

“三农”决策要参

2015 年第 3 期（总第 89 期）

清华大学 中国农村研究院

2015 年 1 月 5 日

我国农业面源污染现状分析*

内容摘要：农业面源污染已经成为我国环境污染的重要组成部分，并对农业生产、经济发展带来了重大威胁。通过对 1996~2011 年全国农业面源污染数据的分析发现，我国农业化肥投入、农田固体废弃物及畜禽排泄物，以及由它们产生的 TN、TP、COD 三类排放物总体上都随时间呈增长趋势，且存在显著的地区差异；除个别省份以外，我国农业面源污染程度（污染源和污染物两个角度）在空间上呈现出以华北、中部地区为核心，污染程度向外辐射递减，且经济发达地区和农业发达地区的污染更为严重的分异特征；污染物的空间分布还呈现出明显的组间差距和两极分化现象。

关键词：农业面源污染 现状 时序分布 空间分布 中国

*本文为清华大学中国农村研究院 2013 年研究课题“农业环境治理机制研究”（编号：CIRS2013-3）的部分研究成果。

农业面源污染（生产活动造成的污染）是农村面源污染的组成部分，另一部分是农村生活废水与垃圾造成的污染（消费活动造成的污染）。从形成原因即污染源角度来看，农业面源污染分为化肥污染、农药污染、畜禽养殖污染和农田固体废弃物污染 4 种类型^①。从农业面源污染的主要排放物角度来看，主要污染物包括总氮（TN）、总磷（TP）、化学需氧量（COD）。根据已有研究，在各污染源中农药农膜对主要排放污染物的贡献率较低。因此，本文主要分析农用化肥、畜禽排泄物及农作物秸秆三类污染源产生的 TN、TP、COD 三类排放物。

一、我国农业面源污染现状及时序分布特征

（一）农业面源污染主要污染源现状及时序分布特征

以全国为单位，收集农业面源污染源数据，并应用 Excel 软件对数据进行计算处理。根据农作物播种面积，计算化肥、农药农膜、农田固体废弃物的单位播种面积投入及排放强度，而畜禽排泄物污染排放强度根据国土面积计算。

1. 化肥污染

化肥投入量过高、流失严重、配比不合理是造成我国农业面源污染的重要原因之一。过去 16 年的数据^②显示，我国化肥施用量从 1996 年的 3828 万吨逐年上升到 2011 年的 5704 万吨，增加

①邱君：《中国农业污染治理的政策分析》，中国农业科学院博士学位论文，2007 年。

②本研究数据来源为 1996~2011 年各年《中国统计年鉴》、《中国农业年鉴》、《中国农村统计年鉴》。

了 49%，年平均增长率为 2.52%（图 1-a）；而化肥施用强度（单位播种面积化肥施用量）则从 1996 年的 251kg/hm² 逐年上升到 2011 年的 352 kg/hm²（图 1-b），发达国家为防止化肥对水体造成污染而设置的警戒标准为 225 kg/hm²，可见我国的化肥污染长期远超化肥使用的安全上线。

