

# 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

邓晴晴<sup>1,2</sup>, 李二玲<sup>1,2,3</sup>, 任世鑫<sup>1,2</sup>

(1. 河南大学黄河文明与可持续发展研究中心暨黄河文明传承与现代文明建设河南省协同创新中心/农业与农村可持续发展研究所/环境与规划学院, 开封 475004; 2. 河南省区域经济研究中心, 开封 475004; 3. 城乡协调发展河南省协同创新中心/河南省城乡空间数据挖掘院士工作站, 郑州 450000)

**摘要:** 农业集聚的环境效应相比其他产业更为复杂,然而学术界对此探讨较少。在理论分析的基础上,利用2007—2015年中国337个地级市面板数据,核算农业集聚水平与农业面源污染排放量,并采用空间分析技术、计量模型,实证探究农业集聚与农业面源污染的时空特征及农业集聚对农业面源污染的门槛效应。结果显示:①农业集聚与COD、TN、TP三种农业面源污染在时序变化、空间布局、空间关联以及空间趋势变化上特征相异。②农业集聚对COD、TN、TP农业面源污染皆呈现正相关的单门槛效应。低于门槛值阶段,农业集聚水平的提高显著加剧了农业污染,集聚水平跨过门槛值后,污染加剧形势有所缓和。③农业集聚与农业面源污染之间经历的两个阶段,取决于规模效应、结构效应、技术效应、社会效应、累积效应分别对农业面源污染排放的加剧与制约作用。随着农业集聚水平提高,各效应增污作用明显,导致污染水平显著提高,进入高于门槛值的阶段,各效应对污染排放的抑制能力提升,削弱了部分负环境外部效应。④农业经济水平、农业生产条件在一定程度上加剧了COD、TN、TP污染;畜牧业结构、环境规制对COD、TP污染存在显著的正相关关系;生产者素质的提高可以影响农户生产行为并改善农业环境。⑤农业集聚对COD污染的降污效应较弱,农业COD污染较为严重且主要来源于畜牧业养殖,畜牧业污染防治亟待加强。

**关键词:** 农业集聚;农业面源污染;时空特征;门槛效应

DOI: 10.11821/dlyj020181090

## 1 引言

作为农业大国,中国近年来的农业发展成就显著。但也伴随着一系列备受关注的問題,其中以农业环境问题尤为突出,比如农业资源浪费严重、农业生产资料使用不当、生态环境恶化等难题,均亟待重视与解决。农业部于2015年发布《关于打好农业面源污染防治攻坚战的实施意见》,指出中国面临严峻的农业面源污染形势,加强农业面源污染治理,改善农业污染状况已刻不容缓。与此同时,目前农业现代化生产朝着适度规模化、生产集约化发展,党的十九大报告中强调要“构建现代农业产业体系,发展多种形

收稿日期: 2018-10-08; 修订日期: 2020-01-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(41971222); 教育部人文社会科学重点研究基地重大项目(15JJDZONGHE008); 河南省自然科学基金项目(182300410144); 河南省哲学社会科学规划项目(2019BJJ019); 河南大学一流学科培育项目(2018YLTD16, 2019YLZDYJ12)

作者简介: 邓晴晴(1991-),女,河南项城人,博士研究生,主要从事产业集聚与区域创新发展研究。

E-mail: dqq0801@126.com

通讯作者: 李二玲(1969-),女,河南兰考人,教授,博士生导师,主要从事产业集聚与区域创新发展研究。

E-mail: erlingli@126.com

式适度规模经营, 实现小农户和现代农业发展的有机衔接”。因此, 合理的农业集聚已成为推动农业提质增效、绿色高质量发展的有效选择。诸多现象已表明, 工业集聚在一定程度上是会加剧污染排放的。那么, 农业集聚是否会呈现同样的变化规律呢? 从理论上来看, 产业集聚对环境的影响是双向的, 既可以产生正环境外部性, 同时具有负环境外部性<sup>[1-3]</sup>, 即伴随着农业集聚水平的提高, 既可能加剧污染, 亦可能削弱污染程度。值得关注的是, 农业具有生物特性和环境自净能力, 其污染效应会更具有复杂性。那么, 农业集聚与农业面源污染之间是否存在某种联系? 这种联系是否具有可探寻的规律? 农业集聚对农业面源污染到底存在什么样的影响以及如何产生这些影响? 厘清这些问题, 有助于解析农业集聚化发展模式下的环境效应, 以探寻改善农业环境、支撑农业生态建设、提高农业资源利用率、推进农业现代化进程的科学发展途径。

针对产业集聚<sup>[4-7]</sup>与农业污染<sup>[8-10]</sup>, 目前学术界与此相关的研究成果丰富, 但在产业集聚与环境污染的关系方面仍未形成一致结论, 关键的争论点在于产业集聚对环境的影响是正外部性占据主导地位还是负外部性占据主导地位, 并形成产业集聚能够改善污染<sup>[11,12]</sup>、产业集聚加剧环境污染<sup>[13]</sup>、二者关系不确定<sup>[14,15]</sup>三种不同的观点。然而这些关于产业集聚环境效应的研究, 大多集中在国家尺度或省级尺度的制造业方面<sup>[16,17]</sup>, 且在现象与结果的解释上缺乏对污染效应具体是如何产生的深入探究, 而针对农业集聚环境效应的研究尚不多见<sup>[18,19]</sup>, 关于更小尺度如地级市层面农业集聚与农业面源污染关系的研究更为少见, 尤其缺乏农业集聚对农业污染影响的理论分析框架的构建。面对中国农业日益集聚的发展趋势以及农业面源污染日益加剧的形势, 探究这二者之间的联系对于解析当今农业现实发展问题具有重大意义。

鉴于此, 首先从理论层面分析了农业集聚效应对农业面源污染的影响。其次, 采用2007—2015年中国337个地级市面板数据开展实证分析, 测算农业集聚指数与不同农业面源污染物的排放量, 对农业集聚水平以及各类农业面源污染排放量的时空特征进行分析。进一步运用面板门槛模型探索农业集聚对农业面源污染的影响规律, 以期在探寻科学的农业发展模式以及改善农业污染方面提供合理的参考建议。

## 2 理论分析

### 2.1 概念界定

本文的农业集聚是对生产要素在地理空间分布趋势的表达, 指农业生产资源向特定范围集聚的过程, 反映了要素分布集中化以及生产集约化的主要特征。具体地, 从特定区域来说, 即该区域的农业生产在其所处的整个区域的占有份额, 一定程度上说明了该区域农业生产的集聚水平。农业污染目前主要以农业面源污染的形式呈现<sup>[20]</sup>, 主要包括化学需氧量(COD)、总氮(TN)、总磷(TP)这三类污染物。本文主要探究产业层面的污染状况, 因此主要采用农业生产形成的COD、TN、TP污染排放量来衡量农业面源污染(农村生活污染除外)。

### 2.2 影响机制分析

**2.2.1 农业集聚的多重效应** 产业集聚过程中, 生产主体的一些行为对其他主体产生影响, 带来集聚外部性(溢出效应), 形成诸如规模效应、结构效应、技术效应<sup>[15,17,21-23]</sup>等一系列集聚效应, 继而对环境产生影响。农业集聚产生的规模效应能够通过改变生产资料的利用效率以及引起生产方式的变化来影响农业污染的产生与处理; 农业集聚产生内部行业结构的调整, 引起农林牧渔等细分行业的构成变化, 与此同时土地利用方式发生改

变，导致不同污染程度的种植用地与养殖场的扩大或减小。然而不同的生产类型所造成的污染程度是不同的；迈克尔·波特指出产业集聚能够增加竞争力，农业集聚同样可以创造竞争优势，推动内生的技术变化与创新<sup>[24]</sup>，促进种养技术以及污染治理技术的革新。

另外，农业发展还具有自身的特殊性。首先，农业生产决策直接取决于农户个体，而农业生产过程具有透明性，传播的农业信息为“显性知识”。伴随着农业集聚水平的提高，农户较强的“模仿能力”以及“从众性”将利于农业的信息与生产技术在农户中间快速传播。同时，“环境竞次”理论的竞争效益指出落后区域对环境规制的放松将增强其对经济增长的利益需求，因此，农村地区农户普遍追求利益最大化的行为极易引发社会效应而影响农业污染产出<sup>[25,26]</sup>；其次，农业面源污染具有累积性，农业集聚进一步促成了各类污染构成元素的汇集，集聚区内部不同的农业生产污染项目能够以协同的方式进行，造成农业污染的累加，形成累积效应。

**2.2.2 农业集聚效应对农业面源污染的影响机制** 农业集聚能够产生规模效应、结构效应、技术效应，对农业面源污染又具有特殊的社会效应与累积效应。因此，本文基于各效应在农业生产过程中的具体作用，构建理论分析框架(图1)，来分析农业集聚对农业面源污染的具体影响机制。

(1) 规模效应。种养业规模扩大，生产资源投入则会增加。化肥、农药等投入过大就会产生饱和或过剩，同时农业废弃物增多造成污染物排放总量增加；但另一方面，伴随规模化水平持续提高，能充分发挥农业生产资料的潜力，提升利用率。规模化生产有助于实现生产的集约化、管理的科学化、资源配置的高效化，并提高资源的利用率，便于对农业废弃物集中处理，降低污染。

(2) 结构效应。产业结构升级是改善环境的重要因素<sup>[27]</sup>。高污染行业的进入对环境有较大负面影响<sup>[28]</sup>，但农业集聚持续发展的态势会引起农业生产的调整，农业生产环境管制力度提升，绿色生态种养园区的引进，污染农田的整治保护，污染养殖场的查处等一系列措施的有效开展，则会降低农业生产中高污染行业的比例。

