

中国化肥投入的污染效应及其区域差异分析

张 锋¹, 胡 浩²

(1.江苏省农业科学院 农业经济与信息研究所,江苏 南京 210014;2.南京农业大学 经济与管理学院,江苏 南京 210095)

摘 要: 分别从农业化肥投入总量、强度、结构及其粮食增产效应等方面分析了中国化肥投入现状和时空变化特征,并利用清单分析方法,定量测算中国化肥投入面源污染数量。研究发现,中国化肥投入强度已远超发达国家设置的 225 kg/hm²的施肥上限,并呈现出从东到西递减的特点;化肥投入结构仍不合理,利用效率偏低,养分流失现象严重;化肥投入的粮食增产效应已变得不显著,单纯靠增加化肥投入以增加粮食产量的做法已逐渐行不通。同时,过量和不合理施用化肥造成了较为严重的面源污染,化肥投入面源污染呈现出典型的时空分布特征,并与地区经济发展水平关系密切。

关 键 词: 农业;化肥投入;面源污染

中图分类号: F323.22

文献标志码: A

文章编号: 1009-2013(2011)06-0033-06

Pollution effect of fertilizer application and regional differences in China

ZHANG Feng¹, HU Hao²

(1.Agroeconomy and information research institute, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China;

2.College of Economics & Management, Nanjing Agriculture University, Nanjing 210095, China)

Abstract: This paper analyzes the current situation and the spatial variation of the agriculture fertilizer from amount, intensity, structure its grain output effect, and calculates the amount of fertilizer input non-point source pollution based on the method of investigation list. Conclusion shows that the chemical fertilizer input intensity has far more than 225 kg/hm² fertilizer cap show from the east side to the west of diminishing acteristics; Fertilizer input structure is not reasonable, using efficiency is low, the soil nutrient loss is serious; Fertilizer input's grain output effect has become insignificant, simply by adding chemical fertilizer inputs to increase food production practice won't work. At the same time, excessive unreasonable chemical fertilizers cause serious non-point source pollution, and the non-point source pollution of chemical fertilizer input is typical temporal spatial distribution and is closely related with regional economic development.

Keywords: agriculture; fertilizer application; non-point source pollution

一、问题的提出

目前,中国是世界上化肥生产量和使用量最大的国家,也是世界上化肥投入强度最大的国家之一。数据显示,2008年,中国化肥投入总量达到5 239万吨,每公顷耕地化肥投入量也达到430.43 kg,位列世界第四,仅排在荷兰、韩国和日本之后,是美国的

4倍,大大超过了发达国家设置的225 kg/hm²安全上限,蔬菜主产区的化肥施用量更是高达1 000 kg/hm²。客观地说,长期以来持续增加的化肥投入对于解决中国粮食安全、促进农业增产和实现农民增收起到了巨大的作用,在中国农业的发展过程中具有不可替代的作用。

但是,近年来全国各主要湖泊、河流和近海水体富营养化事件频发,农业环境问题逐渐成为公众关注的焦点。大量研究表明,在诸多引致因素中,因过量和不合理施用化肥所带来的养分流失逐渐成为中国农业面源污染最主要的来源之一。^[1-3]中科院南京地理所对湖泊富营养化的研究表明,农田肥

收稿日期: 2011-10-25

基金项目: 国家社会科学基金重大招标项目(10ZD & 031); 江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(X09B-063R)

作者简介: 张 锋(1982—),男,湖南安乡人,博士、助理研究员,主要从事环境经济研究和农业技术经济研究。

料污染的负荷平均为 47%，农业面源污染物中总磷、总氮分别占滇池水污染物总负荷的 46% 和 53%，占太湖水污染物总负荷的 37% 和 13%。中国每年在粮食和蔬菜作物上施用的氮肥，有大约 17.4 万吨流失掉，而其中一半的氮肥从农田流入江河湖海，对当地、区域甚至全球范围的环境和生态系统功能产生严重的影响。同时，化肥的过量和不合理的施用也是一些地区湖泊和河流(如滇池、淮河、巢湖和太湖等)遭受污染和水体富营养化的主要来源之一(国家环保总局，2005 年)。因此，今后的农业生产，既要继续从增产增收的视角审视中国的化肥投入，也需要对因化肥过量和不合理投入所带来的污染效应予以充分关注。这有赖于对中国化肥投入的污染效应及其时空分异特征进行研究，以明确其时空演变规律。基于此，笔者拟先全面分析中国化肥投入强度、结构、粮食增产效应等，并进一步剖析中国化肥投入的污染效应及其时空变化特征，以期为中国化肥合理投入提供参考。

