Moran’s I 指数均通过了显著性检验，且均大于 0.307，Z 得分均大于 4.352，说明我

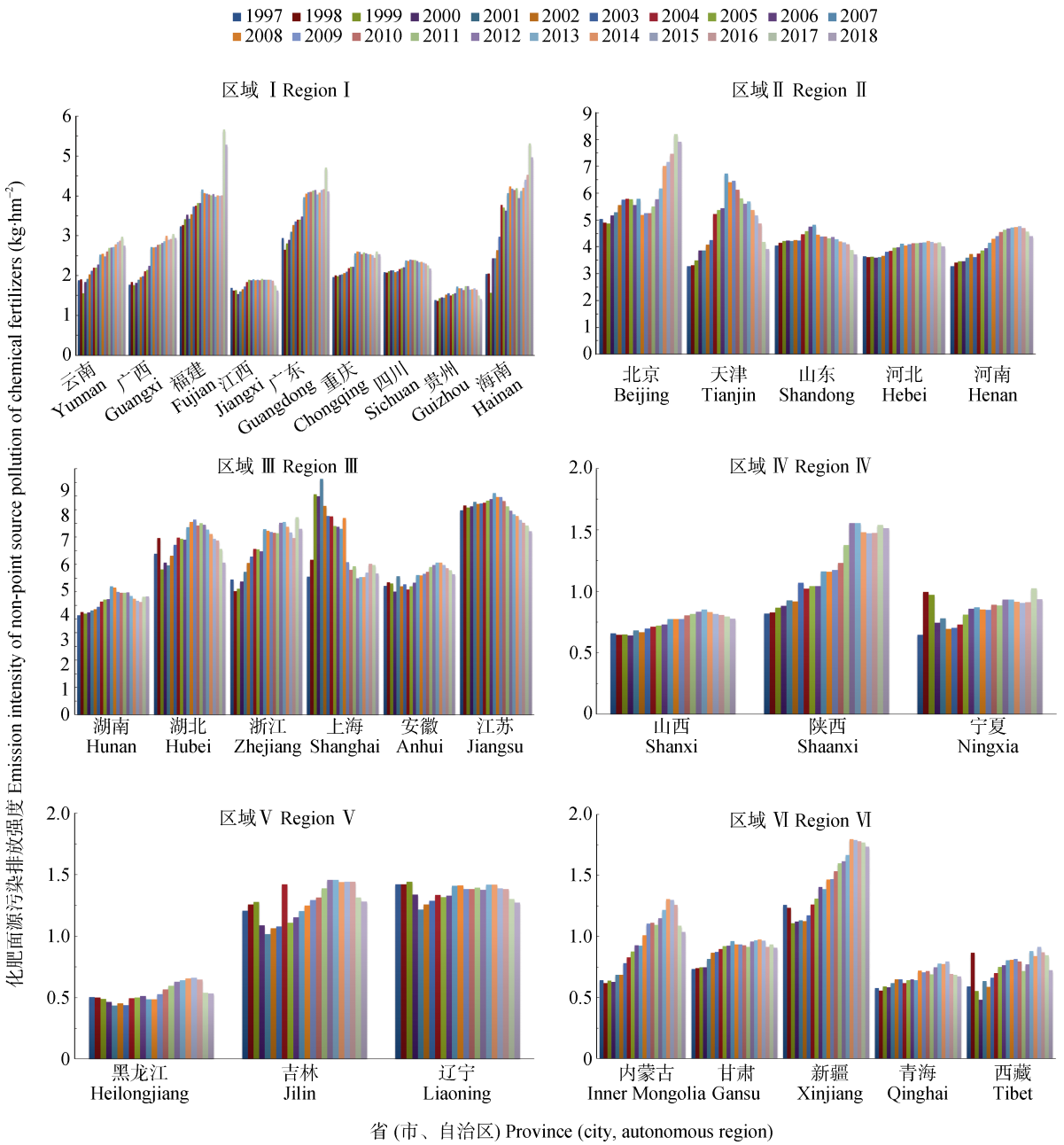

图 1　1997—2018 年各分区化肥面源污染排放强度

Fig. 1　Emission intensities of non-point source pollution of chemical fertilizers in different regions from 1997 to 2018

表 2　1997—2018 年各省(市、自治区)化肥面源污染排放强度 Global Moran's *I* 值

Table 2　Global Moran's *I* values of chemical fertilizer non-point source pollution emission intensity in various provinces (cities, autonomous regions) from 1997 to 2018

年份 Year	Moran's *I*	*Z* 得分 *Z* score	*P* 值 *P* value	年份 Year	Moran's *I*	*Z* 得分 *Z* score	*P* 值 *P* value	年份 Year	Moran's *I*	*Z* 得分 *Z* score	*P* 值 *P* value
1997	0.396	5.551	0.000	2005	0.404	5.607	0.000	2013	0.374	5.193	0.000
1998	0.385	5.421	0.000	2006	0.407	5.643	0.000	2014	0.368	5.120	0.000
1999	0.417	5.884	0.000	2007	0.386	5.361	0.000	2015	0.364	5.070	0.000
2000	0.404	5.688	0.000	2008	0.378	5.266	0.000	2016	0.357	4.988	0.000
2001	0.411	5.805	0.000	2009	0.364	5.081	0.000	2017	0.307	4.352	0.000
2002	0.409	5.717	0.000	2010	0.368	5.133	0.000	2018	0.310	4.400	0.000
2003	0.406	5.659	0.000	2011	0.373	5.194	0.000				
2004	0.395	5.498	0.000	2012	0.371	5.161	0.000				

国化肥污染排放强度呈正向空间自相关性，化肥面源污染在区域上一直处于较高的集聚状态，区域间存在较强的相关性和依赖性。Moran's I 指数 22 年间呈现小幅波动变化，1997—2006 年总体较为平稳，2006 年开始呈现出波动下降的趋势，说明我国化肥面源污染排放强度空间格局总体较稳定，空间自相关性呈现出先平稳后下降的特征。空间自相关性降低表明区域与周边地区变化趋势的一致性相对减弱，应当注意区域间的异质性特征和空间溢出效应的影响。

2.2.2 局部时空格局演化特征

利用 ArcGIS 10.2 软件的空间统计工具计算化肥面源污染排放强度省域空间的 G_i^*指数。依据自然断点法将 G_i^*值分为 7 类：排放强度冷点(99%置信)、排放强度冷点(95%置信)、排放强度冷点(90%置信)、排放强度热点(99%置信)、排放强度热点(95%置信)、排放强度热点(90%置信)和不显著。部分年份空间格局如表 3 所示(限于篇幅，本文只展现时空格局变化较大的 1997 年、2003 年、2007 年、2009 年、2014 年和 2018 年的空间格局分布情况)。分析可知：