(3) 技术效应。技术进步具有“双向性”<sup>[29]</sup>，化学技术以及灌溉技术等现代化科学技术的滥用对农业生态环境有一定负面影响，存在潜在危害；而另一方面，集聚带来的规模化生产经营，为先进生产技术的实施以及先进设备的应用提供了便利，有助于从源头把控，降低污染物产生的概率或者高效处理已产生的污染物。另外，集聚将带动农业的高质量发展，推动绿色升级转型，加快农业绿色生产、废弃物再利用、污染物治理等技术的创新与应用。

(4) 社会效应。农户对彼此的生产行为影响较深，农业生产的地理集中促进了整个行业种养信息的快速传播。有些农户使用绿色的种养技术，而不乏有些农户存在粗放式的生产陋习。随着农业集聚程度的增加，这些行为加速扩散，强化了农户在农业生产中

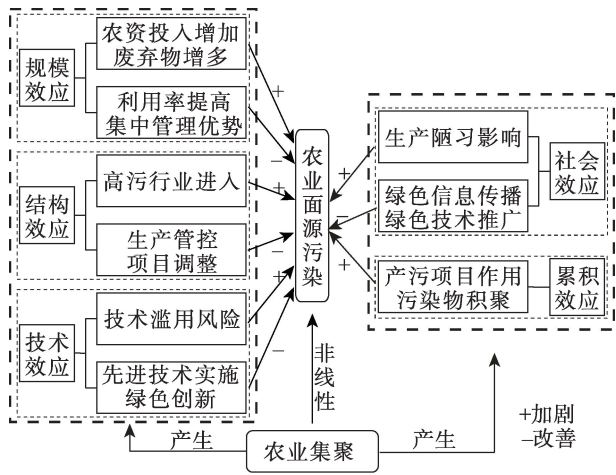


图1 农业集聚对农业面源污染的影响机制  
Fig. 1 The influence mechanism of agricultural agglomeration on agricultural non-point source pollution

对环境的正向或者负向影响<sup>[30]</sup>。

(5) 累积效应。农业集聚伴随着各类农业生产资源朝向相同区域的汇聚, 造成污染项目相互作用, 各种污染物出现结合或叠加现象, 给区域带来超负荷的污染排放, 而区域内的吸纳转变与净化能力是有限的, 故而加重污染物沉积, 加剧污染形势。随着农业集聚水平提高, 累积效应以负环境外部性占据主导地位。

农业集聚通过产生的各效应分别在农业生产的各个环节发挥作用, 这些作用对环境的最终影响是各效应的正外部性与负外部性相互博弈的结果。环境库兹涅兹曲线(EKC)理论认为, 经济规模的扩张在一定阶段内会恶化环境, 但达到一定程度则会对环境呈现正面影响<sup>[31]</sup>。农业集聚是否也具有这样的门槛效应? 理论上, 农业集聚处于不同水平时, 各效应的正负外部性的显著性不同, 最终加剧或者改善农业面源污染。所以农业集聚对农业面源污染存在复杂影响, 很大程度上表达出复杂的非线性关系, 即可能存在门槛关键点, 由关键点划分出的不同阶段, 其影响规律是变化的, 形成一定的门槛效应。故本文试图基于门槛效应来探索农业集聚对农业面源污染的非线性影响。

### 3 研究方法、变量选择及数据来源

#### 3.1 研究方法

**3.1.1 基尼系数** 农业集聚是一种农业分布不均衡现象, 基尼系数是反映不均衡程度的重要指标, 因此采用基尼系数, 基于地级市数据来测算全国层面的农业集聚程度。这里采用一种相对简便易用的基尼系数算法<sup>[32]</sup>。计算公式如下:

$$G = 1 - \frac{1}{n} \left( 2 \sum_{i=1}^{n-1} L_i + 1 \right) \quad (1)$$

式中:  $G$  为农业基尼系数;  $n$  是对样本均等化分组后的组数, 本文对农业产值按从小到大进行排序, 把全国 337 个地级市分成 30 组, 即  $n = 30$ ;  $L_i$  是在全国农业总产值中, 累计前  $i$  组的农业总产值所占比例。基尼系数越大表明产业分布越趋于集聚, 文中主要采用其来探究中国农业集聚在全国层面上的时序变化规律, 以对中国农业集聚与三种农业面源污染物的关系进行整体对比。

**3.1.2 产业平均地理集聚率** 产业平均地理集聚率可以测算具体区域的产业集聚水平, 反映出测算单元的集聚程度, 表达出产业集聚在空间上的分布状态。所以采用产业平均地理集聚率来计算中国不同地市的农业集聚程度<sup>[33]</sup>。计算公式为:

$$V_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \frac{Y_{ij}}{Y_j} \times 1000 \quad (2)$$

式中:  $V_i$  为地市  $i$  的农业平均地理集聚率;  $Y_{ij}$  为农产品  $j$  在地市  $i$  的产量;  $Y_j$  为农产品  $j$  在全国的产量;  $m$  为农产品的种类数 (计算采用的农产品对应产污单元)。由于  $\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \frac{Y_{ij}}{Y_j}$  得到的原始农业平均地理集聚率数值相对较小, 所以在该计算结果的基础上同等扩大 1000 倍, 便于比较与分析。  $V_i$  结果越大, 则说明地市  $i$  的农业集聚水平较高。文中采用该指标分析农业集聚的空间分布、空间关联以及空间趋势, 下文的门槛模型中农业集聚程度也由该指标表示。

**3.1.3 清单分析法** 农业面源污染物排放量的测算主要采用清单分析法<sup>[34,35]</sup>, 计算公式为:

$$E_{ij} = EU_{ij} \rho_{ij} (1 - \eta_{ij}) C_{ij} (EU_{ij}, S) \quad (3)$$

$$= PE_{ij}(1-\eta_{ij})C_{ij}(EU_{ij}, S)$$

式中： $E_{ij}$ 为污染物 $j$ 在地区 $i$ 的排放量； $EU_{ij}$ 为污染物 $j$ 在地区 $i$ 的指标统计数； $\rho_{ij}$ 为污染物 $j$ 在地区 $i$ 的产污系数； $\eta_{ij}$ 为相关资源的利用效率； $PE_{ij}$ 为污染物 $j$ 在地区 $i$ 的产生量； $C_{ij}$ 为污染物 $j$ 在地区 $i$ 的排放系数，它取决于所研究污染物的自身特征以及研究单元的区域空间特征（ $S$ ）。这里选取农田固体废物对COD的排放贡献，结合以上公式，来具体阐述转换估算过程。首先，基于稻米、小麦、玉米等农田固体的产量以及各作物废弃率（即秸秆粮食比）分别获得其废弃质量；其次，采用废弃质量以及不同区域农田固体废物利用结构（肥料、饲料、燃料、原料、焚烧、堆放等），获得各区域、各农田固体废弃物的不同利用情况；然后，基于不同农田固体废弃物的COD产污系数，获取不同利用结构下、不同区域、各农田固体废弃物的COD产污量；最后，根据产污量以及农田固体废物在不同区域、不同利用结构下的COD排放流失率得到农田固体废弃物的COD排放量。

核算系数的确定，主要参考国家相关统计部门公布的有效数据以及现有文献研究<sup>[34,35]</sup>中的相关资料。其中，化肥利用率采用农业部公布的2005年与2015年的平均水平，复合肥中氮、磷、钾养分比例采用1:1:1。需要说明的是，鉴于地级市尺度核算系数的难获得性，文中部分地级市核算系数采用其所在省份的平均水平。

**3.1.4 计量模型设定** 门槛模型在探索非线性问题方面发挥重要作用，它能够挖掘变量之间跳跃性或者突变性的变化规律，捕捉到变量之间的变化信息<sup>[36]</sup>。本文借鉴Hansen的门槛面板模型<sup>[37]</sup>定量分析农业集聚与农业面源污染的关系。本文的模型设定为：

$$\ln pol_{it} = \alpha_i + \beta_1 \ln agg_{it} \times I(\ln agg_{it} \leq \gamma) + \beta_2 \ln agg_{it} \times I(\ln agg_{it} > \gamma) + \beta_3 H + \varepsilon_{it} \quad (4)$$

式中： $pol$ 表示农业面源污染； $i$ 与 $t$ 分别表示地级市与年份； $agg$ 为农业集聚程度，该式中表示门槛变量； $\gamma$ 为门槛值； $I(\cdot)$ 为指示函数； $H$ 为控制变量。上述模型针对单门槛情况，双重或多重门槛模型可由此扩展得到。

## 3.2 变量选择

农业集聚方面，首先，农业基尼系数的测算指标为地级市农业产值；其次，农业平均地理集聚率测算指标为各地市不同种类农产品的产量，选取的农产品类别与农业面源污染来源中农产品种类是对应的（表1），以此来增加研究的准确性、合理性与科学性。

农业面源污染方面，生产污染主要由生产资料投入的不合理以及废弃物的处理不当引起，具体地，主要是化肥、农药等农资的不合理使用造成的残留以及农作物秸秆、畜禽粪便等废弃物处理不善带来的随意排放。受制于目前地级市尺度农药统计数据的不完善与不精细，无法对应地计算出农药流失带来的面源污染排放量，为保证计算的科学性以及数据的准确性，本文暂不对农药进行深入讨论。污染源主要选取化肥流失、农业固体废物以及养殖废弃物污染（水产养殖整体污染排放量占据比例低，且分布范围狭窄，涉及种类繁多，核算系数难以确定，故除外）。具体的农业面源污染考查单元及排放情况见表1。

表1 农业面源污染产污单元清单列表

Tab. 1 List of elementary unit for agricultural non-point source pollution

污染来源	调查单元	调查指标	单位	排放清单
化肥	氮肥、磷肥、复合肥	施用量（折纯）	万t	TN、TP
农田固体废物	稻米、小麦、玉米、豆类、薯类、油料、蔬菜	总产量	万t	COD、TN、TP
畜禽养殖	牛、猪、羊、家禽	存栏量	万头/万只	COD、TN、TP