二、中国化肥投入特征及区域差异

1. 中国化肥投入强度

随着农业集约化程度的不断提高，中国化肥施用强度也在不断加大，数据显示，1980 年，按耕地面积来算，中国每公顷耕地的化肥施用量仅为 94.83 千克，2008 年则增长到 430.43 千克，增幅达 4.5 倍左右。按农作物播种面积来算，1980 年中国化肥施用强度为 86.72 kg/km²，2008 年则增长到 335.26 kg/km²，增长近 4 倍(表 1)。无论是从单位耕地面积还是从单位农作物播种面积来看，中国的单位化肥施用强度都已远远超过发达国家设置的上限，化肥的施用给中国带来了较为严重的环境风险。

2. 中国化肥投入结构

良好的化肥施用结构不仅有利于耕地生产率的提高，实现农作物高产稳产，也能够提高化肥的利用效率，降低化肥施用对农业环境的影响。1980 年，中国氮肥、磷肥和钾肥的施用量分别为 942.50 万吨、288.20 万吨和 38.70 万吨，N : P₂O₅ : K₂O 为 1 : 0.31 : 0.04，钾肥的投入严重不足。到 2008 年，中国氮、磷、钾肥的施用量分别为 2 815.99 万吨、1 316.67 万吨

表1 中国单位耕地面积的化肥施用强度 kg/km²

年份	按耕地面积	按农作物播种面积	年份	按耕地面积	按农作物播种面积
1980	94.83	86.72	1999	319.21	263.75
1985	135.12	123.64	2000	323.32	265.29
1990	198.94	174.59	2001	333.33	273.19
1991	215.44	187.52	2002	344.59	280.62
1992	225.40	196.65	2003	357.52	289.44
1993	243.06	213.34	2004	378.67	301.95
1994	256.24	223.82	2005	390.41	306.53
1995	277.41	239.77	2006	404.65	323.87
1996	294.37	251.21	2007	419.59	332.84
1997	306.44	258.54	2008	430.43	335.26
1998	315.00	262.27			

数据来源：历年《中国统计年鉴》，经作者计算整理所得

和 1104.09 万吨，N : P₂O₅ : K₂O 变为 1 : 0.47 : 0.39，该比例与中国适宜的氮、磷、钾比例为 1 : (0.4—0.45) : (0.4—0.5)^[4] 比例比较接近，可知中国化肥施用养分结构正逐渐趋于合理，但钾肥的投入量仍显不足。随着中国农作物产量不断提高和单位耕地面积耕种强度的不断加大，迅速上升的钾肥需求与钾肥投入之间的矛盾变得日渐突出，使中国土壤中钾的含量连年呈亏缺状态。因此，可以考虑在减量化投入氮、磷肥的基础上，适当增加钾肥的投入量，特别是在土壤缺钾较为严重的南方地区和施钾效益较高的经济作物如蔬菜、瓜果等生产集中区。

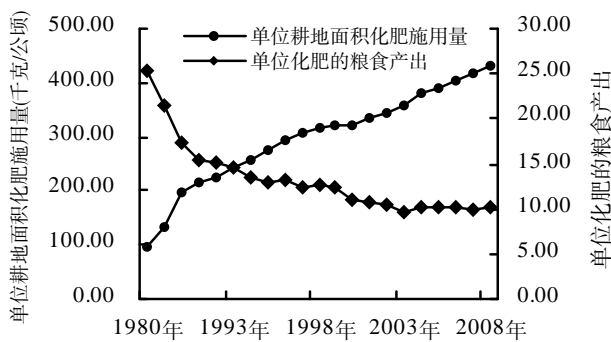
表2 1980—2008年中国化肥投入结构及氮磷钾比例的变化

年份	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N : P ₂ O ₅ : K ₂ O
1980	942.50	288.20	38.70	1 : 0.31 : 0.04
1985	1 258.20	418.70	98.90	1 : 0.33 : 0.08
1990	1 741.20	669.10	180.00	1 : 0.38 : 0.10
1995	2 268.70	877.80	447.10	1 : 0.39 : 0.20
2000	2 497.80	1 031.07	617.50	1 : 0.41 : 0.25
2001	2 523.41	1 074.63	655.07	1 : 0.43 : 0.26
2002	2 533.71	1 114.93	683.67	1 : 0.44 : 0.27
2003	2 557.79	1 121.06	732.71	1 : 0.44 : 0.29
2004	2 634.89	1 200.76	793.49	1 : 0.46 : 0.30
2005	2 685.49	1 245.14	835.15	1 : 0.46 : 0.31
2006	2 732.56	1 262.70	932.35	1 : 0.46 : 0.34
2007	2 788.79	1 287.91	1 030.12	1 : 0.46 : 0.37
2008	2 815.99	1 316.67	1 104.09	1 : 0.47 : 0.39