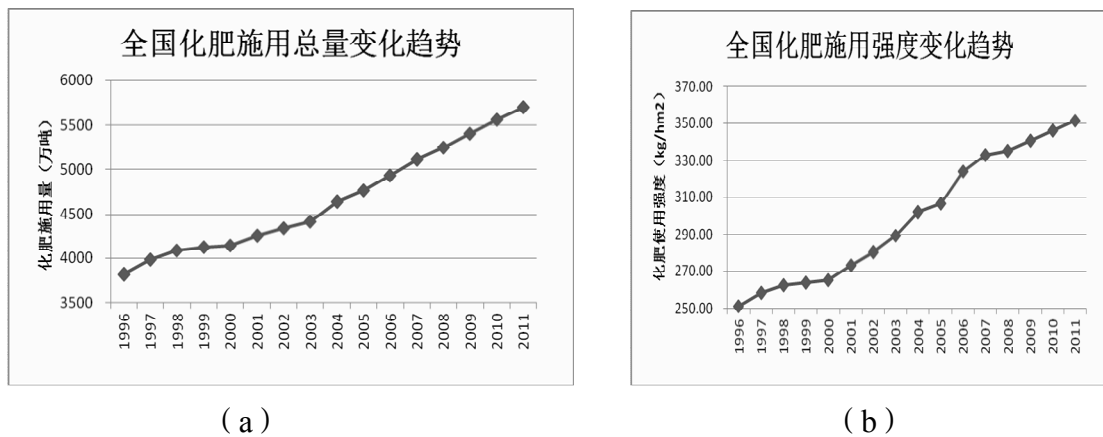


图 1 全国化肥施用总量及施用强度变化趋势

我国在化肥施用过程中，无机肥的施用量远大于有机肥的施用量。而在无机肥中，会对环境造成巨大污染的氮、磷的施用量则占到了绝大部分。受施肥方式、施肥结构和氮、磷、钾养分比例等因素的影响，我国化肥利用率很低，氮、磷、钾比例分别仅为 30%~35%、10%~20% 和 35%~50%，化肥流失严重^③。大量的化肥会溶于雨水和灌溉水中或者通过渗漏转移到地下水、河流和湖泊中，引起硝酸盐污染，并导致地下水中氮磷物质含量增高、江河湖泊富营养化，造成严重的农业面源污染物，同时，部分地

^③彭奎、朱波、Kazuko Abe 等：《紫色土集水区氮素收支状况与平衡分析》，《山地学报》，2001 第 S1 期，第 30~35 页。

区生产的蔬果中硝酸盐残留超标，也会对人们的身体健康造成威胁。另一方面，有机养分投入比重持续下降，依赖无机养分投入的直接结果是土壤肥力下降、质量衰退，进而影响单位耕地粮食综合生产能力。但我们也看到，随着环境污染的日益加重和人们的环保意识不断增强，近年来钾肥的施用比例逐步上升（图 2）。

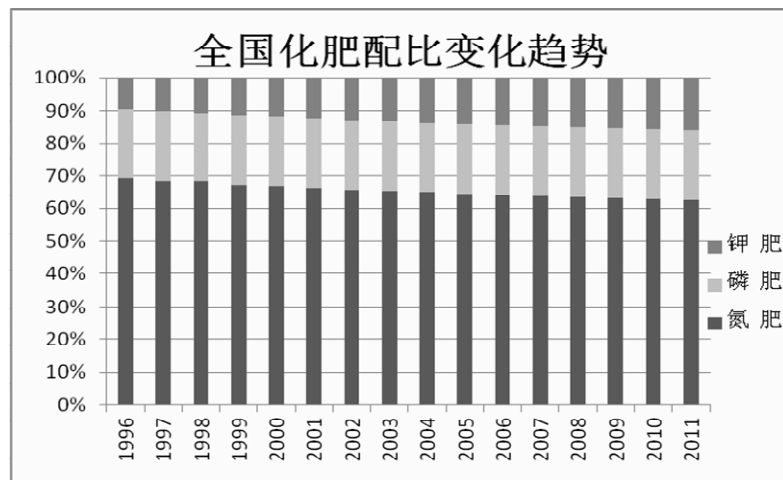


图 2 全国化肥施用配比变化趋势

2. 农药与农膜污染

我国的农药施用量从 1996 年的 114.1 万吨上升到 2011 年的 178.7 万吨（2006 年数据缺失），增长了 56.6%，年平均增长率为 2.84%（图 3-a）。而农药施用强度（单位播种面积农药施用量）从 1996 年的 7.49 kg/hm² 增加到 2011 年的 11.01 kg/hm²（图 3-b）。有研究表明，农药的利用率极低，农药施用后，有 50%~60% 残留于土壤，只有 10%~20% 依附于植物，造成土壤的农药污染^④。

^④何丽莲、李元：《农田土壤农药污染的综合治理》，《云南农大学学报》，2003 年第 4 期，第 430~434 页。

同时，我国农药中杀虫剂、杀菌剂、除草剂的使用比例约为 2 : 1 : 1（发达国家使用比例通常为 2 : 1 : 2），而且化学农药占农药总量的 93.3%，生物农药仅占 6.7%，化学农药中高毒、高残留农药占 30% 以上^⑤。