门槛面板模型中, COD、TN、TP 污染排放为被解释变量, 农业集聚 (*agg*) 为门槛变量与核心解释变量。除此之外, 农业发展水平不同引起的农业生产资料投入量的不同、农业细分行业产污程度的差异、环保投入对污染的管控作用、生产条件的改善对生产资料利用率与废弃资源处理率的影响以及由生产者素质高低决定的生产行为均是影响农业面源污染的重要层面, 所以引入具体的影响因子来作为控制变量。

具体地, 农业经济水平 (*agdp*) 由消除价格因素影响的第一产业生产总值来表示; 农业结构具体包含了种植业结构 (*ps*) 与畜牧业结构 (*as*), 二者分别采用农业总产值 (狭义农业) 与畜牧业总产值在农林牧渔业总产值中的占比来表示; 农业环境规制 (*er*) 表达的是对环境问题的管控程度, 可以基于政府对环境管理、环境法治等方面的重视程度来衡量, 一般采用地方财政总支出来表征环境管制强度, 但目前地方财政总支出中的农业环保支出数据是有限的, 所以首先采用第一产业产值在 GDP 中的占比与地方节能环保财政总支出的乘积来估量该地区农业节能环保支出, 以此来获取农业环境管制强度, 并最终采用农业节能环保支出在该地区 GDP 的占比来表示农业环境规制; 农业生产条件 (*pc*) 综合包含了生产技术、生产基础设施、生产手段等各个方面, 所以该变量的选取涉及到农业机械总动力、农村用电量、化肥与农药使用量、有效灌溉面积等能够体现农业现代化水平的多项指标, 并采用熵值法计算多指标的综合属性值来衡量农业生产条件; 生产者素质 (*ea*) 是直接影响农业生产行为的关键因素。农户的素质高低在一定程度上与农户接受的文化教育信息相关, 而文教娱乐支出反映了农户家庭接受思维方式、行为规范、价值观念等信息的机会大小, 所以本文采用农村人均生活消费支出中人均文教娱乐支出所占比例来表征生产者素质 (表 2)。对模型中所有变量取自然对数, 以此来减小数据的异方差性以及原始属性数值造成的计量误差, 增强面板数据的平稳性。

### 3.3 数据来源

数据主要来自 2008—2016 年中国区域经济统计年鉴、各省市 (自治区) 统计年鉴、各省市 (自治区) 农业统计年鉴、中国各地级市统计年鉴、中国各地级市统计公报、各地市官方公布的统计数据以及布瑞克农业数据库, 对于部分缺失数据, 采用插值法进行补充。本文研究样本为中国 337 个地级市, 其中包括北京、天津、上海、重庆 4 个直辖市, 不包括中国香港特别行政区、中国澳门特别行政区以及中国台湾省。

表 2 变量说明

Tab. 2 Explanations of variables

变量	符号	定义	指标说明
被解释变量	<i>COD</i>	COD 污染水平	COD 排放量(t)
	<i>TN</i>	TN 污染水平	TN 排放量(t)
	<i>TP</i>	TP 污染水平	TP 排放量(t)
核心解释变量	<i>agg</i>	农业集聚水平	农业平均地理集聚率
门槛变量			
控制变量	<i>agdp</i>	农业经济水平	第一产业生产总值(亿元, 以 2007 年为基期)
	<i>ps</i>	种植业结构	(农业总产值/农林牧渔业总产值)×100(%)
	<i>as</i>	畜牧业结构	(畜牧业总产值/农林牧渔业总产值)×100(%)
	<i>er</i>	环境规制	[(节能环保支出×(第一产值/GDP)/GDP)×100(%)
	<i>pc</i>	农业生产条件	农业生产条件综合得分×1000
	<i>ea</i>	生产者素质	(农村人均文教娱乐支出/人均生活消费支出)×100(%)

## 4 农业集聚与农业面源污染的时空特征

### 4.1 时序变化

从全国层面的变化规律来看,农业集聚水平自2007年以后曲折降低,说明各地市的集聚程度整合累计后呈现下降趋势。2008年基尼系数为0.408,达到研究时间段内的最高集聚水平,2008—2012年,呈现显著的下落态势,基尼系数降至0.393。2012—2015年,农业集聚持续下降,而下降速度有所减缓。

农业面源污染呈现一定的增长趋势,与农业集聚的变化规律相异。全国水平的COD排放、TN排放与TP排放在前期较长一段时间内不断增长,最近两年开始减少。COD排放前期的增长速率高于其他两种污染物,在2014年达到1399.60万t,而在2015年的排放量略有减少。TN排放量从2007年开始增长,2013年的排放量达到研究时间段内的最高值694.87万t,在2013年之后的两年缓慢减少。TP排放与TN排放的变化规律与变化速率近乎相同,TN排放于2014年达到峰值85.74万t,而2015年是略微降低的(图2)。

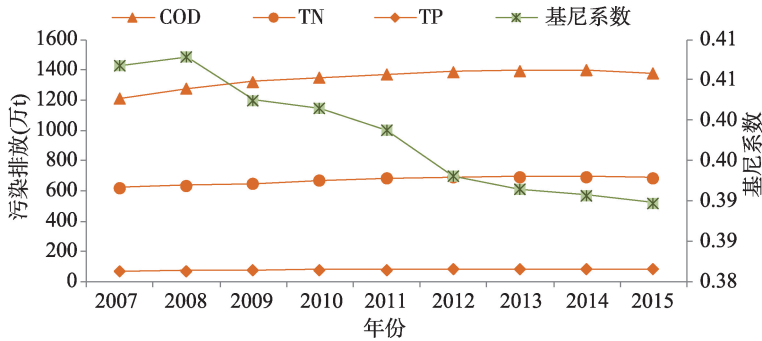


图2 2007—2015年中国农业集聚与农业面源污染变化情况

Fig. 2 The change of agricultural agglomeration and agricultural non-point source pollution in China during 2007-2015

### 4.2 空间分布

按照不同区域农业平均地理集聚率以及COD、TN、TP污染物排放量的测算结果,从小到大依次分为4个级别,分别得到2007年与2015年的空间分布图(图3)。农业集聚与三种农业面源污染的空间分布规律不同,存在空间分异特征。

农业集聚方面,区域间农业平均地理集聚率差距明显,2007年与2015年平均最小值为0.027,平均最大值高达21.871。农业集聚水平较高的区域主要集中在华中、华东北部、河北、东北、以及西南东部等地区,这些区域农业经济发展水平较高,具有良好的农业资源禀赋,农业生产优势明显,易于规模化的生产经营,集聚发展水平相对较高。农业集聚水平较低的区域集中在西部地区以及东南沿海区域,这些区域相对来说,第二、第三产业相对发达,而农业发展占据比例较小(图3a、图3b)。由空间分布的变化情况来看,局部地区的农业集聚格局有所改变。2015年相比2007年,农业集聚水平为中高以及高水平的地级市数量有略微降低的趋势,由2007年的65个转变为2015年的53个。

农业面源污染方面:① COD排放的区域差距最为明显,2007年与2015年排放量最低的地市平均排放值为0.049万t,排放量最高的地市平均排放值达17.845万t。COD高排放区域分布范围较广,主要位于河北、山东、华中、东北以及西部的部分区域(图3c、图3d)。特别地,农业发展水平较落后的西部地区COD排放量较高,主要因为该区域为中国的主要牧区,畜禽养殖业很发达,而COD排放的主要来源是畜禽养殖业,例如西藏

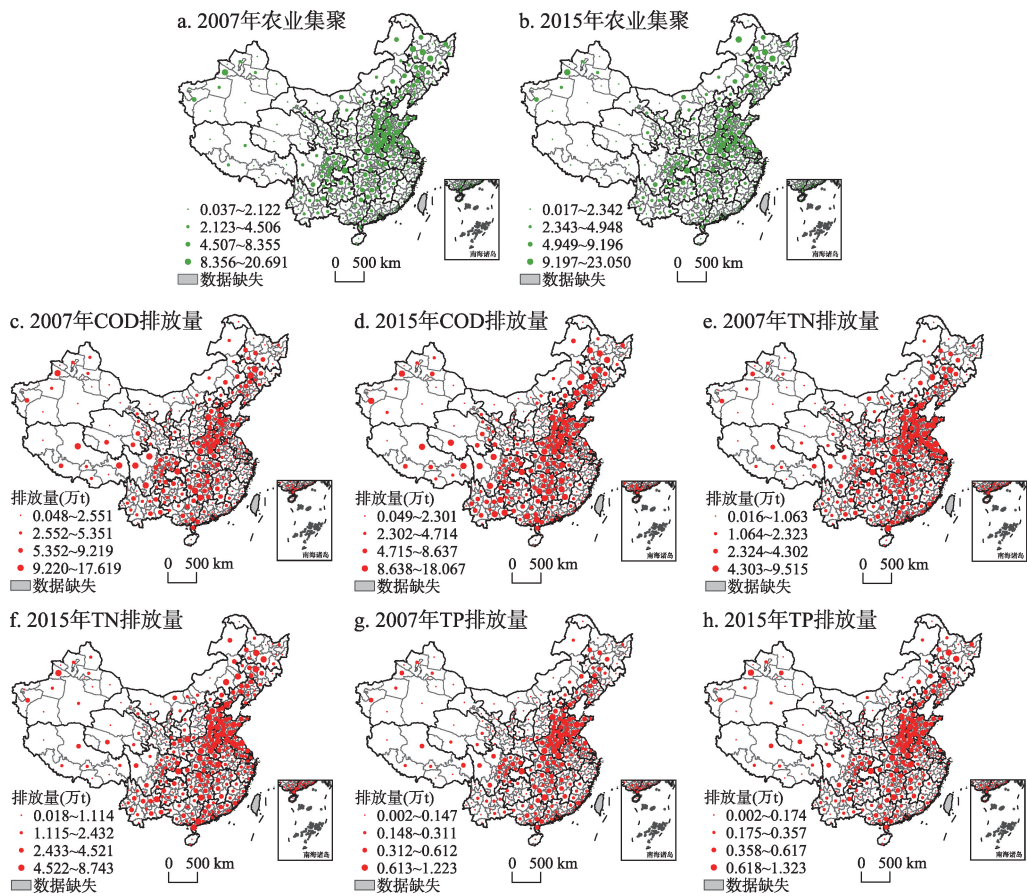


图3 中国各地市农业集聚及农业面源污染空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of agricultural agglomeration and agricultural non-point source pollution in prefecture-level cities of China