1)化肥面源污染排放强度空间格局总体较稳定。热点区主要集中分布在华中和华南地区，其中长江中下游地区尤其显著，常年处于 99%的置信热点。冷点区主要集中在西部地区的青海、甘肃和西藏，东北的黑龙江也在 2003 年后长期呈现为冷点状态。化肥面源污染热(冷)点不显著的区域主要集中在我国西南部以及东北和西北的部分省份。

2)化肥面源污染排放强度空间格局在各阶段呈现出局部变动，黄淮海地区呈现出热点程度减弱的变化。1997—2002 年，全国化肥面源污染空间格局较为稳定，各省份热(冷)点的属性未发生大的变动，

表 3 1997—2018 年各省(市、自治区)化肥面源污染排放强度空间格局分布

Table3 Spatial pattern of chemical fertilizer non-point source pollution emission intensity in different provinces (cities, autonomous regions) from 1997 to 2018

省(市、自治区) Province (city, autonomous region)	热(冷)点置信度 Hot (cold) point confident coefficient (%)					
	1997	2003	2007	2009	2014	2018
上海 Shanghai	99	99	99	99	99	99
江苏 Jiangsu	99	99	99	99	99	99
浙江 Zhejiang	99	99	99	99	99	99
安徽 Anhui	99	99	99	99	99	99
福建 Fujian	99	99	99	99	99	99
江西 Jiangxi	99	99	99	95	95	95
河南 Henan	99	99	99	99	99	95
湖北 Hubei	99	99	99	99	99	99
湖南 Hunan	95	95	95	95	95	95
山东 Shandong	95	95	90	90	90	0
北京 Beijing	90	90	0	0	0	0
天津 Tianjin	90	90	0	0	0	0
河北 Hebei	90	90	0	0	0	0
广东 Guangdong	0	0	0	90	0	90
西藏 Tibet	–90	–90	–90	–90	–90	–90
甘肃 Gansu	–95	–95	–95	–95	–99	–95
青海 Qinghai	–95	–95	–95	–95	–95	–95
黑龙江 Heilongjiang	0	–90	–90	–90	–90	–90
山西 Shanxi	0	0	0	0	0	0
内蒙古 Inner Mongolia	0	0	0	0	0	0
辽宁 Liaoning	0	0	0	0	0	0
吉林 Jilin	0	0	0	0	0	0
广西 Guangxi	0	0	0	0	0	0
海南 Hainan	0	0	0	0	0	0
重庆 Chongqing	0	0	0	0	0	0
四川 Sichuan	0	0	0	0	0	0
贵州 Guizhou	0	0	0	0	0	0
云南 Yunnan	0	0	0	0	0	0
陕西 Shaanxi	0	0	0	0	0	0
宁夏 Ningxia	0	0	0	0	0	0
新疆 Xinjiang	0	0	0	0	0	0

90%、95%、99%分别表示在 10%、5%、1%水平热点显著; –90%、–95%、–99%分别表示在 10%、5%、1%水平冷点显著; 0 表示不显著，既不是热点也不是冷点。90%, 95%, 99% mean significant hot point at 10%, 5%, 1% levels, respectively. –90%, –95%, –99% mean significant cold point at 10%, 5%, 1% levels, respectively. 0 means that the result was not significant, neither hot point nor cold point.

只有少量省份在置信度上表现出一定的波动。2003 年和 2004 年, 黑龙江在 90%置信冷点和不显著间波动, 2005 年后则持续呈现为 90%的置信冷点。2007 年全国空间格局发生较大变化, 京津冀地区首次从热点区消失, 山东的热点显著度也出现下降, 黄淮海部分地区迎来化肥面源污染的拐点。2009 年广东首次进入热点区的版图, 至今虽有个别年份呈现为不显著, 但总体呈现为热点状态。2014 年后, 部分热点省份发生波动, 如 2014 年, 广东由 90%置信热点变为不显著, 江西由 99%置信热点变为 95%置信热点, 山东由 95%置信热点变为 90%置信热点; 2017 年, 山东由 90%置信热点进而变为不显著, 河南由长期的 99%置信热点变为 95%置信热点。从全国冷热点时空格局的变化来看, 近年来对于化肥面源污染的治理取得一定成效, 部分区域的热点程度有所下降, 尤其是黄淮海地区的效果较为明显。近年来, 高强度的减量化措施使我国化肥施用量短期减少, 但目前农业生产方式对于化肥的依赖性以及政策执行的波动性还是会使局部地区化肥面源污染状况产生波动。

对 31 个省 22 年热(冷)点发生的频次和显著水平进行统计, 据此将 31 个省份分为热点区、冷点区、非热(冷)点区 3 类区域, 结果如表 4 所示。3 类区域化肥面源污染状况的差异体现出了我国化肥面源污染在空间上的异质性。

表 4　化肥面源污染排放强度热点分析的分组结果

Table 4　Grouping results of hot spot analysis of chemical fertilizer non-point source pollution emission intensity

类别 Category	省(市、自治区) Province (city, autonomous region)
热点区 Hot spot region	安徽、湖北、江苏、山东、上海、浙江、河南、福建、江西、湖南 Anhui, Hubei, Jiangsu, Shandong, Shanghai, Zhejiang, Henan, Fujian, Jiangxi, Hunan
冷点区 Cold spot region	黑龙江、甘肃、青海、西藏 Heilongjiang, Gansu, Qinghai, Tibet
非热(冷)点区 Non-hot (cold) spot region	广西、云南、内蒙古、吉林、贵州、宁夏、新疆、广东、陕西、海南、山西、辽宁、河北、天津、北京、四川、重庆 Guangxi, Yunnan, Inner Mongolia, Jilin, Guizhou, Ningxia, Xinjiang, Guangdong, Shaanxi, Hainan, Shanxi, Liaoning, Hebei, Tianjin, Beijing, Sichuan, Chongqing

3　化肥面源污染 EKC 分组模拟与预测

3.1　面板单位根检验和协整检验

面板数据兼具截面数据和时间序列数据的特点, 为避免伪回归, 在构建面板回归模型前需用单位根方法检验各个变量的平稳性和协整关系。常见的面板数据单位根检验有 LLC、IPS 和费雪式检验等方法, 本文运用以上方法对各组分别进行检验, 结果表明各种检验结论一致, 限于篇幅仅列出 LLC 检验结果。LLC 检验结果(表 5)显示, 多数变量的原始序列存在单位根。因此对原始序列进行一阶差分, 结果显示各变量在一阶差分时为平稳, 序列为一阶单整序列 I(1), 因此可以进行协整检验。

选取 Kao 检验方法对各组回归模型的二次曲线和三次曲线进行协整检验, 结果如表 6 所示。各组 ADF 值均通过了显著性检验, 表明组内各个变量间的关系长期稳定, 可构建面板模型。

表 5　化肥面源污染排放强度不同热点区域的面板单位根(LLC)检验结果

Table 5　Results of panel unit root test (LLC test) of different hotspot regions of fertilizer non-point source pollution emission intensity