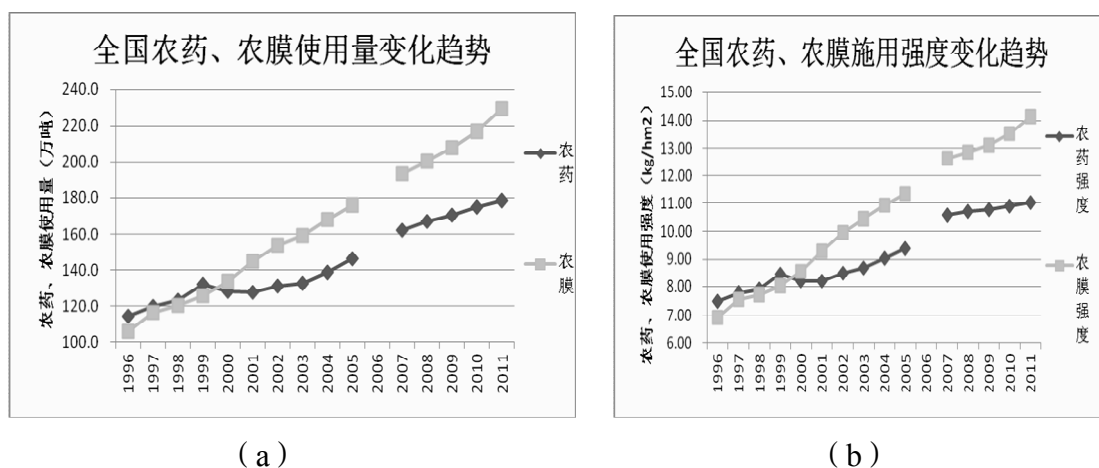


图 3 全国农药、农膜使用量及施用强度变化趋势

我国的农膜使用量从 1996 年的 105.6 万吨上升到 2011 年的 229.5 万吨（2006 年数据缺失），增长了 117%，年平均增长率为 9.86%（图 3-a）。而农膜使用强度（单位播种面积农膜使用量）从 1996 年的 6.93 kg/hm² 增加到 2011 年的 14.14kg/hm²（图 3-b）。农用地膜属高分子有机化学聚合物，在土壤中非但不易降解，而且降解之后会产生有害物质，逐年积累，污染土壤生态环境，同时大量的农膜在土壤中积累会恶化土壤理化性状，导致作物减产。塑料农膜中含有的增塑剂能在土壤中挥发，对农作物特别是蔬菜

^⑤李海鹏：《中国农业面源污染的经济分析与政策研究》，华中农业大学博士学位论文，2007 年。

作物产生毒性，致使作物生长缓慢或死亡。

3. 畜禽排泄物污染

通过畜禽的年排泄量（表 1）计算得知，我国的畜禽排泄物量 1996 年为 196632 万吨，而 2011 年则为 228723 万吨（图 4），而畜禽排泄物强度（单位国土面积畜禽排泄量）1996 年为 $0.205\text{kg}/\text{hm}^2$ ，2011 年为 $0.238\text{ kg}/\text{hm}^2$ 。从折线图中可以看到，两者的增势较为缓慢，这是因为我国肉猪、家禽出栏数虽然逐年上升，但牛的年存栏数却有所下降。但我们也应该看到，我国畜禽排泄物总量极大，是秸秆产量的 3~4 倍之多，排泄物中各类污染物含量较高，同时我国污水处理率、排泄物利用率低，这些都表明畜禽排泄物对土地、水体造成的污染不容忽视。



图 4 全国畜禽排泄物总量变化趋势

4. 农田固体废弃物污染

农田固体废弃物是指农作物秸秆、蔬菜废物等农业生产垃圾，其产生量跟各类农作物的产量相关。中国是农作物秸秆资源最为

丰富的国家之一。随着传统农业向现代农业转变，农田固体废弃物再利用方式逐渐弱化，造成秸秆大量过剩，剩余秸秆堆置在田埂路旁，易被暴雨直接冲入河道，形成水体污染。

通过参数农作物秸秆籽粒比（表 1）计算发现，过去的 16 年间，我国秸秆产量从 1996 年的 66211 万吨上升到 2011 年的 82874 万吨，增加了 25%，年平均增长率为 1.41%（图 5-a）；而秸秆产量强度（单位粮食播种面积秸秆产量）则从 1996 年的 5884kg/hm² 上升到 2011 年的 7495kg/hm²（图 5-b）。由于技术水平、环保意识等原因，大量的秸秆被焚烧、废弃，这一方面浪费了宝贵的生物能源，另一方面也造成了巨大的环境污染。