注: 此图根据国家测绘地理信息局标准地图(审图号: GS(2019)1831号)绘制而成, 底图无修改。

的那曲、昌都。2007—2015年, 处于中高以及高水平污染的地级市数量从72个增长到110个, 高污染区域有明显的增长趋势。②河北、华中、华东北部、东北等地TN排放量较高(图3e、图3f), 并在山东、河南、河北以及江苏等种植业大省形成集中连片分布区。TN排放呈现扩大的变化趋势, 高污染水平的地市数量从2007的27个增长到2015年的35个, 而低污染区域从120个地市降到108个。③TP排放量较高的区域主要分布在河北、山东、华中、东北南部以及西南部分地区(图3g、图3h), 明显地可以看出, 这些区域集中在中国种植业以及畜牧业相对发达的地区, 结合文中TP排放贡献率计算结果, 农田化肥以及畜禽养殖粪便确实是造成TP污染排放的重要源头所在。从变化情况来看, TP排放量整体变化不明显, 2007—2015年, 高污染水平的地市数量分别为75与79, 低污染地市为162与165个, 基本持平。

#### 4.3 空间关联

农业集聚与农业面源污染在空间分布上存在集中现象, 所以局部地区之间具有一定的空间关联特征。采用带渲染的热点分析输出Z得分(即图4中图例数据), 根据自然间断点分类法, 应用“冷色到暖色”进行分级渲染, 展示农业集聚及农业面源污染排放不同冷热点区域的分布格局, 进一步分析其空间关联性。由空间格局热点图可以看出, 农



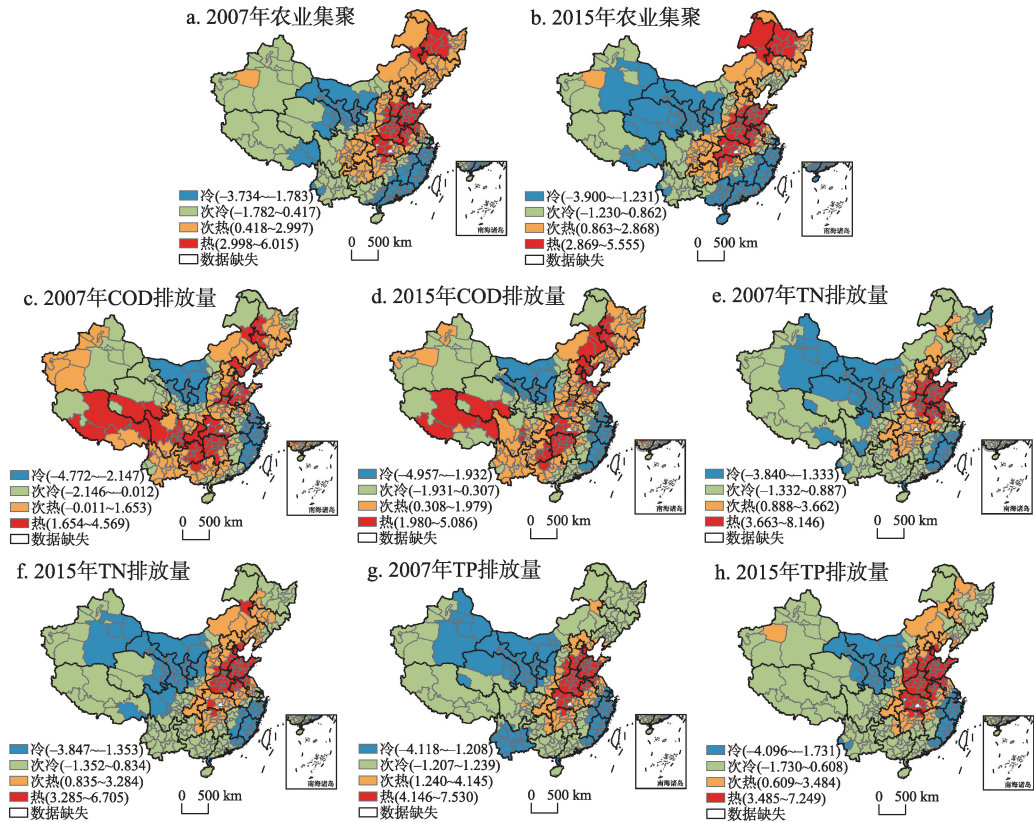


图4 中国各地市农业集聚及农业面源污染空间格局热点图

Fig. 4 Spatial autocorrelation of agricultural agglomeration and agricultural non-point source pollution in prefecture-level cities of China

注：此图根据国家测绘地理信息局标准地图（审图号：GS(2019)1831号）绘制而成，底图无修改。

业集聚与农业污染物空间集聚特征显著，其冷热点分布存在差异。

首先，农业集聚方面，由河南、山东与其周围地区以及东北的黑龙江等地构成两个热点区，冷点区在华北西部和西北东部区域连片分布，并有扩大的趋势，同时在东南沿海区域形成一个相对显著的冷点区域（图4a、图4b）。其次，农业面源污染方面：① COD排放量的热点区分布较为分散（图4c、图4d），热点区范围较大的区域集中在西北部，冷点有中部与东南两个连片区。② TN排放量的热点分布范围相对较小（图4e、图4f），主要集中在河南、山东为主的中东部地区，冷点区主要有西部及东南两片集中区。③ TP排放量的热点与其周围次热点区域所占面积较小（图4g、图4h），主要是由河南、山东等地区形成的连片区域，冷点区域主要位于西北部与东南的部分地区。

#### 4.4 空间趋势

借助探索性空间数据趋势分析技术，分别绘制农业集聚以及农业面源污染在2007年与2015年的空间趋势图，进一步揭示农业集聚和农业面源污染的空间变化情况，分析空间趋势特征。

农业集聚在东西方向以及南北方向上的空间趋势基本呈现线性变化规律，农业集聚水平分布表现出东高西低、北高南低的状态，2015年较2007年而言，东部集聚水平有所降低，但空间趋势特征基本不变（图5a、图5b）。由农业面源污染的空间变化来看：①

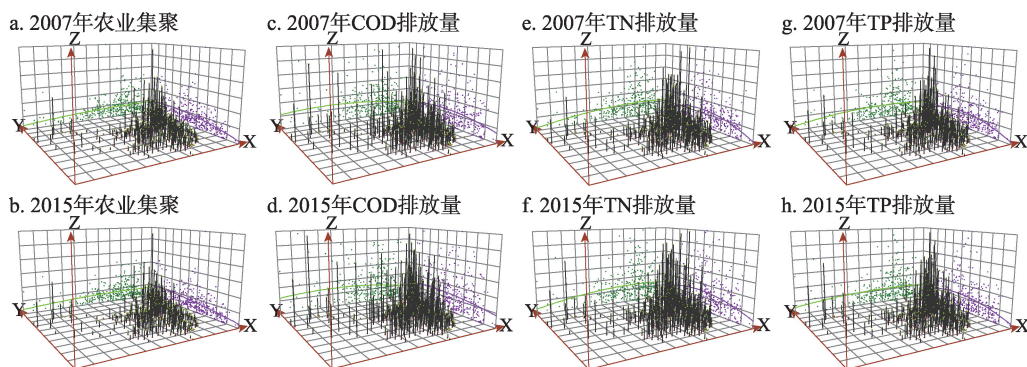


图5 中国各地市农业集聚及农业面源污染空间趋势

Fig. 5 Trend distribution of agricultural agglomeration and agricultural non-point source pollution in prefecture-level cities of China

COD 排放东西以及南北方向上, 由中心向边缘递减 (图 5c、图 5d), 表现出扁平的倒“U”型规律。2015 年的排放量增高, 趋势曲线有所上升, 南北方向上, 北部排放量增势明显, 空间趋势演变为北高南低的半抛物型态势。② TN 排在南北方向上为倒“U”型变化曲线, 中间高两边低的特征较为显著, 东西方向上呈现东高西低特征 (图 5e、图 5f)。在 2015 年, 两个方向上的基本规律维持不变, 但整体排放量是增长的, 尤其是北部地区, 排放量增幅较高。③ TP 排放与 TN 排放的空间趋势特征基本相同 (图 5g、图 5h), 2007 年和 2015 年, 东西方向上均呈东高西低的规律, 南北方向显示倒“U”型规律, 排放量在 2015 年表现出上涨迹象。

总体比较, 农业集聚水平以及 COD、TN、TP 污染水平在全国层面变化不一致, 区域层面上空间布局与空间关联分布并不存在一一对应关系, 其空间趋势及演变规律同样呈现不同的特征。由此, 从直观层面上说明农业集聚与农业面源污染的关联性较为复杂, 存在非线性关系的概率较大, 一定程度上表明了门槛效应存在的可能性。所以通过面板门槛计量模型进一步详细探讨农业集聚对农业面源污染的门槛特征。

## 5 农业集聚对农业面源污染的门槛效应

### 5.1 变量平稳性检验

本文采用 LLC 检验、TPS 检验、ADF-Fisher 检验、PP-Fisher 检验四种方法进行单位根检验, 来验证门槛模型内变量的平稳性, 以避免伪回归现象。结果显示,  $\ln pc$  的水平序列在 IPS 检验下未通过检验, 但在一阶差分后, 检验结果均能显示出平稳性。而其余所有变量的水平序列在所有检验方式下已拒绝原假设, 并在 1% 的水平上显著, 均呈现平稳趋势 (篇幅所限, 平稳性检验结果在此不予列出)。