组别 Category	变量 Variable	原始序列 Original sequence	一阶差分序列 First differencing sequence
热点区 Hot spot region	ln*I*	−0.248(0.402)	−7.689***(0.000)
	ln*G*	1.209(0.887)	−10.995***(0.000)
	ln*P*	−0.805(0.211)	−4.825***(0.000)
	ln*M*	0.361(0.641)	−10.483***(0.000)
	ln*A*	−1.590*(0.056)	−7.590***(0.000)
	ln*S*	−3.509***(0.000)	−6.321***(0.000)
	ln*R*	−1.110(0.134)	−10.744***(0.000)
	ln*N*	−1.078(0.141)	−8.095***(0.000)
	ln*U*	−1.329*(0.092)	−9.190***(0.000)
冷点区 Cold spot region	ln*I*	−3.240***(0.001)	−5.671***(0.000)
	ln*G*	0.605(0.728)	−3.143***(0.001)
	ln*P*	0.450(0.674)	−6.853***(0.000)
	ln*M*	0.146(0.558)	−2.131**(0.017)
	ln*A*	−0.583(0.280)	−2.457***(0.007)

续表 5

组别 Category	变量 Variable	原始序列 Original sequence	一阶差分序列 First differencing sequence
冷点区 Cold spot region	ln*S*	0.107(0.543)	−2.801***(0.003)
	ln*R*	−1.467*(0.071)	−2.437***(0.007)
	ln*N*	0.040(0.516)	−5.727***(0.000)
	ln*U*	−2.208**(0.014)	−4.647***(0.000)
非热(冷)点区 Non-hot (cold) spot region	ln*I*	−4.248***(0.000)	−12.038***(0.000)
	ln*G*	0.992(0.839)	−8.996***(0.000)
	ln*P*	−1.609*(0.054)	−8.982***(0.000)
	ln*M*	0.627(0.735)	−7.044***(0.000)
	ln*A*	−2.115**(0.017)	−7.789***(0.000)
	ln*S*	−0.137(0.446)	−9.307***(0.000)
	ln*R*	−5.548***(0.000)	−11.541***(0.000)
	ln*N*	0.834(0.798)	−8.691***(0.000)
	ln*U*	−3.251***(0.000)	−11.208***(0.000)

ln*I*: 化肥面源污染排放强度; ln*G*: 人均农业产值; ln*P*: 作物种植结构; ln*M*: 农业机械投入强度; ln*A*: 农业产业结构; ln*S*: 产业结构; ln*R*: 农村居民收入结构; ln*N*: 农村居民人均纯收入; ln*U*: 城乡居民收入比。各变量均进行对数化处理。*、**和***分别表示在 10%、5%和 1%水平显著; 括号内数据为 *P* 值, 括号前为调整后的 *t* 值。ln*I*: fertilizer non-point source pollution emission intensity; ln*G*: per capita gross agricultural product; ln*P*: crop planting structure; ln*M*: agricultural machinery input intensity; ln*A*: agricultural industry structure; ln*S*: industrial structure; ln*R*: income structure of rural residents; ln*N*: per capita net income of rural residents; ln*U*: income ratio of urban and rural residents. Each variable is logarithmic. *, ** and *** mean significant effects of the variables at 10%, 5% and 1% levels, respectively. Data in parentheses are *P* values, data before parentheses are the adjusted *t* values.

表 6 化肥面源污染排放强度不同热点区域的协整检验结果

Table 6 Results of panel cointegration test of different hotspot regions of fertilizer non-point source pollution emission intensity

组别 Category	曲线形式 Curve form	ADF *t* 统计值 ADF *t* statistic	*P* 值 *P* value
热点区 Hot spot region	三次曲线 Cubic curve	−2.732***	0.003
	二次曲线 Quadratic curve	−2.818***	0.002
冷点区 Cold spot region	三次曲线 Cubic curve	−3.528***	0.000
	二次曲线 Quadratic curve	−3.472***	0.000
非热(冷)点区 Non-hot (cold) spot region	三次曲线 Cubic curve	−2.342***	0.009
	二次曲线 Quadratic curve	−2.070**	0.019

和*分别表示在 5%和 1%水平显著。** and *** mean significant effects of the variables at 5% and 1% levels, respectively.

3.2 组间异方差、组内自相关和组间同期相关的检验

由于 3 类区域的分组数据均为长面板数据, 因此需要对各组数据进行组间异方差、组内自相关和组间同期相关的检验, 并根据结果确定合适的计量方法。检验结果(表 7)显示 3 类区域的二次和三次模型均存在组间异方差和组间同期相关; 而组内自相关检验表明, 热点区和非热(冷)点区的二次模型和三次模型均存在组内一阶自相关, 冷点区的二次模型和三次模型则不存在组内自相关。

3.3 化肥面源污染 EKC 空间分组拟合结果

为解决组间异方差、组内自相关和组间同期相关问题, 热点区和非热(冷)点区均采用全面 FGLS 方法进行估计, 该方法同时考虑了这 3 个因素, 能够保证估计的效率。对于不存在组内自相关的冷点区, 采用 LSDV 方法进行估计, 并使用组间异方差和组间同期相关的稳健标准误差来保证估计结果的稳健性。表 8 报告了各组的回归估计结果。

回归模型结果显示, 热点区的三次曲线模型在 10%显著水平未通过检验, 二次曲线模型在 1%显著水平上通过检验, 故采用二次曲线形式; 冷点区的三次曲线形式模型在 10%显著水平通过检验, 故采用三次曲线形式; 非热(冷)点区的三次曲线在 5%显著水平通过检验, 故采用三次曲线形式。通过 ln*G* 的各次项的正负, 可以判断热点区的 EKC 形状为“倒 U 型”, 冷点区和非热(冷)点区为均“倒 N 型”。

1)热点区。本组包含上海、江苏、浙江、河南、安徽、湖北等 10 个省份, 这些省份主要是我国经济发达地区或农业大省, 化肥面源污染强度普遍较大。本组 EKC 的时间路径呈现为“倒 U 型”曲线, 说明伴随农业发展, 化肥面源污染表现为“升—降”趋

表 7　各组组间异方差、组内自相关、组间同期相关检验结果

Table 7　Results of test for groupwise heteroskedasticity, autocorrelation within panel and contemporaneous correlation in each regions