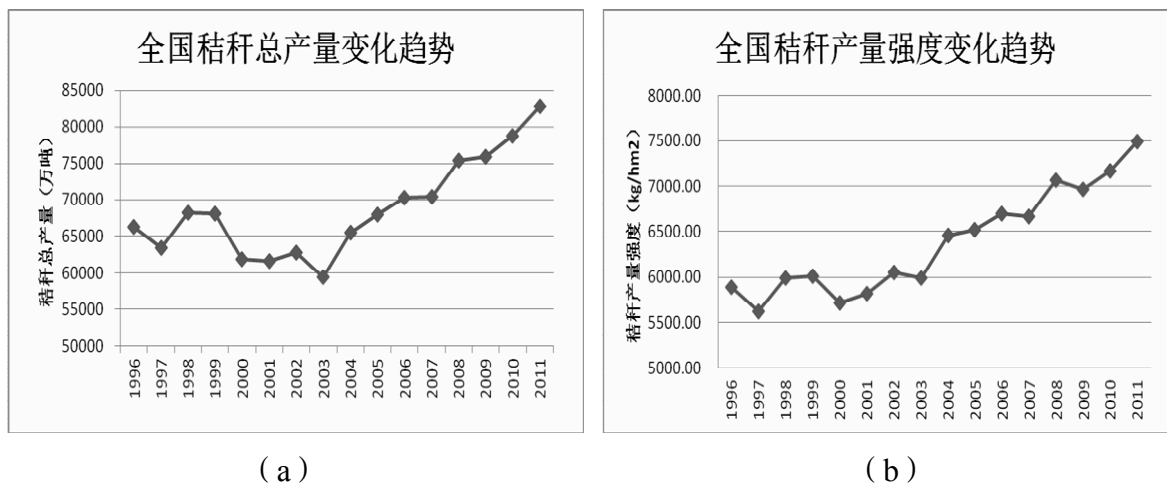


图 5 全国秸秆总量及产量强度变化趋势

（二）农业面源污染主要污染物现状及时序分布特征

采用单元调查法^⑥对我国农业面源污染主要排泄物值进行评

^⑥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 年第 9 期，第 1184~1187 页。

估核算。以省、直辖市、自治区为核算单位，结合我国具体国情，主要分析农用化肥、畜禽排泄物及农田固体废弃物三类污染源产生的 TN、TP、COD 三类污染物。其中，化肥氮、磷、钾的利用系数分别为 35%、20%、50%^⑦，不同的复合肥氮、磷、钾的含量有所不同，本研究取较为平均的 5：2：1。农田秸秆籽粒比参数与产污系数^⑧、畜禽粪便排泄系数及畜禽粪便污染物排泄系数^⑨见表 1。

表 1 农业面源污染源产污系数

污染源	具体来源	畜禽粪尿排泄系数、作物秸秆籽粒比参数		COD	TN	TN
畜禽		粪	尿			
	牛	10950	6570	401.50	61.10	10.07
	猪	396	522	47.88	4.51	1.70
	羊	870	-	4.40	2.28	0.45
农作物秸秆	稻谷	1.0		5.63	5.82	0.42
	小麦	1.1		6.39	5.15	0.9
	玉米	2.0		11.23	10.69	2.39
	油料	2.0		20.57	45.43	3.06
	豆类	1.6		17.61	22.23	2.24
	薯类	0.5		2.26	1.83	0.67

注：畜禽中牛、猪、羊的饲养天数分别为 365 天、180 天和 365 天。

⑦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 年第 6 期，第 751~755 页。

⑧莱斯芸：《非点源调查评估方法及其应用研究》，清华大学硕士学位论文，2003 年。

⑨刘培芳、陈振楼、许世远等：《长江三角洲城郊畜禽粪便的污染负荷及其防治对策》，《长江流域资源与环境》，2002 年第 5 期，第 456~460 页。

1. 总氮 (TN)

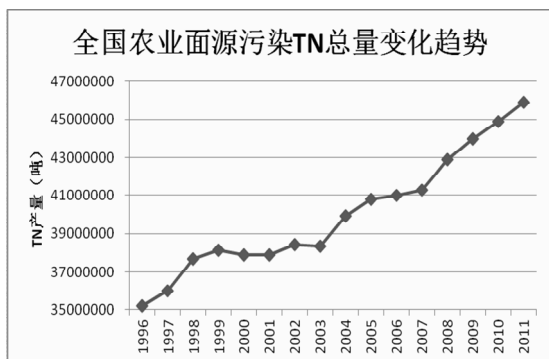
1996 年我国农业 TN 排放总量为 3521.17 万吨, 2011 年农业 TN 的排放总量达到 4592.11 万吨, 增加了 30.41%, 年平均增长率为 1.67% (图 6-a1)。而农业单位面积产生的 TN, 1996 年为 36.68 kg/hm², 2011 年为 47.83 kg/hm²。在各污染源中, 化肥产生的 TN 约占总量的 50%, 畜禽排泄物约占总量的 30%, 秸秆约占总量的 20%, 且该比例在过去 16 年间基本保持恒定 (图 6-b1)。

2. 总磷 (TP)