### 5.2 门槛效应检验

根据“门槛条件”检验<sup>[7]</sup>, 获取  $\ln COD$ 、 $\ln TN$ 、 $\ln TP$  分别为被解释变量的门槛效应检验结果, 三者分别在 5%、1%、5% 的显著水平下通过单一门槛检验, 最优门槛值均为 1 个, 皆存在单门槛效应, 对应的门槛估计值分别为 0.976、-0.320、0.452, 置信区间分别是 [0.966, 0.982]、[-0.348, -0.304]、[0.427, 0.456] (表 3)。

### 5.3 门槛模型分析

**5.3.1 模型选择** 基于固定效应的面板门槛估计模型结果见表 4、表 5、表 6 中第①列。根

表3 门槛效应检验

Tab. 3 Threshold effect test

被解释变量	门槛数	F统计值	P值	1%临界值	5%临界值	10%临界值	门槛估计值	95%置信区间
lnCOD	单门槛	26.060**	0.016	26.899	20.000	16.521	0.976	[0.966, 0.982]
	双门槛	2.630	0.971	25.492	19.144	15.434		
	三门槛	5.210	0.713	24.562	17.231	14.471		
lnTN	单门槛	32.630***	0.003	25.922	19.893	16.566	-0.320	[-0.348, -0.304]
	双门槛	8.380	0.576	25.446	20.047	16.149		
	三门槛	3.800	0.926	25.866	17.970	15.593		
lnTP	单门槛	23.37**	0.040	30.472	21.795	17.365	0.452	[0.427, 0.456]
	双门槛	4.520	0.854	28.731	20.481	16.972		
	三门槛	4.120	0.891	28.251	20.413	17.156		

注：\*\*\*、\*\*、\*分别表示在1%、5%、10%的显著性水平下显著相关。

表4 门槛模型结果 (lnCOD作为被解释变量)

Tab. 4 Estimation results of threshold model (Dependent variable: lnCOD)

变量	① THR	② OLS	③ RE	④ FEI	⑤ FER	⑥ 2SLS	⑦ RT
lnagg	0.474***	0.718***	0.496***	0.474***	0.474***	0.781***	0.135***
(lnagg≤0.976)	(30.83)	(31.47)	(32.97)	(30.83)	(9.61)	(20.98)	(8.37)
lnagg	0.416***	0.610***	0.438***	0.416***	0.416***	0.687***	
(lnagg>0.976)	(30.03)	(26.76)	(32.26)	(30.03)	(8.00)	(19.32)	
lnagdp	0.358***	0.179***	0.340***	0.358***	0.358***	0.143***	0.386***
	(24.72)	(10.20)	(24.89)	(24.72)	(7.20)	(4.86)	(22.71)
lnps	-0.032	-0.244***	-0.020	-0.032	-0.032	-0.290***	-0.023
	(-1.30)	(-8.97)	(-0.81)	(-1.30)	(-0.74)	(-6.46)	(-0.78)
lnas	0.319***	0.577***	0.384***	0.319***	0.319***	0.526***	0.423***
	(14.20)	(24.46)	(17.76)	(14.20)	(6.94)	(17.30)	(16.20)
lner	0.031***	0.097***	0.043***	0.031***	0.031***	0.088***	0.019***
	(7.21)	(13.96)	(9.92)	(7.21)	(3.76)	(8.27)	(3.25)
lnpc	0.265***	0.229***	0.169***	0.265***	0.265**	0.172***	0.473***
	(4.74)	(4.81)	(3.51)	(4.74)	(2.55)	(2.94)	(7.23)
lnea	-0.016*	-0.243***	-0.029***	-0.016*	-0.016	-0.220***	-0.007
	(-1.88)	(-17.59)	(-3.34)	(-1.88)	(-1.58)	(-6.97)	(-0.72)
_cons	7.231***	8.490***	7.179***	7.231***	7.231***	8.946***	6.719***
	(42.93)	(47.30)	(45.51)	(42.93)	(20.83)	(28.87)	(34.08)
F-test	138.10			138.10			132.70
	[0.000]			[0.000]			[0.000]
LM-test			9654.92				
			[0.000]				
Hausman test			3699.42				
			[0.000]				
Wald test				89862.7			
				[0.000]			
Overidentification test						0.397	
						[0.8200]	
Weak instruments test(F statistic)						3065/1633	
						[0.000]	
R-sq	0.471	0.827	0.751	0.471	0.471	0.831	0.269
Observation	3033	3033	3033	3033	3033	2359	3033

注：①\*\*\*、\*\*、\*分别表示在1%、5%、10%的显著性水平下显著相关；②括号内为t检验值，RE、2SLS回归结果中括号内为z检验值，方括号内为P值。

表5 门槛模型结果 (lnTN作为被解释变量)

Tab. 5 Estimation results of threshold model (Dependent variable: lnTN)

变量	① THR	② OLS	③ RE	④ FEI	⑤ FER	⑥ 2SLS	⑦ RT
lnagg	0.423***	0.788***	0.442***	0.422***	0.422***	0.843***	0.095***
(lnagg≤-0.320)	(26.17)	(32.66)	(27.94)	(26.14)	(7.12)	(24.58)	(7.31)
lnagg	0.314***	0.358***	0.318***	0.315***	0.315***	0.423***	
(lnagg>-0.320)	(24.22)	(15.63)	(25.15)	(24.29)	(10.54)	(12.82)	
lnagdp	0.290***	0.118***	0.278***	0.290***	0.290***	0.083***	0.315***
	(25.36)	(7.35)	(25.63)	(25.36)	(7.49)	(3.48)	(23.08)
lnps	0.003	-0.155***	0.009	0.004	0.004	-0.187***	0.009
	(0.17)	(-6.18)	(0.47)	(0.18)	(0.13)	(-5.08)	(0.36)
lnas	0.040**	0.175***	0.068***	0.040**	0.040	0.129***	0.130***
	(2.23)	(8.08)	(3.96)	(2.23)	(0.98)	(4.53)	(6.19)
lner	0.007**	0.039***	0.013***	0.007**	0.007	0.033***	0.002
	(2.16)	(6.13)	(3.77)	(2.17)	(1.40)	(3.92)	(0.52)
lnpc	1.043***	1.070***	0.967***	1.043***	1.043***	1.010***	1.206***
	(23.55)	(24.38)	(24.78)	(23.54)	(9.23)	(18.20)	(22.95)
lnea	-0.017**	-0.115***	-0.021***	-0.017**	-0.017**	-0.104***	-0.009
	(-2.53)	(-8.94)	(-3.04)	(-2.54)	(-2.01)	(-5.01)	(-1.17)
_cons	6.909***	8.075***	6.943***	6.909***	6.909***	8.493***	6.467***
	(51.71)	(48.98)	(54.89)	(51.70)	(26.13)	(32.55)	(40.87)
F-test	188.58			188.56			180.22
	[0.000]			[0.000]			[0.000]
LM-test			10437.30				
			[0.000]				
Hausman test			411.84				
			[0.000]				
Wald test				170000			
				[0.000]			
Overidentification test						1.922	
						[0.382]	
Weak instruments test(F statistic)						1818/1871	
						[0.000]	
R-sq	0.534	0.837	0.794	0.534	0.534	0.839	0.339
Observation	3033	3033	3033	3033	3033	2359	3033

注: ①\*\*\*、\*\*、\*分别表示在1%、5%、10%的显著性水平下显著相关; ②括号内为t检验值, RE、2SLS回归结果中括号内为z检验值, 方括号内为P值。

据以上获取的门槛估计值生成虚拟变量采用不同方法重新回归, 选择最优回归模型。表4、表5、表6中第③列、第④列分别是以lnCOD、lnTN、lnTP为被解释变量的随机效应模型以及固定效应模型, 三表中第③列LM检验结果P值均为0.000, 第④列F统计量的概率皆为0.000, 由此说明随机效应模型以及固定效应模型均拒绝使用OLS混合模型的原假设, 固定效应模型以及随机效应模型均优于混合OLS模型②, 更优模型应在固定效应以及随机效应中选取。Hausman检验结果显示三个模型结果的P值均为0.000, 因此拒绝使用随机效应模型原假设, 固定效应模型优于随机效应模型。另外, 对表4、表5、表6中第④列固定效应的异方差性进行检验, Wald检验结果表明拒绝不存在异方差的原假设, 所以进一步采用稳健标准误差回归, 获得固定效应稳健回归模型, 即表4、表5、表6中第⑤列, 本文主要采用该模型分析与解释相关结果。

**5.3.2 门槛回归结果及门槛效应分析** 农业集聚对COD、TN、TP三种农业面源污染的影响由门槛估计值划分为两个阶段。第一阶段, 农业集聚水平lnagg分别低于相应的门槛值

表6 门槛模型结果 (lnTP作为被解释变量)

Tab. 6 Estimation results of threshold model (Dependent variable: lnTP)