	热点区 Hot spot region		冷点区 Cold spot region		非热(冷)点区 Non-hot (cold) spot region	
	二次曲线 Quadratic curve	三次曲线 Cubic curve	二次曲线 Quadratic curve	三次曲线 Cubic curve	二次曲线 Quadratic curve	三次曲线 Cubic curve
组间异方差检验 Modified Wald test for groupwise heteroscedasticity	chi2(10)=217.54*** Prob>chi2=0.000	chi2(10)=233.50*** Prob>chi2=0.000	chi2(4)=48.88*** Prob>chi2=0.000	chi2(4)=68.38*** Prob>chi2=0.000	chi2(17)=697.51*** Prob>chi2=0.000	chi2(17)=300.80*** Prob>chi2=0.000
原假设 Null hypothesis	模型不存在组间异方差 No groupwise heteroscedasticity					
检验结果 Result	拒绝原假设，存在组间异方差 Rejecting the null hypothesis, exist groupwise heteroscedasticity		拒绝原假设，存在组间异方差 Rejecting the null hypothesis, exist groupwise heteroscedasticity		拒绝原假设，存在组间异方差 Rejecting the null hypothesis, exist groupwise heteroscedasticity	
组内自相关检验 Wooldridge test for autocorrelation	$F_{(1,9)}$=36.901*** Prob>F=0.000	$F_{(1,9)}$=37.795*** Prob>F=0.000	$F_{(1,3)}$=2.784 Prob>F=0.194	$F_{(1,3)}$= 2.808 Prob>F=0.192	$F_{(1,16)}$= 32.101*** Prob>F=0.000	$F_{(1,16)}$=32.906*** Prob>F=0.000
原假设 Null hypothesis	模型不存在一阶自相关 No first-order autocorrelation					
检验结果 Result	拒绝原假设，存在组内自相关 Rejecting the null hypothesis, exist autocorrelation		接受原假设，不存在组内自相关 Accept the null hypothesis, does not exist autocorrelation		拒绝原假设，存在组内自相关 Rejecting the null hypothesis, exist autocorrelation	
组间同期相关检验 Breusch-Pagan LM test of independence	chi2(45)= 123.289*** Pr=0.000	chi2(45)= 122.229*** Pr=0.000	chi2(6)=14.939** Pr=0.021	chi2(6)=11.633* Pr=0.071	chi2(136)=639.163*** Pr=0.000	chi2(136)= 610.403*** Pr=0.000
原假设 Null hypothesis	模型不存在组间同期相关 No contemporaneous correlation between groups					
检验结果 Result	拒绝原假设，存在组间同期相关 Rejecting the null hypothesis, exist correlation between the groups		拒绝原假设，存在组间同期相关 Rejecting the null hypothesis, exist correlation between the groups		拒绝原假设，存在组间同期相关 Rejecting the null hypothesis, exist correlation between the groups	

*、**和***分别表示在 10%、5%和 1%水平显著。*, ** and *** mean significant effects of the variables at 10%, 5% and 1% levels, respectively.

表 8　化肥面源污染 EKC 分组拟合结果

Table 8　EKC group fitting results of chemical fertilizer non-point source pollution

变量 Variable	热点区 Hot spot region		冷点区 Cold spot region		非热(冷)点区 Non-hot (cold) spot region	
	三次曲线 Cubic curve	二次曲线 Quadratic curve	三次曲线 Cubic curve	二次曲线 Quadratic curve	三次曲线 Cubic curve	二次曲线 Quadratic curve
ln$G$	3.681(0.344)	1.632***(0.000)	−10.198*(0.077)	0.984**(0.049)	−3.810**(0.023)	0.037(0.778)
(ln$G$)^2	−0.354(0.463)	−0.094***(0.000)	1.363*(0.063)	−0.063**(0.038)	0.469**(0.027)	−0.007(0.405)
(ln$G$)^3	0.011(0.581)	—	−0.060*(0.053)	—	−0.019** (0.028)	—
ln$P$	−0.378***(0.000)	−0.367***(0.000)	−0.397** (0.017)	−0.423**(0.013)	0.039***(0.001)	0.040***(0.000)
ln$M$	0.102***(0.000)	0.102***(0.000)	0.251***(0.000)	0.257***(0.000)	0.200***(0.000)	0.195***(0.000)
ln$A$	−0.175**(0.013)	−0.178**(0.011)	0.376**(0.048)	0.418**(0.029)	−0.084***(0.000)	−0.090***(0.000)
ln$R$	0.082*** (0.008)	0.077**(0.012)	0.182***(0.003)	0.163***(0.007)	0.157***(0.000)	0.154***(0.000)
ln$N$	0.274*** (0.001)	0.276***(0.000)	0.060 (0.673)	0.007(0.959)	0.343***(0.000)	0.364***(0.000)
ln$U$	0.088(0.192)	0.094(0.160)	0.055(0.626)	0.055(0.634)	0.019(0.541)	0.019(0.487)
ln$S$	0.004(0.901)	0.003(0.930)	0.271***(0.009)	0.226**(0.025)	−0.039***(0.000)	−0.047***(0.000)
C	45.059***(0.000)	54.566***(0.000)	24.973*(0.092)	−3.929**(0.029)	49.502***(0.000)	48.870***(0.000)
曲线形状 Curve form	不显著 Not significant	倒 U 型 Inverted U-type	倒 N 型 Inverted N-type	—	倒 N 型 Inverted N-type	不显著 Not significant
拐点值 Inflection point value	—	8.681	6.747/8.397	—	7.307/9.149	—
拐点处人均农业产值(G) Per capita gross agricultural product in inflection point G (¥)	—	5 889.933	851.500/4 433.746	—	1 490.698/ 9 405.031	—

*、**和***分别表示在 10%、5%和 1%水平显著；括号内数据为 P 值，括号前为调整后的 t 值；“/”前为第 1 个拐点对应的值，“/”后为第 2 个拐点对应的值。*, ** and *** mean significant effects of the variables at 10%, 5% and 1% levels, respectively. Data in parentheses are P values, data before parentheses are the adjusted t values. Date before “/” are the values of the first inflection point, date after “/” are the values of the second inflection point.

势。该曲线拐点对应的人均农业生产总值 G 分别为 5 889.933 元。从热点区 10 省的情况看，江苏(2011 年)、山东(2016 年)、福建(2017 年)、河南(2017 年)、河北(2017 年)5 个省份已经跨过了“倒 U 型”曲线的拐点，进入了“随着农业经济增长，化肥面源污染减弱”的下降阶段。从时间上看，多数省份在 2017 年左右跨过拐点，其原因除经济不断增长促使化肥面源污染到达拐点外，国家粮食安全战略下粮食主产区近年粮食播种面积比重的回升、农村居民人均纯收入的提高和农村居民对农业收入依赖的降低都可能促进了拐点的到来。此外，2015 年以来，国家颁布的一系列化肥减量化政策，如《到 2020 年化肥使用量零增长行动方案》以及近年中央一号文件对农业面源污染重视程度的不断加强也可能促进了拐点的到来。安徽、湖南、江西、上海和浙江则均尚未到达拐点，仍处于“随着农业经济增长，化肥面源污染增强”的阶段。安徽、湖南和江西作为我国重要的产粮区，对于化肥的依赖程度较高，难以在短期摆脱对化肥的依赖。上海和浙江作为粮食主销区，较低的种植业比重反而致使化肥施用的集约化程度更低，发展种养循环的动力更小，从而未充分发挥有机肥代替化肥等方面的作用。热点区农业机械投入强度与化肥面源污染程度呈正相关，表明科技和机械水平虽然在提高农业产值方面发挥了一定作用，但是对于提高化肥利用效率和控制化肥流失率的作用尚未明显体现，应该充分发挥农业新技术的作用，如生态循环农业、配方施肥和精准施肥等。