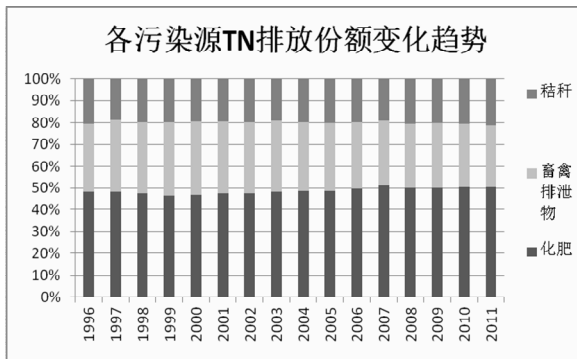
1996 年我国农业 TP 排放总量为 669.85 万吨, 2011 年农业 TP 的排放总量达到 951.78 万吨, 增加了 42.09%, 年平均增长率为 2.22% (图 6-a2)。而农业单位面积产生的 TP, 1996 年为 6.98 kg/hm², 2011 年为 9.91kg/hm²。在各污染源中, 化肥产生的 TP 约占总量的 45%, 畜禽排泄物约占总量的 40%, 秸秆约占总量的 15%, 且该比例在过去 16 年间也基本保持恒定 (图 6-b2)。

3. 化学需氧量 (COD)

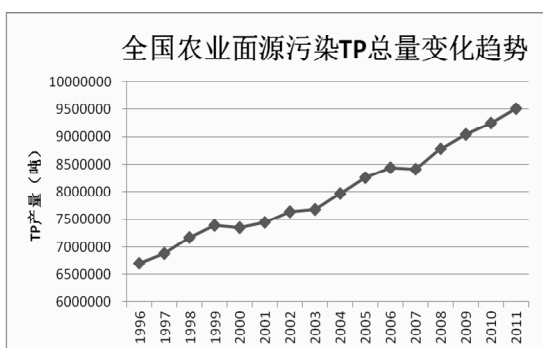
1996 年我国农业 COD 排放总量为 7964.31 万吨, 2011 年农业 COD 的排放总量达到 9593.99 万吨, 增加了 20.46%, 年平均增长率为 1.17% (图 6-a3)。而农业单位面积产生的 COD, 1996 年为 82.96 kg/hm², 2011 年为 99.94kg/hm²。畜禽排泄物产生的 COD 占到农业面源污染 COD 排放量的 90%以上。研究也发现, COD 的变化趋势与上一部分中畜禽排泄总量的变化趋势基本相同 (图 6-b3)。



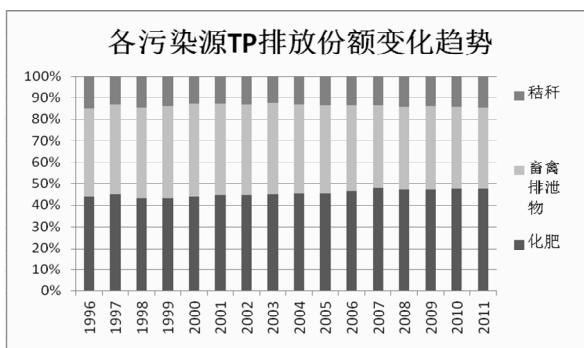
(a1) TN 排放总量



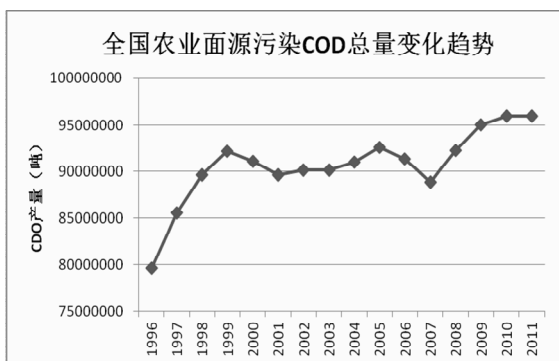
(b1) 各污染源 TN 排放份额



(a2) TP 排放总量



(b2) 各污染源 TP 排放份额



(a3) COD 排放总量



(b3) 各污染源 COD 排放份额

图 6 全国农业面源污染 TN、TP、COD 排放总量及各污染源 TN、TP、COD 排放份额变化趋势

农业面源污染 TN、TP 呈明显的线性增长趋势，COD 总体呈现增长趋势，但具有明显的阶段性特征，尤其是从 2009 年开始虽然一直在增长，但增速减缓；而 COD 基本上由畜禽排泄物产生，

所以农业面源 COD 污染在近几年的增速减缓与最近实施的畜禽养殖的相关法律法规不无关系。如我国于 2008 年 6 月 1 日起施行了新修订的《中华人民共和国水污染防治法》，其中第 40 条对畜禽养殖粪便、废水综合利用提出了相关规定^⑩。