数据来源：历年《中国农村统计年鉴》，经作者计算整理所得；由于统计数据中并没有标明复合肥中氮、磷、钾的含量，故作者采用林葆(2003)提出的复合肥养分比例进行测算

3. 中国化肥投入与粮食产量关系

受边际报酬递减规律的影响, 1980—2008 年, 每千克化肥施用量的粮食产量从 25.25 千克快速减少至 10.09 千克(图 1), 化肥投入的粮食增产效应持续降低。利用 1980—2008 年中国粮食总产量(Y)和化肥施用总量(X)的时序数据进行简单回归, 回归方程的结果为: $Y = 21\ 747.28\ 126 + 10.643\ 381\ 07X - 0.001\ 028\ 986\ 937X^2$ ($R^2=0.75$), 可以看出化肥施用量与粮食产量之间存在经济学意义上的倒U型关系, 2008 年中国化肥的投入量已超过理论上粮食总产量最大化对应的 5 178.71 万吨化肥施用量。



数据来源: 历年《中国统计年鉴》和《中国农村统计年鉴》, 经作者计算整理所得

图1 1980—2008年中国单位耕地面积的化肥投入量及单位化肥的粮食产出情况

4. 中国化肥投入的地区差异

(1) 不同地区化肥投入总量。中国地域辽阔, 经济发展水平、自然资源、种植业结构条件差别较大, 造成中国各地区在化肥消费上存在较大的差异。2008 年, 中国化肥施用总量达 5 239.02 万吨, 消费量居前 10 的省份主要有河南、山东、湖北、江苏、四川+重庆、河北、安徽、广东、湖南和广西, 消费总量达 3 369.72 万吨, 占全国化肥消费的 64%。从农业分区角度来看, 黄淮海地区和长江中下游地区是中国化肥消费量最大的区域, 两区化肥消费量占全国 55%, 西北区和西南区的化肥施用量相对较低。也即, 中国化肥消费地区较为集中, 地区分布极不均衡(图 2)。

(2) 不同地区化肥投入强度的差异。从时间趋势来看, 中国各省区的化肥施用强度在总体上也呈现出快速增加的趋势(图 3—6), 1980 年, 除上海、山东、江苏、北京、福建和广东外, 中国其他省市

的化肥施用强度都在 225 kg/hm²以下, 其中西藏、青海、内蒙和黑龙江的化肥施用强度低于 100 kg/hm²。到 2008 年, 绝大多数省份的化肥施用强度都上升到 225 kg/hm²以上, 部分省市的化肥施用强度更是达到了 500 kg/hm²的超高水平。

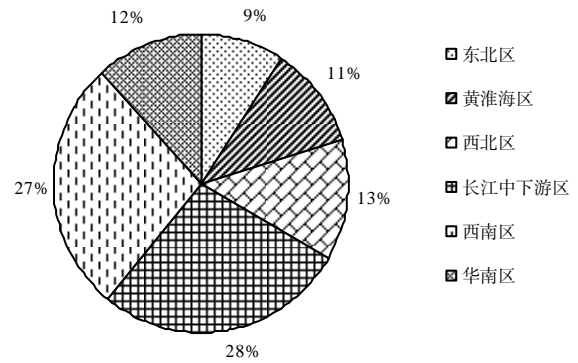


图2 2008年中国不同农业区化肥消费量占全国化肥消费量的比例

与中国经济发展程度梯级格局一致, 中国化肥投入强度也存在着从东向西逐渐递减的现象。具体而言, 2008 年, 中国施肥量超过 400 kg/hm²以上省份有 9 个(图 6), 主要分布在经济发达的沿海地区, 主要包括天津、福建、广东、山东、北京、江苏和海南等省, 其中天津、海南和福建每公顷播种面积的化肥施用量一度高达 530 千克以上。化肥施用量在 300-400 kg/hm²的省(市、区)有河北、辽宁、吉林、上海、浙江、安徽、广西、陕西和新疆。但仍然有很多省份的化肥施用强度远低于全国平均水平, 这些省份包括山西、内蒙古、黑龙江、江西、湖南, 四川、重庆、贵州、云南、甘肃、青海、西藏和宁夏。