2)冷点区。本组包含甘肃、青海、西藏、黑龙江 4 个省份，主要分布在我国西部和东北。本组 EKC 的时间路径为“倒 N 型”曲线，说明伴随农业发展，化肥面源污染表现为“降—升—降”趋势。该曲线的拐点对应的人均农业生产总值 G 分别为 851.500 元和 4 433.746 元。冷点区 4 省均在 1997 年以前就跨过了“倒 N 型”曲线的第 1 个拐点，已经跨过第 2 个拐点的省份为甘肃(2017 年)和黑龙江(2006 年)，表明这两个省份目前处于曲线下降阶段，即“随着农业经济增长，化肥面源污染减弱”。青海和西藏则还未跨过第 2 个拐点，仍处于曲线的上升阶段，且表现出短期内不会达到拐点的趋势。对于青海和西藏而言，其本身较低的农业经济增长水平促使其距离拐点较远。黑龙江农业产值高但化肥面源污染排放强度却一直较低，其原因在于东北黑土资源肥沃、供肥能力强，且多年来耕地质量普遍不断提高[37]，化肥流失率低，从而使黑龙江较早跨过拐点进入曲线下降阶段。

3)非热(冷)点区。本组主要包括广西、云南、四川、吉林、辽宁、陕西等 17 个省份。本组 EKC 的时间路径为“倒 N 型”曲线，说明伴随农业发展，化肥面源污染表现为“降—升—降”趋势。该曲线两个拐点对应的人均农业生产总值 G 分别为 1 490.698 元和 9 405.031 元。从非热(冷)点区 17 省的情况看，多数省份在 1997 年以前就跨过第 1 个拐点，西南和华北部分省份则在 2000—2010 年间跨过第 1 个拐点，进入了“随着农业经济增长，化肥面源污染增强”的上升阶段。然而，当前非热(冷)点区跨过第 2 个拐点的省份只有海南(2016 年)和新疆(2016 年)。表明当前非热(冷)点区的多数省份均处于曲线的上升阶段，即“随着农业经济增长，化肥面源污染增强”。按其曲线趋势，非热(冷)点区各省的拐点相对热点区较晚，且由于空间格局上近年空间自相关有所减弱，因此应当注意非热(冷)点区和热点区之间空间相关性的变化，讨论其相互间的影响。

3.4 化肥面源污染 EKC 时间路径分组预测

综合来看，3 类区域的曲线形态和拐点差异较大，证明了空间异质性分析的必要性。截至 2018 年，热点区仍有 5 个省份尚未跨过“倒 U 型”曲线的拐点，处于曲线的上升阶段；冷点区 4 个省份中还有两个未跨过“倒 N 型”曲线的第 2 个拐点；非热(冷)点区仍有 15 个省份未跨过“倒 N 型”的第 2 个拐点。因此当前我国大部分省份正处于“随着农业经济增长，化肥面源污染增强”的曲线上升阶段。在此情况下，有必要预测这些省份 EKC 曲线的时间路径，以根据其阶段特征和未来趋势采取相应的措施。本文运用趋势延伸法，依据各省 22 年的人均农业产值年均增长率来预估下一拐点的出现年份，结果如表 9 所示。对于热点区省份，除上海外，其余省份可能在近年迎来拐点。对于上海而言，其农业产业比重较低，应当进一步加强产业结构的调整，通过区域间产业转移等方式来寻求经济效益和生态效益的平衡，获取更高的效益。对于冷点区，青海和西藏距离拐点的时间较长，且两省生态脆弱，应进一步调整农业结构，推广农业新技术的应用，利用其畜牧业优势，发展种养循环、生态农业，使两省的拐点提前到来，进入“倒 N 型”曲线的下降阶段。非热(冷)点区中除辽宁、吉林、内蒙古等省份外，其他省份距离“倒 N 型”曲线的第 2 个拐点距离较远，将较长期处于曲线上升阶段，应当尤其引起重视。

4 讨论与结论

4.1 讨论

近年来，化肥减量化和化肥面源污染防治成为

表 9　部分省(市、自治区)化肥面源污染跨过下一拐点的时间预测

Table 9　Time forecast for some provinces (cities, autonomous regions) cross the next inflection point of non-source pollution of fertilizers

组别 Category	曲线形状 Curve form	省(市、自治区) Province (city, autonomous region)	跨过第 1 个拐点年份 Year when crossed the first inflection point	人均农业总产值的年均增长率 Average annual growth rate of per capita gross agricultural product (%)	下一拐点出现年份 Year of the next inflection point
热点区 Hot spot region	倒 U 型 Inverted U-type	安徽 Anhui	未跨过 Not cross	6.410	2022
		上海 Shanghai	未跨过 Not cross	1.720	2064
		湖南 Hunan	未跨过 Not cross	6.779	2022
		江西 Jiangxi	未跨过 Not cross	6.182	2024
		浙江 Zhejiang	未跨过 Not cross	6.383	2022
冷点区 Cold spot region	倒 N 型 Inverted N-type	青海 Qinghai	1997 年前 Before1997	4.488	2034
		西藏 Tibet	1997 年前 Before1997	3.957	2036
非热(冷)点区 Non-hot (cold) spot region	倒 N 型 Inverted N-type	北京 Beijing	1997 年前 Before1997	1.195	2123
		广东 Guangdong	1997 年前 Before1997	6.839	2026
		广西 Guangxi	1997 年前 Before1997	7.762	2025
		贵州 Guizhou	2010	6.904	2032
		河北 Hebei	1997 年前 Before1997	6.912	2024
		吉林 Jilin	1997 年前 Before1997	6.845	2021
		辽宁 Liaoning	1997 年前 Before1997	8.126	2019
		内蒙古 Inner Mongolia	1997 年前 Before1997	6.544	2021
		宁夏 Ningxia	2012	7.340	2025
		山西 Shanxi	2008	5.647	2040
		陕西 Shaanxi	2003	8.571	2023
		四川 Sichuan	2006	6.007	2033
		天津 Tianjin	1997 年前 Before1997	4.059	2034
		云南 Yunnan	2005	6.861	2029
		新疆 Xinjiang	2006	8.536	2025