二、我国农业面源污染的空间分异特征

由于 2012 年统计数据还不全面，本文选择 2011 年全国内地 31 个省、直辖市、自治区的农业面源污染数据来分析我国农业面源污染的空间分异特征。总体思路就是将污染情况相近的省、直辖市、自治区归类，总结其农业面源污染的基本特征，将样本分组降维。具体研究方法如下：

a. 根据时序分布中提到的计算方法，计算得出 2011 年各省、直辖市、自治区农业面源污染的基本情况，包括化肥强度、秸秆强度、畜禽排泄物强度、TN 强度、TP 强度及 COD 强度。

b. 以 a 计算数据为基础，对全国各省、直辖市、自治区农业面源污染程度进行分级，然后利用 GIS 软件，按照分级标准将 2011 年的化肥强度、秸秆强度、畜禽排泄物强度、TN 强度、TP 强度及 COD 强度制作成空间分布图，分析农业面源污染的空间差异性。

c. 基于农业面源污染的空间差异性，运用 K-均值聚类的方法，借助 Stata 计量软件，分别从污染源空间分布角度选取化肥强

^⑩中央政府门户网站——法律法规 http://www.gov.cn/bumenfuwu/2008-02/28/content_2620123.htm

度、秸秆强度、畜禽排泄物强度 3 个污染源变量，以及污染物空间分布角度选取 TN 强度、TP 强度、COD 强度 3 个污染物变量，依据农业面源污染的强度，由重到轻，将全国 31 个省、直辖市、自治区降维聚类分组，重新分为 5 类。

（一）农业面源污染的空间分布

1. 各污染源空间分布

国际上关于化肥投入的警戒标准^①为 225 kg/hm^2 ，按照这一标准，我国只有内蒙古、甘肃、贵州、新疆、青海、黑龙江 6 个地区低于这一警戒标准。这 6 个地区的农业生产以畜牧业为主，是我国的主要牧区，化肥施用自然较少。全国其他地区的化肥投入强度均大于这一指标，说明我国的化肥滥用程度较为严重，其中，海南、福建、广东、天津的化肥投入强度更在 500 kg/hm^2 以上，东南沿海、华北地区、中部地区的施用强度明显高于全国其他地区，东部经济发达地区的化肥施用强度明显大于西部经济欠发达地区，化肥投入呈现出明显的地区差距（图 7-a1）。

秸秆产生于农作物种植，所以其产量与农作物的产量是紧密相关的。计算结果也表明，主要产量省份的秸秆强度较大。全国秸秆产量强度较大的省份集中在东北、华北、中部地区（图 7-a2）。

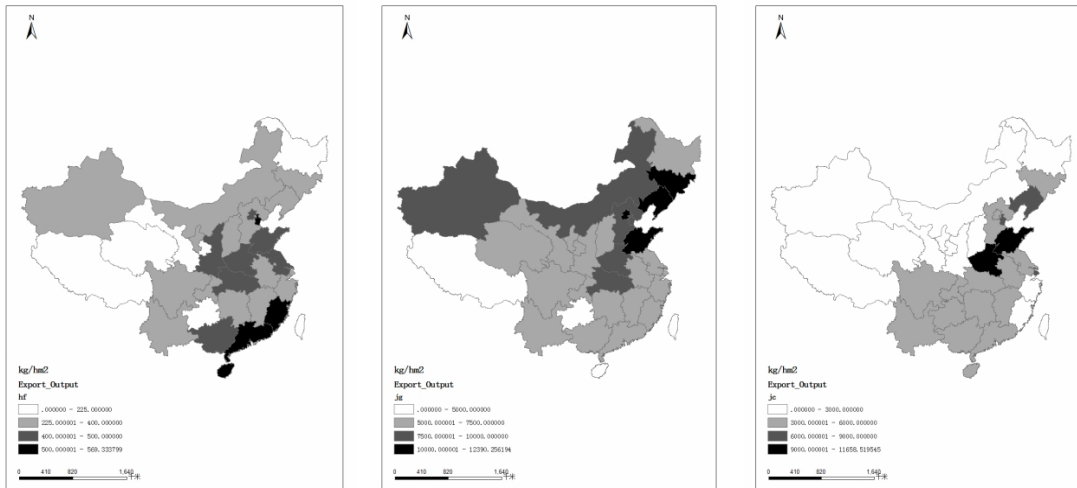
从现阶段各地区畜禽排泄物的产生强度来看，全国的分布特征为华北地区最强，西北地区最弱，中部、华南、西南地区居中，

^①张林秀、黄季焜、乔方彬：《农民化肥使用水平的经济评价和分析》，载于朱兆良、Norse D、孙波：《中国农业面源污染控制对策》，中国环境科学出版社，2006 年。

特别是我国的主要牧区如新疆、内蒙古、黑龙江、青海、甘肃等地区畜禽排泄物强度很低(图 7-a3)。出现这种空间分布特征的原因是:一方面,我国主要牧区的地区面积较大,所以单位面积的畜禽排泄量较小,对生态环境的压力也较为缓和;另一方面,中东部地区牛、羊等大型牲畜虽然相比于牧区养殖量小,但大型牲畜总量本来就很小,其排污份额也就偏小,而这些地区由于人口众多,消费需求旺盛,肉猪与家禽的养殖量规模巨大,导致其排泄物总量较大。