变量	① THR	② OLS	③ RE	④ FEI	⑤ FER	⑥ 2SLS	⑦ RT
lnagg (lnagg≤0.452)	0.456*** (29.92)	0.639*** (28.47)	0.457*** (30.60)	0.456*** (29.92)	0.456*** (6.41)	0.661*** (18.26)	0.120*** (8.58)
lnagg (lnagg>0.452)	0.380*** (30.20)	0.467*** (21.84)	0.385*** (31.27)	0.380*** (30.20)	0.380*** (10.46)	0.502*** (15.54)	
lnagdp	0.407*** (33.56)	0.201*** (12.88)	0.382*** (33.35)	0.407*** (33.56)	0.407*** (7.90)	0.179*** (7.26)	0.435*** (29.52)
lnps	0.006 (0.27)	-0.201*** (-8.25)	0.008 (0.37)	0.006 (0.27)	0.006 (0.17)	-0.223*** (-5.83)	0.011 (0.42)
lnas	0.182*** (9.68)	0.384*** (18.20)	0.220*** (12.13)	0.182*** (9.68)	0.182*** (4.51)	0.365*** (13.22)	0.281*** (12.41)
lner	0.018*** (4.99)	0.046*** (7.41)	0.025*** (6.98)	0.018*** (4.99)	0.018*** (2.65)	0.042*** (4.78)	0.009* (1.85)
lnpc	0.757*** (16.12)	0.820*** (19.37)	0.654*** (16.07)	0.757*** (16.12)	0.757*** (7.75)	0.804*** (15.01)	0.946*** (16.65)
lnea	-0.017* (-2.33)	-0.193*** (-15.48)	-0.025*** (-3.44)	-0.017* (-2.33)	-0.017* (-2.07)	-0.173*** (-6.60)	-0.008 (-0.97)
_cons	4.031*** (28.50)	5.352*** (33.38)	4.141*** (31.17)	4.031*** (28.50)	4.031*** (12.93)	5.555*** (20.85)	3.553*** (20.77)
F-test	157.49 [0.000]			157.49 [0.000]			131.11 [0.000]
LM-test			9994.53 [0.000]				
Hausman test			52.02 [0.000]				
Wald test				120000 [0.000]			
Overidentification test						1.609 [0.447]	
Weak instruments test (F statistic)						2031/1314 [0.000]	
R-sq	0.572	0.855	0.805	0.572	0.572	0.856	0.368
Observation	3033	3033	3033	3033	3033	2359	3033

注：①\*\*\*、\*\*、\*分别表示在1%、5%、10%的显著性水平下显著相关；②括号内为t检验值，RE、2SLS回归结果中括号内为z检验值，方括号内为P值。

0.976、-0.320、0.452（对应的产业平均地理集聚率分别为2.654、0.726、1.572），农业集聚对COD、TN、TP污染的影响系数分别为0.474、0.422、0.456，第二阶段为高于门槛值阶段，农业集聚对COD、TN、TP污染的影响系数分别为0.416、0.315、0.380，且均通过1%水平的显著性检验。可以看到，无论是高于门槛值阶段还是低于门槛值阶段，农业集聚对污染排放的影响系数皆显著为正，说明农业集聚程度的提高是加剧农业面源污染的。

而在农业集聚水平的不同阶段，其影响系数发生了变化，对于COD、TN、TP三种污染物来说，低于门槛值0.976、-0.320、0.452时，集聚水平对污染物排放的影响系数较大，而跨过门槛值进入高农业集聚水平阶段，影响系数依次减小了0.058、0.107、0.076。这说明农业集聚对COD、TN、TP农业面源污染具有门槛效应，且是单调正相关的门槛特征，呈现倒“U”型曲线前半段的规律，并未完全符合环境库兹涅茨曲线演变

趋势。整体上增污效应明显, 低于门槛值阶段, 随着农业集聚水平增加, 污染增幅较大, 但在高门槛阶段, 污染排放速度有所放缓, 增污效应存在一定的削弱趋势。

低于门槛值阶段, 农业集聚加剧农业面源污染的作用明显, 农业集聚各效应的负环境外部性占据主导地位。首先, 农业集聚水平提高意味着区域内农业生产规模不断扩大, 造成农业生产资料整体投入水平增高以及农业生产废弃物产量增多。农业部公布的数据表明中国目前的化肥亩均用量为21.9 kg, 分别是美国与欧盟的2.6倍与2.5倍, 远高于世界平均水平, 资源的过度消耗与废弃物大量排放是农业污染的重要来源; 其次, 伴随农业集聚水平的不断提升, 农业资源集聚化优势促使粮经饲生产结构发生调整, 虽然产生高收益但同时伴随高污染风险行业的进入, 将给农业环境带来压力。其中, 农业部公布数据与本研究的计算结果都证实, 禽畜粪便目前是农业面源污染的最大来源, 尤其是COD排放, 畜禽养殖的贡献比例高达90%以上。与此同时, 畜禽业结构的回归系数为正也进一步证实了畜禽养殖率的提高加大了农业面源污染风险。因此, 规模化养殖业的迅速发展, 一定程度上加速了农业面源污染排放; 然而, 与对工业生产中的严格污染管制不同, 中国的农业生产大部分由个人承担, 所受到的环境约束效力并不强, 农户不需要缴纳污染税, 承担的污染成本较低, 因此仅追求生产利益的思想就主导其生产行为。中国水稻亩产分别比印度与日本高近1倍与25%, 小麦亩产分别比美国与加拿大高60%和70%, 这追求高产量的生产行为必定会忽略绿色生产而伴随着生产资料的大量投入。除此之外, 农业集聚给农业生产信息、生产手段的传播带来便利性, 造成化肥、农药过量使用, 废弃物乱排滥放等粗放式经营行为被接受、模仿、沿用, 加大了负向社会效应带来的污染风险; 此外, 农业集聚促进农业污染源以及农业污染产物的集中分布, 各类污染项目层层增加, 交叉累积, 甚至产生相互作用或者呈现放大的形式增加, 超过区域所能承载的吸纳转变与净化能力, 累积效应不断扩大, 污染形势加重。

高于门槛值阶段, 农业集聚依然加剧农业面源污染, 但是其作用力有减弱的趋势。该阶段内, 农业集聚的各效应对污染排放的综合影响还是以增污效应为主导, 但是部分效应的减污作用力度增强, 削弱了污染排放高速增长严峻形势。首先, 集聚推动的规模化生产经营, 为现代化设备的应用、现代化管理技术的推广、现代化手段的使用提供了便利, 有利于节约成本、降低消耗。比如智能水肥一体化、有机肥抛撒机、秸秆压块机、畜禽粪便处理机等先进农业技术或设备在规模化的生产中得以高效使用, 提高了资源化利用率以及无害化处理率。截止到2017年, 中国测土配方施肥技术覆盖率达到84%, 机械深施化肥面积超过5.5亿亩次, 水肥一体化技术应用近1亿亩(数据来源于农业部), 大大提高了化肥、农药的利用率; 此外, 农业生产集聚增强区域竞争力, 促进区域内农业生产的高质量发展, 推动生产的转型与升级以及产品的绿色化、安全化与优质化, 将激发技术进步与创新, 增强技术溢出效应影响力, 在降低污染排放上发挥重要作用; 最后, 农户带来的社会效应是影响农业面源污染的重要作用力, 模型中农户生产素质的提高对污染呈现明显的负向影响充分证实了这一点。农户的生产行为受到其所能接收到信息的显著影响。目前, 农业的绿色发展成为生态文明建设的重要组成部分, 倡导性、鼓励性的生产信息以及行为准则正在以各种形式迅速传播, 而农业集聚水平的提高将有助于这些讯息的扩散, 增强社会效应的正环境外部性, 从农户的理性认知与行为规范角度出发, 降低非绿色生产行为的发生率。

总的来看, 农业集聚对农业环境的负面影响依然突出, 在农业集聚水平高于门槛值阶段, 虽然农业集聚的部分效应在一些方面表现出相应的降污作用, 但成效有限, 还不足以抵制增污作用而占据主导地位。所以, 对农业污染的重视度与管治依然有待加强,

农业生产的绿色化转型升级已刻不容缓。

**5.3.3 控制变量的影响** 对于COD、TN、TP三种面源污染来说,农业经济水平对它们的影响系数分别为0.358、0.290、0.407,且呈现显著正相关关系,这说明农业经济越发达,伴随着越来越严重的农业面源污染问题。农业经济快速发展的背后,一定程度上付出了浪费资源、破坏生态、牺牲环境的代价;农业生产条件对COD、TN、TP三种面源污染的影响一致,系数为0.265、1.043、0.757,且均呈现显著状态,可见目前农业生产条件的进步在降污方面并没有发挥有力的作用,而农业化工制品的过量投入以及化学措施的过度使用反而加剧了农业污染;畜牧业结构对COD、TP污染的影响系数为0.319、0.182,并通过检验,这说明畜牧业占比的提高会增加COD、TP污染排放。本文对农业面源污染的测算结果也显示,在COD排放与TP排放的来源中,畜禽养殖的贡献率达到90%与59.33%,尤其是COD排放,畜牧业养殖的不断进入将大幅加剧COD污染;环境规制对三类面源污染均为正向影响,对COD、TP的影响系数为0.031、0.018,通过显著性检验。该结果表明环境规制力度越大的地区其污染状况反而更加严重,这与理论预期是相悖的,一定程度上说明了中国的环境规制确实向重污染区域倾斜,但环境治理成效却并不显著。另外需要指出,目前环保支出多倾向于制造业,对农业的污染治理投入以及农业绿色技术的供给是相对欠缺的;生产者素质的回归结果与预期一致,生产者素质对TN、TP的影响系数均为-0.017,并在5%的显著性水平下显著相关,说明实现生产者素质的提高是优化农业生产行为、改善农业环境的有效途径;种植业结构对三种农业面源污染的影响皆不显著,表示该因素并不是农业面源污染的主要影响因素。总的来看,农业经济水平、农业生产条件、畜牧业结构的影响系数大于环境规制与生产者素质,所以这三个因素对农业面源污染的影响力度也更大。

**5.3.4 门槛效应扩展分析** 对位于不同门槛值区间的地市数量进行统计,并计算研究时期内农业集聚水平高于门槛估计值的地市占总样本的比例,结果显示,农业面源污染分别为COD、TN、TP时,所占比例的平均值分别为41.58%、88.20%、66.37%(表7)。其中,以COD污染的地市比例最小,这表明对于COD来说,中国的多数地市未跨越门槛值,农业集聚的负环境外部性较强,集聚的一系列降污效应在这些区域作用力较弱,未能削弱污染加剧的趋势,也进一步说明目前农业集聚对该污染物的增污效应是远高于降污效应的。针对目前农业面源污染中COD污染高排放的严峻形势,多数地市需要对COD污染引起重视,有针对性地加强在COD污染方面的管控与治理。

表7 高于门槛估计值的地市所占比例

Tab. 7 The percentage of the prefecture-level cities with agricultural agglomeration level higher than threshold estimation value