我国农业工作的重点和研究的热点。随着农业面源污染对环境质量的影响越来越显著[38]，基于区域异质性的化肥面源污染研究能使研究结果更加符合区域的实际情况，从而更加准确地总结和预测我国化肥面源污染状况。当前有学者结合区域的实际情况对中国化肥面源污染环境风险时空变化进行分析，发现各省差异较大，地域联系较为明显，呈现出聚集分布的特点[39]，但并未探讨各区域差异的规律及原因。有学者对化肥施用及环境风险的时空变化特征进行了模拟，得出了区域间差异化的结论，然而并未考虑经济等因素对环境风险的影响[40]。为研究区域异质性，有学者通过面板门槛模型选取变量进行区域分组，结合经济发展状况，对化肥面源污染状况进行异质性条件下的 EKC 曲线检验[22]，然而数理方法选取的分组变量可能存在主观性，使得验证结果不能准确反映各区域的特质，组间差异性也不明显。本文在我国化肥面源污染时空格局特征和相关性分析的基础上，根据面源污染的空间异质性分组，对化肥面源污染与农业经济发展之间的 EKC 时间路径进行模拟与趋势预测，使研究结果更加符合区域的客观情况，并得出了区域间差异化的结论，其中一些现象值得进一步讨论。

1)从化肥面源污染空间格局角度看，我国化肥面源污染状况呈现出显著的空间正自相关性，表明存在较强的空间集聚效应。近年来，空间自相关性有所减弱，长期的集聚格局可能发生一定变动，不同区域间的流动性可能增强，环境污染的空间溢出效应开始愈发显现[41]。其原因可能是各区域间贸易[42-43]和产业结构的调整和流动[44-47]带来的污染物的转移，因此部分省份从热点区消失的部分原因可能是通过产业转移将污染物转移到了非热点区域。对于北京、上海等省市而言，产业上的转移有可能提高区域的生产效率，降低化肥面源污染的总体程度，因此可以进一步适当推进农业产业的转移，同时通过生态补偿、排污权交易等方式促进区域间的利益协调。从根本而言，则应当进一步推广农业新技术的运用，从根本上减少全国范围内的化肥面源污染。

2)从 EKC 模型的分区模拟结果来看，各区域在

曲线形状和拐点上存在较大的差异。当前大多省份均处于曲线的上升阶段，但距离拐点的时间则差异较大。热点区的多数省份距离拐点较近，这表明热点区近年来化肥面源污染防控工作取得一定成效。但热点区迎来拐点后，非热(冷)点区和冷点区却依然会在较长期内处于曲线上升阶段。其原因一方面可能是以上讨论的污染物空间上的转移，另一方面则是非热(冷)点区的化肥面源污染防控工作亟待进一步加强，应提高农业新技术的普及率，推广有机肥和配方施肥。

3)从控制变量的驱动作用来看，3 类区域农业机械强度均正向影响化肥面源污染，这表明当前农业生产过程中，机械水平的提高在提高农业生产效率的同时也增加了面源污染的风险，因此在机械生产过程中应当提高精准施肥和配方施肥技术的运用。农村居民工资性收入的提高也使农业生产对于农民生计影响变小，可能致使化肥施用更加粗放，种养循环难度变大。此外，相同因素在不同区域可能产生不同的影响，该结论与崔鑫生等[48]“同一因素对不同国家的作用存在着显著差异”的研究结论具有相似之处。粮食播种比例、产业结构的变化、种养结构的变化在不同区域会对化肥面源污染产生不同的影响。如畜牧业比重较大的冷点区，种植业比重的下降明显地对化肥面源污染产生积极影响。

由于各区域在空间上的相关性，因此在化肥面源污染治理中既要根据各区域的特性施策，又要从整体上注重区域间的相互作用。对于热点区大部分省份，应当进一步大力推广测土配方施肥，精准施肥，研发推广适用施肥设备，机械深施，提高化肥利用率。冷点区部分省份生态较为脆弱，应实施保护性耕作，增施有机肥，推广水肥一体化等高效节水灌溉技术。非热(冷)点区应当注重种养循环，推进有机肥的利用。从整体而言，在化肥面源污染治理中，应当注意区域间的相互影响，尤其是注重产业结构调整可能带来的污染转移，因此应当根据各区域省份的实际情况，适当调整产业结构，协调好经济效益和生态效益的平衡，通过生态补偿、排污权交易等手段保障区域间发展均衡。

4.2 结论

本文在 1997—2018 年中国 31 个省(市、自治区)化肥面源污染排放强度核算的基础上，运用 ArcGIS 空间自相关分析和热点分析空间统计模型，分析了化肥面源污染排放强度时空格局演变特征，并根据该特征，将全国分为化肥面源污染排放强度的热点区、冷点区和非热(冷)点区 3 组，在空间异质性条件下模拟和预测各组化肥面源污染和人均农业产值间的时间路径关系，得出以下结论：

1)我国化肥面源污染排放强度总体较高，且省际差异较大。从时间上看，各省化肥面源污染排放强度变化趋势各异，表现出不同的升降趋势；从空间上看，空间自相关分析表明，我国化肥面源污染排放强度表现出显著的空间正向自相关，呈现为集聚模式，集聚程度近年有所下降；热点分析显示，我国 1997—2018 年化肥面源污染排放强度时空格局演变较为稳定，热点区主要分布在华中地区和华南地区，黄淮海地区的热点程度下降较为明显，冷点区主要集中在西部地区和东北的黑龙江。各区域间表现出一定的空间溢出效应。

2)化肥面源污染排放强度时空格局演变特征分组的 EKC 模拟结果表明，我国化肥面源污染与农业经济增长之间存在着显著的非线性 EKC 关系，并且各组 EKC 时间路径曲线形状和拐点存在明显差异。热点区呈现为“倒 U 型”曲线、冷点区和非热(冷)点区呈现为“倒 N 型”曲线。我国大多数省份正处在化肥面源污染状况随农业经济发展而恶化的阶段，且恶化的原因由于区域特质的不同存在差异，亟需进一步因时因地推进各区域化肥面源污染防治，并注意区域间的相互影响，实现区域间的协同治理。

3)化肥面源污染 EKC 的时间路径预测表明，热点区上海、冷点区的青海和西藏以及非热(冷)点区的多数省份距离曲线拐点仍较远，需因时因地施策，促使拐点尽快到来。

参考文献 References

[1] 朱宁，曹博，秦富. 基于化肥削减潜力及碳减排的小麦生产效率[J]. 中国环境科学, 2018, 38(2): 784–791
ZHU N, CAO B, QIN F. Research of wheat production efficiency based on fertilizer reduction potential and carbon emission reduction[J]. China Environmental Science, 2018, 38(2): 784–791

[2] 万宝瑞. 新形势下我国农业发展战略思考[J]. 农业经济问题, 2017, 38(1): 4–8
WAN B R. Thoughts on China’s agricultural development strategy under the new situation[J]. Issues in Agricultural Economy, 2017, 38(1): 4–8

[3] 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
JIN S Q, SHEN G Y. To get rid of the predicament and green transformation of agricultural nonpoint source (NPS) pollution[J]. Reform, 2013, (5): 79–87