2. 各污染物空间分布

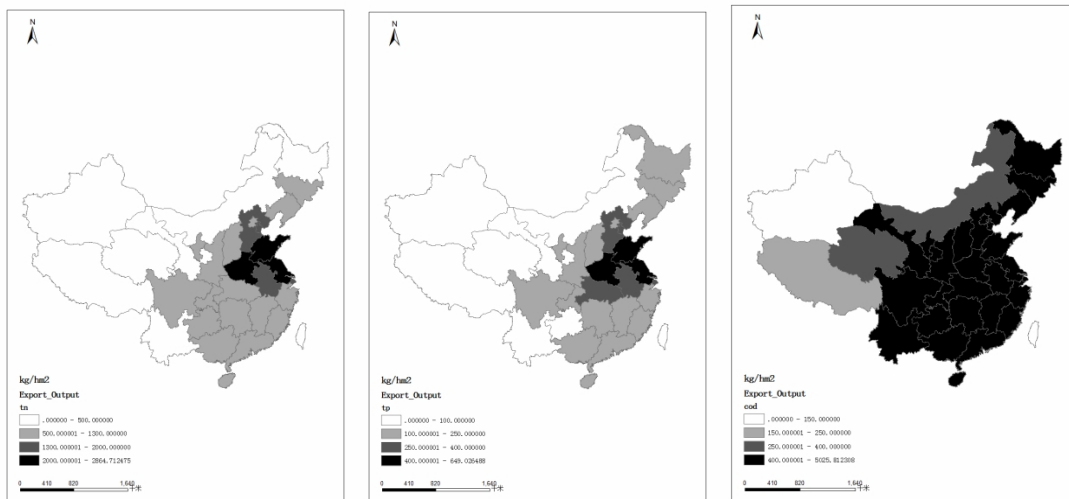
从现阶段各地区 TN、TP 的产生强度看, TN、TP 强度都呈现出东部地区、南部地区的污染程度大于西部地区的地区差异。农业面源 TP 强度空间分布与 TN 相同, 全国 TN 高于 200 t/hm^2 以及 TP 强度在 400 t/hm^2 以上的地区有河南、山东、江苏三省, 而如甘肃、新疆、西藏、贵州、青海等地强度均低于以上强度(图 7-b1 和图 7-b2)。农业面源 COD 强度分布与畜禽排泄物强度分布类似, 呈现出华北地区最强、中南部地区次之、西部地区最弱的特征, 其中强度在 4000 t/hm^2 以上的有河南、天津两个地区, 而甘肃、新疆、西藏、青海等地依然是污染最轻的地区(图 7-b3)。



(a1) 化肥强度分布

(a2) 秸秆强度分布

(a3) 畜禽排泄物强度分布



(b1) TN 强度分布

(b2) TP 强度分布

(b3) COD 强度分布

图 7 全国农业面源污染源与污染物强度分布图

注：南海诸岛、钓鱼岛属于中国不可分割的一部分，但由于图的大小限制，本文没有将其显示在作图中。

(二) 基于聚类分析的农业面源污染空间分异特征

1. 依据农业面源污染源强度分组

第一类地区是污染源强度最大的地区，这 6 个省、直辖市都

集中在华北地区及附近的华中北部以及东北南部。其中，河南、山东、吉林、辽宁是我国的农业大省，粮食产量、畜禽养殖量也都居于全国前列。而北京、天津的农业总产量虽然不大，但由于其耕地面积较小，污染强度也很大。

第二类地区与第三类地区的污染源强度情况与第一类地区相比较轻，但也都超过了国际上的各类警戒标准。据表 2 显示，这两类省份主要集中在两块，一部分如安徽、江西、河北、湖北与第一类地区相似，也是以华北、中部地区为核心向外展开，且多为我国的农业大省与经济发达地区；另一部分则分布在我国南方，包括华南地区与西南地区。第二类地区与第三类地区相比，第二类地区的化肥污染与秸秆污染更加严重，而第三类地区的畜禽排泄物污染更加严重。