年份	COD $\ln agg > 0.976$ (%)	TN $\ln agg > -0.320$ (%)	TP $\ln agg > 0.452$ (%)
2007	40.356	88.427	67.953
2008	40.950	88.724	66.469
2009	41.543	88.427	66.766
2010	42.730	88.427	67.359
2011	41.543	88.427	65.875
2012	40.950	88.724	65.875
2013	40.356	86.350	62.611
2014	43.027	87.834	67.656
2015	42.730	88.427	66.766

### 5.4 门槛模型稳健性检验

为考察内生性问题是否对门槛模型估计结果构成影响,采用工具变量法重新估计模型。工具变量选取由门槛值生成的两个门槛虚拟变量的滞后一阶与滞后二阶,具体使用2SLS法重新估计,结果见表4、表5、表6中第⑥列。其中,过度识别检验(Overidentification test)检验结果显示所有工具变量均为外生变量,同时,弱工具变量检验(Weak instruments test)结果中的F统计量均大于10,所以进一步说明该估计模型不存在弱工具变量问题。对比2SLS估计结果,在门槛值划分的前后两个阶段,集聚水平对COD、TN、TP污染的影响系数为正,均呈现1%的显著水平,并且高门槛值阶段的回归系数是变小的,这与文中估计结果展示的门槛特征是一致的。另外,除少数控制变量的系数符号与显著性稍有变化,其他主要变量的结果与本文原回归模型展示的结论差异不大,所以文中估计结果并不存在较大偏误。另外,考虑到采用农业平均地理集聚率来表示农业集聚水平的稳定性,引入农业区位商作为农业平均地理集聚率的替代指标进行整体回归,结果见表4、表5、表6中第⑦列,可以发现,农业集聚水平以及其他控制变量的回归系数及其显著性也基本是一致的,进一步验证了估计结果的稳健性。

## 6 结论与讨论

在理论分析的基础上,以中国337个地级市为研究对象,采用2007—2015年面板数据,对农业集聚与农业面源污染的时空特征以及农业集聚对农业面源污染的门槛效应进行了分析。结果表明:

(1) 农业集聚与农业面源污染时空分布及变化特征相异:①从总体上看,农业集聚自2007年以后曲折降低;COD、TN、TP排放自2007年有所增加,而近两年呈下降趋势。②农业集聚水平较高的地区主要分布在河北、山东、河南等地和东北的部分地区;COD、TN、TP在河北、山东、河南等地污染严重,并在西南、华南的部分地区形成高污染密集区。③农业集聚的热点区主要分布在河南、山东、黑龙江等地,并成为热点区的核心区域;COD排放的热点区相对分散,TN、TP排放的热点区在河南、山东等地呈连片分布。④农业集聚水平分布表现出东高西低、北高南低的状态;COD排放呈现扁平的倒“U”型规律,北部增长后演变为半抛物型态势,TN与TP排放均呈现东高西低以及南北方向的倒“U”型特征。

(2) 农业集聚对COD、TN、TP农业面源污染皆具有单门槛效应,且呈现单调递增趋势。由门槛值划分的两个阶段,农业集聚水平的提高均加剧农业面源污染排放,但在高于门槛值阶段,农业面源污染排放量的增长速率放缓,集聚水平的提高对污染的加剧作用呈现收敛效应,污染加剧形势有所缓和,也就是说,合理提高农业集聚水平是改善中国农业面源污染的一种有效方法。但农业集聚对农业污染的影响还未呈现负相关关系,农业集聚水平的提高并未降低农业面源污染的排放,中国农业面源污染的形势是十分严峻的,说明粗放式、促增长的农业集聚也必须进行高质量的绿色化转型发展。

(3) 农业集聚与农业面源污染之间经历的两个阶段,取决于规模效应、结构效应、技术效应、社会效应、累积效应分别产生的正负环境效应。集聚水平低于门槛值的区域,其增污效应凸显,应注意避免因过度使用农用材料以及生产污物超标排放而造成的“拥堵效应”的不断扩大;而对于跨越门槛值的区域,通过集聚发展来缓和污染加剧的局面要持续推动,从鼓励适度规模经营、优化调整农业结构、推动绿色技术革新等方面高效发挥集聚带来的降污效应。



(4) 针对农业生产的特殊性所提出的社会效应与累积效应,其相关影响因子的实证结果证实二者对农业污染的影响较为显著,所以在农业面源污染防治时,要注重从农户自身出发,传达绿色发展理念,推行绿色生产方式,规范农户生产行为。同时要注意多种污染项目或多次类似污染项目的叠加汇聚,要重视并管控污染项目的协同作用,削弱污染排放积聚与相互作用造成的更复杂的环境影响。

(5) 相比工业集聚的环境效应,农业集聚的污染形势更为严峻。工业污染治理目标明确,而农业面源污染具有隐蔽性、累积性与不确定性,降污措施的效果不显著;自主经营的农业生产特征决定了农户具有较强的主观性,由于对农户的生产暂缺有效约束力,所以绝大多数农户追求产量最大化。工业企业受到严格的环境规制,对企业行为与企业竞争力有重要影响。因为受到污染成本的制约,产业集聚促进生产要素集约化,产业结构趋于合理化,集聚效应的降低作用相对有效;当前,中国环境保护的重点趋于工业污染防治,农业面源污染的预防和控制仍需改进。相关部门在重视工业污染防治的同时,应对农业面源污染引起高度重视,制定有效的管控措施,同时加强绿色农业生产技术以及面源污染防治实用技术的研发与应用,但要注意避免化学制品和化学措施等农业化学化技术发展对环境的负面影响。

(6) 源头把控,预防农业面源污染风险。综合研究结果显示,COD排放的主要来源是畜禽养殖,TN排放与TP排放中贡献率较高的为化肥与畜禽养殖。畜禽废弃物处理不当与化肥流失情况成为农业面源污染最大的风险所在,尤其是畜禽污染,其COD排放贡献率高达90%。所以需实时预测评估高污染源的产污与排污形势,重视源头上的防范预警工作。与此同时,提高畜禽养殖废弃物贮存处理利用设备的有效使用,以及促进相关技术的更新与升级,提升生产者化肥施用行为的规范性,有针对性地防控污染风险。

(7) 本文主要基于不同类型的农业面源污染排放,探讨了农业集聚对农业面源污染的影响,而针对污染强度(即单位面积污染排放)来说,它们之间可能存在不同的门槛特征,种植业、畜牧业等不同种类的农业生产的环境效应也可能存在差异。因此,结合污染强度,分不同生产类型深入全面剖析农业集聚对农业面源污染的影响是下一步的研究方向。

**致谢:**评审专家在完善理论机制、明晰计算方法、深化结果分析等方面提出了宝贵的修改意见,使本文获益匪浅,特致以诚挚感谢。

## 参考文献(References)

- [1] 蔺雪芹,方创琳.城市群地区产业集聚的生态环境效应研究进展.地理科学进展,2008,27(3):110-118.[Lin Xueqin, Fang Chuanglin. Research progress on the eco-environmental effect of industry agglomeration in city group. Progress in Geography, 2008, 27(3): 110-118.]
- [2] 高爽,魏也华,陈雯,等.发达地区制造业集聚和水污染的空间关联:以无锡市区为例.地理研究,2011,30(5):902-912.[Gao Shuang, Wei Yehua, Chen Wen, et al. Study on spacial-correlation between water pollution and industrial agglomeration in the developed region of China: A case study of Wuxi city. Geographical Research, 2011, 30(5): 902-912.]
- [3] 王兵,聂欣.产业集聚与环境治理:助力还是阻力:来自开发区设立准自然实验的证据.中国工业经济,2016,(12):75-89.[Wang Bing, Nie Xin. Industrial agglomeration and environmental governance: the power or resistance: Evidence from a quasi-natural experiment of establishment of the development zone. China Industrial Economics, 2016, (12): 75-89.]
- [4] Ellison G, Glaeser E L, Kerr W R. What causes industry agglomeration? Evidence from coagglomeration patterns. American Economic Review, 2010, 100(3): 1195-1213.