[4] 仇焕广，栾昊，李瑾，等. 风险规避对农户化肥过量施用行为的影响[J]. 中国农村经济, 2014, (3): 85–96
QIU H G, LUAN H, LI J, et al. Impact of risk aversion on farmers’ excessive fertilizer application behavior[J]. Chinese Rural Economy, 2014, (3): 85–96

[5] 栾江, 仇焕广, 井月, 等. 我国化肥施用量持续增长的原因分解及趋势预测[J]. 自然资源学报, 2013, 28(11): 1869–1878
LUAN J, QIU H G, JING Y, et al. Decomposition of factors contributed to the increase of China's chemical fertilizer use and projections for future fertilizer use in China[J]. Journal of Natural Resources, 2013, 28(11): 1869–1878

[6] 徐卫涛, 张俊飚, 李树明, 等. 循环农业中的农户减量化投入行为分析——基于晋、鲁、鄂三省的化肥投入调查[J]. 资源科学, 2010, 32(12): 2407–2412
XU W T, ZHANG J B, LI S M, et al. Behavioral analysis of reducing investments for farming families in circular agriculture: A case study on Shanxi, Shandong, and Hubei Provinces based on the investigation of chemical fertilizer input[J]. Resources Science, 2010, 32(12): 2407–2412

[7] GROSSMAN G M, KRUEGER A B. Environmental Impacts of a North American Free Trade Agreement[R]. Cambridge, MA: National Bureau of Economic Research, 1991

[8] ANTLE J M, HEIDEBRINK G. Environment and development: Theory and international evidence[J]. Economic Development and Cultural Change, 1995, 43(3): 603–625

[9] MCCONNELL K E. Income and the demand for environmental quality[J]. Environment and Development Economics, 1997, 2(4): 383–399

[10] 孙大元, 杨祁云, 张景欣, 等. 广东省农业面源污染与农业经济发展的关系[J]. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(S1): 102–105
SUN D Y, YANG Q Y, ZHANG J X, et al. Positive analysis on the relationship between agriculture non-point source pollution and economic growth of Guangdong Province[J]. China Population, Resources and Environment, 2016, 26(S1): 102–105

[11] 张平淡, 袁赛. 决胜全面小康视野的农民收入结构与农业面源污染治理[J]. 改革, 2017, (9): 98–107
ZHANG P D, YUAN S. Farmers' income structure and agricultural non-point source pollution control from the perspective of determining the victory overall well-off society[J]. Reform, 2017, (9): 98–107

[12] 揭昌亮, 王金龙, 庞一楠. 中国农业增长与化肥面源污染: 环境库兹涅茨曲线存在吗?[J]. 农村经济, 2018, (11): 110–117
JIE C L, WANG J L, PANG Y N. China's agricultural growth and fertilizer non-point source pollution: Does the environmental Kuznets curve exist?[J]. Rural Economy, 2018, (11): 110–117

[13] 沈能, 张斌. 农业增长能改善环境生产率吗?——有条件"环境库兹涅茨曲线"的实证检验[J]. 中国农村经济, 2015, (7): 17–30
SHEN N, ZHANG B. Can agricultural growth improve environmental productivity? — An empirical test of conditional "environmental Kuznets curve"[J]. Chinese Rural Economy, 2015, (7): 17–30

[14] ALDY J E. Per capita carbon dioxide emissions: Convergence or divergence?[J]. Environmental and Resource Economics, 2006, 33(4): 533–555

[15] WAGNER M. The carbon Kuznets curve: A cloudy picture emitted by bad econometrics?[J]. Resource and Energy Economics, 2008, 30(3): 388–408

[16] 刘扬, 陈劭锋, 张云芳. 中国农业 EKC 研究: 以化肥为例[J]. 中国农学通报, 2009, 25(16): 263–267
LIU Y, CHEN S F, ZHANG Y F. Study on Chinese agricultural EKC: Evidence from fertilizer[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2009, 25(16): 263–267

[17] 杜江, 刘渝. 中国农业增长与化学品投入的库兹涅茨假说及验证[J]. 世界经济文汇, 2009, (3): 96–108
DU J, LIU Y. Hypothesis and verification of the Kuznets curve relationship between agricultural growth and chemical inputs in China[J]. World Economic Papers, 2009, (3): 96–108

[18] 吴玉鸣, 田斌. 省域环境库兹涅茨曲线的扩展及其决定因素——空间计量经济学模型实证[J]. 地理研究, 2012, 31(4): 627–640
WU Y M, TIAN B. The extension of regional Environmental Kuznets Curve and its determinants: An empirical research based on spatial econometrics model[J]. Geographical Research, 2012, 31(4): 627–640

[19] 陈勇, 冯永忠, 杨改河. 农业非点源污染源的环境库兹涅茨曲线实证研究——基于陕西省农业投入和废弃物排放的研究[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(3): 191–198
CHEN Y, FENG Y Z, YANG G H. Empirical study on Environmental Kuznets Curve of non-point source pollution — A case study of agricultural input and agricultural waste's output in Shaanxi Province[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2010, 28(3): 191–198

[20] 陈勇, 李首成, 税伟, 等. 基于 EKC 模型的西南地区农业生态系统碳足迹研究[J]. 农业技术经济, 2013, (2): 120–128
CHEN Y, LI S C, SHUI W, et al. Study on carbon footprint of agro-ecosystem in Southwest China based on EKC model[J]. Journal of Agrotechnical Economics, 2013, (2): 120–128

[21] 石文香, 陈盛伟. 中国化肥面源污染排放驱动因素分解与 EKC 检验[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(5): 1–7
SHI W X, CHEN S W. The drivers of fertilizer non-point source pollution in China and the environmental Kuznets curve characteristics[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2019, 33(5): 1–7

[22] 侯孟阳, 姚顺波. 异质性条件下化肥面源污染排放的 EKC 再检验——基于面板门槛模型的分组[J]. 农业技术经济, 2019, (4): 104–118
HOU M Y, YAO S B. EKC retest of fertilizer non-point source pollution emission under heterogeneous conditions — Grouping based on panel threshold model[J]. Journal of Agrotechnical Economics, 2019, (4): 104–118

[23] 田素妍, 郑微微, 周力. 中国低碳养殖的环境库兹涅茨曲线特征及其成因分析[J]. 资源科学, 2012, 34(3): 481–493
TIAN S Y, ZHENG W W, ZHOU L. Characteristics of environmental Kuznets curve for the low carbon breeding in China and its causes[J]. Resources Science, 2012, 34(3): 481–493

[24] 张陈俊, 章恒全, 陈其勇, 等. 用水量与经济增长关系的实证研究[J]. 资源科学, 2015, 37(11): 2228–2239
ZHANG C J, ZHANG H Q, CHEN Q Y, et al. Empirical research on the relationship between water use and economic growth[J]. Resources Science, 2015, 37(11): 2228–2239