表 2 全国农业面源污染省份聚类分组

分组依据	农业面源污染程度	分布省份
农业面源污染源强度	1 严重	辽宁、吉林、河南、山东、北京、天津
	2 较严重	安徽、福建、江西、广西、四川、云南、河北、湖北
	3 一般	上海、江苏、广东、重庆、湖南、海南、贵州
	4 较轻	内蒙古、浙江、宁夏、新疆、黑龙江
	5 轻	山西、陕西、甘肃、西藏、青海
农业面源污染物强度	1 严重	河南、山东、上海、天津
	2 较严重	安徽、江苏、辽宁、河北、湖北
	3 一般	北京、吉林、江西、广西、广东、重庆、湖南、海南、四川、贵州
	4 较轻	山西、黑龙江、浙江、福建、云南、陕西、宁夏
	5 轻	内蒙古、新疆、甘肃、西藏、青海

第四类地区与第五类地区的污染源强度更轻，第四类地区的

秸秆污染强度更大。与前三类地区相比，这类地区更加远离华北、中部地区，主要是西部以及边疆省份。出现这样的分布情况，一方面是因为这两类地区的农业发展水平、经济发展水平较低，农业结构以畜牧业为主，农资投入较小；另一方面，这些省份的国土面积较大，污染强度较小，对国土环境的压力较缓和。

2. 依据农业面源污染物强度分组

与上一节的结果相比较，农业面源污染物的空间分布与农业面源污染源的空间分布十分相似，除了个别省份的差别外，也是以华北、中部地区为核心，向外辐射递减，经济发达地区、农业发达地区的污染情况更为严重。

另一方面，污染物的空间分布也呈现出两个不同于农业面源污染源的空间分异的特征。一是污染物分布的组间差距更为明显，从第一类到第五类，不同类别的地区间三类污染物强度基本上均以几何方式递减，没有出现类似污染源分布第二类与第三类地区紧密交错的现象。二是污染物分布呈现明显的两级分化，第一类地区污染特别严重，第五类地区污染很轻，其中河南与青海、西藏相比，TP 强度甚至相差约 100 倍。

3. 讨论

(1) 本研究在进行农业面源污染源空间分异研究时，没有按照多数已有研究所使用的污染强度分级标准将其分为轻度、中度、重度污染区 3 个类型，而是在已有研究结论基础上将污染程度分成了 4 组，其中化肥污染程度分组参考了国际警戒标准值。在聚

类分析时并非像已有研究将地区分异为农资污染型重污染区、水土流失型中度污染区和畜禽养殖型重污染区，而是利用 K-均值聚类方法原理将各地区按照污染强度分成了严重、较严重、一般、较轻、轻 5 类，并且根据农业面源污染排放物污染程度，对空间分布特征进行了分析。如此一来，在研究农业环境治理政策机制时，可以结合参考不同角度农业面源污染时空分异的相关研究结果。

(2) 现有农业环境治理政策相当缺乏，且相关研究很少“因地制宜”，更多的是“一刀切”，这样会受当地的农业、经济等发展情况的制约，只能造成农业面源污染防治的效率低下。制定与经济发展相协调的环保政策法规标准是我国的环境保护新道路要求。因此，我国亟需参考本文研究结果及其他相关研究结论，探求建立基于全国农业面源污染空间分异特征的地区性农业环境治理机制。

4. 结论

从实证结果来看，我国农业化肥投入、农田固体废弃物及畜禽排泄物，以及由其产生的 TN、TP、COD 三类排放物总体上都随时间呈增长趋势。我国农业面源污染程度（污染源和污染物两个角度）在空间上都呈现出以华北、中部地区为核心，向外辐射递减，且经济发达地区和农业发达地区的污染更为严重的分异特征；污染物的空间分布还存在明显的组间差距和两极分化现象，河南、山东、上海、天津污染特别严重，内蒙古、新疆、甘肃、

西藏、青海污染很轻。

我国农业经济全面发展阶段，存在经济增长模式粗放、经济利益驱动以及忽视生态环境价值等现象。农业面源污染时空特征分析也得出同已有农业面源污染机制研究相似的规律。即经济发展、农业生产活动与农业生态环境有着密切关系，在经济和农业迅速发展的阶段和发展水平高的地区农业面源污染严重，但人们生活水平的提高也会提高人们的环境意识，从而转变农业生产方式。因此，农业环境净化除了要使人们认识生态环境价值，还要全面结合地区经济社会和农业发展状况，准确把握区域发展差异，因地制宜、适时调整和完善农业环境政策。

中国人民大学环境学院 虞慧怡

中国人民大学农村与发展学院 扈 豪

清华大学环境学院 袁 强

中国人民大学环境学院 曾贤刚



清华大学 中国农村研究院

地址：北京·清华大学公共管理学院 301 室（邮编 100084）

电话：86-10-6277 3526

传真：86-10-6279 6949

电子邮箱：cirs@mail.tsinghua.edu.cn

网址：<http://www.cirs.tsinghua.edu.cn>

刊号：TH-T-1021

（使用本文需征得清华大学中国农村研究院同意）