- [5] Brodzicki T. Agglomeration patterns in the Polish manufacturing industry. *International Economics Letters*, 2012, 1(1): 10-22.
- [6] 贺灿飞, 朱彦刚, 朱晟君. 产业特性、区域特征与中国制造业省区集聚. *地理学报*, 2010, 65(10): 1218-1228. [He Canfei, Zhu Yangang, Zhu Shengjun. Industrial attributes, provincial characteristics and industrial agglomeration in China. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(10): 1218-1228.]
- [7] 胡志强, 苗健铭, 苗长虹. 中国地市工业集聚与污染排放的空间特征及计量检验. *地理科学*, 2018, 38(2): 168-176. [Hu Zhiqiang, Miao Jianming, Miao Changhong. Spatial characteristics and econometric test of industrial agglomeration and pollutant emissions in China. *Scientia Geographica Sinica*, 2018, 38(2): 168-176.]
- [8] Shao J A, Huang Z L, Deng H. Characteristics of nonpoint source pollution load from crop farming in the context of livelihood diversification. *Journal of Geographical Sciences*, 2018, 28(4): 459-476.
- [9] 高超, 朱继业, 朱建国, 等. 极端降水事件对农业非点源污染物迁移的影响. *地理学报*, 2005, 60(6): 991-997. [Gao Chao, Zhu Jiye, Zhu Jianguo, et al. Effects of extreme rainfall on the export of nutrients from agricultural land. *Acta Geographica Sinica*, 2005, 60(6): 991-997.]
- [10] 周天墨, 付强, 诸云强, 等. 中国分省畜禽产污系数优化及污染物构成时空特征分析. *地理研究*, 2014, 33(4): 762-776. [Zhou Tianmo, Fu Qiang, Zhu Yunqiang, et al. Optimizing pollutant generation coefficients of livestock industry and mapping patterns of the pollutant constitution in China. *Geographical Research*, 2014, 33(4): 762-776.]
- [11] Zeng D Z, Zhao L. Pollution havens and industrial agglomeration. *Journal of Environmental Economics & Management*, 2009, 58(2): 141-153.
- [12] Hosoe M, Naito T. Trans-boundary pollution transmission and regional agglomeration effects. *Papers in Regional Science*, 2006, 85(1): 89-94.
- [13] Liu S, Zhu Y, Du K. The impact of industrial agglomeration on industrial pollutant emission: Evidence from China under New Normal. *Clean Technologies & Environmental Policy*, 2017, 19(9): 2327-2334.
- [14] He J. Pollution haven hypothesis and environmental impacts of foreign direct investment: The case of industrial emission of sulfur dioxide (SO<sub>2</sub>) in Chinese provinces. *Ecological Economics*, 2006, 60(1): 228-245.
- [15] 李伟娜, 杨永福, 王珍珍. 制造业集聚、大气污染与节能减排. *经济管理*, 2010, 32(9): 36-44. [Li Weina, Yang Yongfu, Wang Zhenzhen. Manufacturing agglomeration, air pollution and energy-saving and emission-reduction. *Economic Management Journal*, 2010, 32(9): 36-44.]
- [16] 东童童, 李欣, 刘乃全. 空间视角下工业集聚对雾霾污染的影响: 理论与经验研究. *经济管理*, 2015, 37(9): 29-41. [Dong Tongtong, Li Xin, Liu Naiquan. The effect of industrial agglomeration to haze pollution (PM<sub>2.5</sub>) based on spatial perspective: Theoretical and empirical research. *Economic Management Journal*, 2015, 37(9): 29-41.]
- [17] 杨仁发. 产业集聚能否改善中国环境污染. *中国人口·资源与环境*, 2015, 25(2): 23-29. [Yang Renfa. Whether industrial agglomeration can reduce environmental pollution or not. *China Population, Resources and Environment*, 2015, 25(2): 23-29.]
- [18] Liu Y, Ji Y, Shao S, et al. Scale of production, agglomeration and agricultural pollutant treatment: Evidence from a survey in China. *Ecological Economics*, 2017, 140: 30-45.
- [19] 姚文捷. 生猪养殖产业集聚演化的环境效应研究: 以嘉兴市辖区为例. *地理科学*, 2015, 35(9): 1140-1147. [Yao Wenjie. Environmental effect from the evolution of pig breeding industrial agglomeration: A case study of Jiaxing municipal district, Zhejiang. *Scientia Geographica Sinica*, 2015, 35(9): 1140-1147.]
- [20] 饶静, 许翔宇, 纪晓婷. 我国农业面源污染现状、发生机制和对策研究. *农业经济问题*, 2011, 32(8): 81-87. [Rao Jing, Xu Xiangyu, Ji Xiaoting. Research on current situation, mechanism and countermeasures of agricultural non-point source pollution in China. *Issues in Agricultural Economy*, 2011, 32(8): 81-87.]
- [21] Grossman G M, Krueger A B. Environmental impacts of a North American Free Trade Agreement. *Social Science Electronic Publishing*, 1991, 8(2): 223-250.
- [22] Antweiler W, Copeland B R, Taylor M S. Is free trade good for the environment?. *American Economic Review*, 2001, 91(4): 877-908.
- [23] Copeland B A, Taylor M. North-South trade and the environment. *Quarterly Journal of Economics*, 1994, 109(3): 755-787.
- [24] Duranton G, Puga D. Nursery cities: Urban diversity, process innovation, and the life cycle of products. *American Economic Review*, 2001, 91(5): 1454-1477.
- [25] 王建华, 马玉婷, 刘苗, 等. 农业生产者农药施用行为选择逻辑及其影响因素. *中国人口·资源与环境*, 2015, 25(8): 153-161. [Wang Jianhua, Ma Yuting, Liu Zhuo, et al. Behavior choice logic and influencing factors of agricultural pro-

- ducers' pesticide application. *China Population Resources and Environment*, 2015, 25(8): 153-161.]
- [26] 田云, 张俊飏, 何可, 等. 农户农业低碳生产行为及其影响因素分析: 以化肥施用和农药使用为例. *中国农村观察*, 2015, (4): 61-70. [Tian Yun, Zhang Junbiao, He Ke, et al. Analysis on farmers' low-carbon agricultural production behavior and its influencing factors: Taking chemical fertilizer application and pesticide use as an example. *China Rural Survey*, 2015, (4): 61-70.]
- [27] Oosterhaven J, Broersma L. Sector structure and cluster economies: A decomposition of regional labour productivity. *Regional Studies*, 2007, 41(5): 639-659.
- [28] 尚海洋, 毛必文. 基于 IPAT 模型的产业集聚与环境污染的实证研究. *生态经济*, 2016, 32(6): 77-81, 87. [Shang Haiyang, Mao Biwen. An empirical study on industrial agglomeration and the environmental pollution based on IPAT model. *Ecological Economy*, 2016, 32(6): 77-81, 87.]
- [29] Dinda S, Coondoo D, Pal M. Air quality and economic growth: An empirical study. *Ecological Economics*, 2000, 34(3): 409-423.
- [30] 谭秋成. 作为一种生产方式的绿色农业. *中国人口·资源与环境*, 2015, 25(9): 44-51. [Tan Qiucheng. Green agriculture as a production mode. *China Population Resources and Environment*, 2015, 25(9): 44-51.]
- [31] Grossman G M, Krueger A B. Economic growth and the environment. *Quarterly Journal of Economics*, 1995, 110(2): 353-377.
- [32] 张建华. 一种简便易用的基尼系数计算方法. *山西农业大学学报: 社会科学版*, 2007, 6(3): 275-278, 283. [Zhang Jianhua. An convenient method to calculate Gini coefficient. *Journal of Shanxi Agricultural University: Social Science Edition*, 2007, 6(3): 275-278, 283.]
- [33] 范剑勇. 市场一体化、地区专业化与产业集聚趋势: 兼谈对地区差距的影响. *中国社会科学*, 2004, (6): 39-51, 204-205. [Fan Jianyong. Market Integration, regional specialization and tendency of industrial agglomeration: An implication for regional disparity. *Social Sciences in China*, 2004, (6): 39-51, 204-205.]
- [34] 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. *清华大学学报: 自然科学版*, 2004, 44(9): 1184-1187. [Lai Siyun, Du Pengfei, Chen Jining. Evaluation of non-point source pollution based on unit analysis. *Journal of Tsinghua University: Science and Technology*, 2004, 44(9): 1184-1187.]
- [35] 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. *中国环境科学*, 2006, 26(6): 751-755. [Chen Minpeng, Chen Jining, Lai Siyun. Inventory analysis and spatial distribution of Chinese agricultural and rural pollution. *China Environmental Science*, 2006, 26(6): 751-755.]
- [36] Wang Q Y. Fixed-effect panel threshold model using Stata. *Stata Journal*, 2015, 15(1): 121-134.
- [37] Hansen B E. Threshold effects in non-dynamic panels: Estimation, testing, and inference. *Journal of Econometrics*, 1999, 93(2): 345-368.

## Impact of agricultural agglomeration on agricultural non-point source pollution: Evidences from the threshold effect based on the panel data of prefecture-level cities in China

DENG Qingqing<sup>1,2</sup>, LI Erling<sup>1,2,3</sup>, REN Shixin<sup>1,2</sup>

(1. Key Research Institute of Yellow River Civilization and Sustainable Development & Collaborative Innovation Center on Yellow River Civilization of Henan Province/Institute of Agriculture and Rural Sustainable Development/College of Environment and Planning, Henan University, Kaifeng 475004, Henan, China; 2. Research Institute of Regional Economic, Henan Province, Kaifeng 475004, Henan, China; 3. Collaborative Innovation Center of Urban-Rural Coordinated Development, Henan Province/Academician Laboratory for Urban and Rural Spatial Data Mining, Zhengzhou 450000, China)

**Abstract:** The environmental effect of agricultural agglomeration is more complicated than that of other industries, but there is a deficiency of the research on it. This study calculated the level of agricultural agglomeration and the emissions of agricultural non-point pollutants in Chinese prefecture-level cities by using the panel data of these cities on the basis of the theoretical analysis. Then we investigated the spatial and temporal characteristics of agricultural agglomeration and agricultural non-point source pollution and the threshold effect of agricultural agglomeration level on agricultural non-point source pollution based on GIS spatial analysis and econometric model. The main conclusions can be drawn as follows: (1) Agricultural agglomeration and agricultural non-point source pollution of COD, TN and TP show different characteristics in temporal variation, spatial distribution, spatial correlation and spatial trends. (2) Agricultural agglomeration has single threshold effect on COD, TN and TP pollution, and positive correlation with them. When the level of agricultural agglomeration is below the threshold value, it contributes to agricultural pollution significantly, and as the level of agglomeration becomes higher than the threshold value, the situation of rapid pollution will be mitigated. (3) The change from agricultural agglomeration to emissions of three agricultural non-point source pollutants develops in two stages. This change depends on the intensification and restriction of the scale effect, structure effect, technical effect, social effect and cumulative effect on the emissions of agricultural non-point source pollution produced by agricultural agglomeration and it is reflected in the concrete agricultural production behavior. With the increase of agricultural agglomeration, the effect of each effect is obvious and the level of pollution increases significantly, however, the inhibition ability of pollution emission is improved and the external effect of negative environment is weakened at the stage of crossing the threshold. (4) The agricultural economic level and agricultural production conditions aggravate the COD, TN and TP agricultural non-point source pollution to some extent; the structure of animal husbandry industry and environmental regulation have a positive correlation with COD and TP agricultural non-point source pollution; the improvement of producer quality can affect farmers' production behavior and improve the agricultural environment. (5) The effect of agricultural agglomeration on pollution reduction of COD agricultural non-point source pollution is weak and COD agricultural non-point source pollution is more serious and mainly from animal husbandry.

**Keywords:** agricultural agglomeration; agricultural non-point source pollution; spatiotemporal characteristics; threshold effect