[25] 张月, 潘柏林, 李锦彬, 等. 基于库兹涅茨曲线的中国工业用水与经济增长关系研究[J]. 资源科学, 2017, 39(6): 1117–1126
ZHANG Y, PAN B L, LI J B, et al. The relationship analysis

between Chinese industrial water use and economic growth based on the Kuznets Curve[J]. Resources Science, 2017, 39(6): 1117–1126

[26] 金书秦, 沈贵银, 魏珣, 等. 论农业面源污染的产生和应对[J]. 农业经济问题, 2013, 34(11): 97–102
JIN S Q, SHEN G Y, WEI X, et al. On the emergence and response of agricultural non-point source pollution[J]. Issues in Agricultural Economy, 2013, 34(11): 97–102

[27] 史常亮, 李赟, 朱俊峰. 劳动力转移、化肥过度使用与面源污染[J]. 中国农业大学学报, 2016, 21(5): 169–180
SHI C L, LI Y, ZHU J F. Rural labor transfer, excessive fertilizer use and agricultural non-point source pollution[J]. Journal of China Agricultural University, 2016, 21(5): 169–180

[28] 赖斯芸, 杜鹏飞, 陈吉宁. 基于单元分析的非点源污染调查评估方法[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2004, 44(9): 1184–1187
LAI S Y, DU P F, CHEN J N. Evaluation of non-point source pollution based on unit analysis[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2004, 44(9): 1184–1187

[29] 陈敏鹏, 陈吉宁, 赖斯芸. 中国农业和农村污染的清单分析与空间特征识别[J]. 中国环境科学, 2006, 26(6): 751–755
CHEN M P, CHEN J N, LAI S Y. Inventory analysis and spatial distribution of Chinese agricultural and rural pollution[J]. China Environmental Science, 2006, 26(6): 751–755

[30] 赖斯芸. 非点源污染调查评估方法及其应用研究[D]. 北京: 清华大学, 2004
LAI S Y. Study on non-point sources pollution investigation and evaluation method and its application[D]. Beijing: Tsinghua University, 2004

[31] 郑田甜, 赵筱青, 卢飞飞, 等. 云南星云湖流域种植业面源污染驱动力分析[J]. 生态与农村环境学报, 2019, 35(6): 730–737
ZHENG T T, ZHAO X Q, LU F F, et al. Analysis on the driving force of farming non-point source pollution in the Xingyun Lake Basin of Yunnan Province[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2019, 35(6): 730–737

[32] 陆文聪, 刘聪. 化肥污染对粮食作物生产的环境惩罚效应[J]. 中国环境科学, 2017, 37(5): 1988–1994
LU W C, LIU C. The “environmental punishment” effect of fertilizer pollution in grain crop production[J]. China Environmental Science, 2017, 37(5): 1988–1994

[33] 张立新, 朱道林, 杜挺, 等. 基于 DEA 模型的城市建设用地利用效率时空格局演变及驱动因素[J]. 资源科学, 2017, 39(3): 418–429
ZHANG L X, ZHU D L, DU T, et al. Spatiotemporal pattern evolvement and driving factors of urban construction land use efficiency using data envelopment analysis[J]. Resources Science, 2017, 39(3): 418–429

[34] 余文梦, 孙小霞, 苏时鹏. 省域农用地猪粪负荷强度时空演变分析[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(3): 494–506
YU W M, SUN X X, SU S P. Temporal and spatial changes in pig manure load in agricultural lands in China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(3): 494–506

[35] SHAFIK N, BANDYOPADHYAY S. WPS 904 Economic growth and environmental quality: Time series and cross-country evidence[R]. Washington, DC: The World Bank, 1992

[36] BOYCE J K. Inequality as a cause of environmental degradation[J]. Ecological Economics, 1994, 11(3): 169–178

[37] 姚东恒, 裴久渤, 汪景宽. 东北典型黑土区耕地质量时空变化研究[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(1): 104–114
YAO D H, PEI J B, WANG J K. Temporal-spatial changes in cultivated land quality in a black soil region of Northeast China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(1): 104–114

[38] 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 S Q, XING X X. Trend analysis, policy evaluation, and recommendations of agricultural non-point source pollution[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, 51(3): 593–600

[39] 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 Q P. Spatio-temporal changes of fertilization environmental risk of China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2017, 36(7): 1247–1253

[40] 田若蘅, 黄成毅, 邓良基, 等. 四川省化肥面源污染环境风险评估及趋势模拟[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(11): 1739–1751
TIAN R H, HUANG C Y, DENG L J, et al. Environmental risk assessment and trend simulation of non-point source pollution of chemical fertilization in Sichuan Province, China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(11): 1739–1751

[41] 孙攀, 吴玉鸣, 鲍曙明, 等. 经济增长与雾霾污染治理: 空间环境库兹涅茨曲线检验[J]. 南方经济, 2019, 38(12): 100–117
SUN P, WU Y M, BAO S M, et al. A study on economic growth and smog pollution: Testing spatial environmental Kuznets curve hypothesis in China[J]. South China Journal of Economics, 2019, 38(12): 100–117

[42] WYCKOFF A W, ROOP J M. The embodiment of carbon in imports of manufactured products: Implications for international agreements on greenhouse gas emissions[J]. Energy Policy, 1994, 22(3): 187–194

[43] SURI V, CHAPMAN D. Economic growth, trade and energy: Implications for the environmental Kuznets curve[J]. Ecological Economics, 1998, 25(2): 195–208

[44] GAWANDE K, BERRENS R P, BOHARA A K. A consumption-based theory of the environmental Kuznets curve[J]. Ecological Economics, 2001, 37(1): 101–112

[45] STERN D I, COMMON M S, BARBIER E B. Economic growth and environmental degradation: The environmental Kuznets curve and sustainable development[J]. World Development, 1996, 24(7): 1151–1160

[46] 郑保利, 梁流涛, 李明明. 1998—2016 年中国地级以上城市 $PM_{2.5}$ 污染时空格局[J]. 中国环境科学, 2019, 39(5): 1909–1919
ZHENG B L, LIANG L T, LI M M. Analysis of temporal and spatial patterns of $PM_{2.5}$ in prefecture-level cities of China from 1998 to 2016[J]. China Environmental Science, 2019, 39(5): 1909–1919

[47] JÄNICKE M, BINDER M, MÖNCH H. ‘Dirty Industries’: Patterns of change in industrial countries[J]. Environmental and Resource Economics, 1997, 9(4): 467–491

[48] 崔鑫生, 韩萌, 方志. 动态演进的倒“U”型环境库兹涅茨曲线[J]. 中国人口·资源与环境, 2019, 29(9): 74–82
CUI X S, HAN M, FANG Z. Inverted ‘U’-shape of EKC with dynamic evolution trend[J]. China Population, Resources and Environment, 2019, 29(9): 74–82