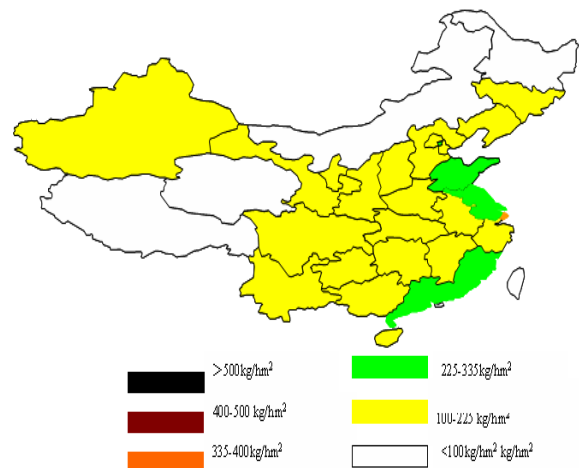


图3 1990年中国单位播种面积化肥施用强度

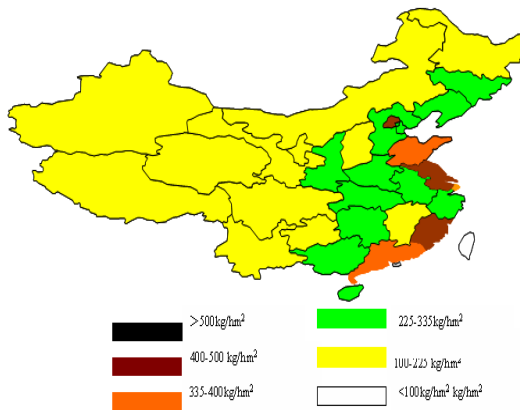


图4 2000年中国单位播种面积化肥施用强度

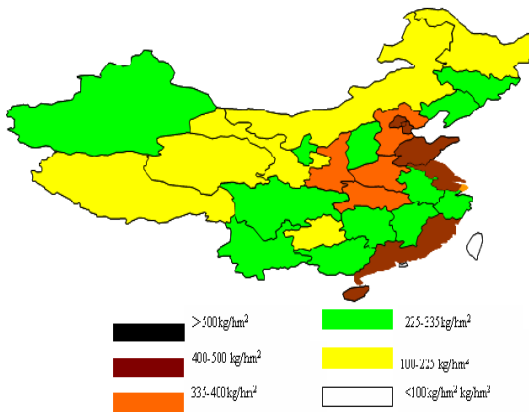


图5 2005年中国单位播种面积化肥施用强度

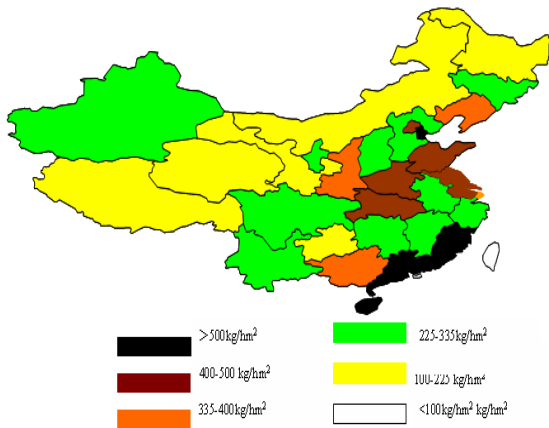


图6 2008年中国单位播种面积化肥施用强度

三、中国化肥面源污染测度及区域分异

1. 测度方法

已有的关于农业面源污染定量测度的方法主要有四种: 1)利用自然科学领域的大量模拟和实验,构建数学模型对农业面源污染负荷进行测度。但这类方法的监测成本较高,而且相关记录和普查数据

较为缺乏,因此在大尺度区域采用加总小流域模拟结果的方法是不现实的。2)以综合调查数据为基础的定量分析方法。近年来,中国学者对国内重点流域和部分小流域进行了多次的非点源污染调查,在此基础上,学者构建了基于单元综合调查评价方法和清单分析方法,使之能够适用于大尺度区域的农业面源污染的测度。该方法的缺陷是,在估算过程中没有考虑自然条件、不同土地利用类型和化肥施用强度等因素对氮素流失的差异,而是取统一的流失系数,可能造成估算结果的不准确。3)寻求相应的替代指标,如利用化肥施用量或化肥施用密度指标表示化肥施用带来的面源污染,^[5]这些指标忽略了其对水环境质量的真实影响,无法在同一尺度上比较各地农业面源污染的程度。4)OECD养分平衡分析方法,该方法用氮、磷素的盈余量来表示农业活动对农业环境的污染程度。^[6]该方法具备简单易行的优点,可以在较大程度上反映农业生产活动对水环境的影响,但养分平衡法并不能反映出氮、磷素是留存在土壤中还是流失到大环境中,养分的流向存在“黑箱”的问题。

由于基于单元的综合调查评价方法在测度和分析化肥施用农业面源污染方面具有无可比拟的优点,也能够较好地适用于大尺度的农业面源污染的测度,因此,本文利用清单分析的思路,并充分考虑不同区域土地利用类型和化肥施用强度对面源污染影响差异性,以省(市、自治区)为基本核算单位,对中国化肥施用的面源污染程度进行测度。该方法主要评估农业生产中化肥施用产生的污染物,在降水和灌溉过程中通过地表径流和排水等途径汇入地表水体引起的氮、磷污染。它的核心思想是以农业活动为出发点,以农业统计数据为依托,以单元为核心,假设一定的化肥施用量对应一定的面源污染排放量,综合多种分析方法建立化肥施用与污染排放量之间的响应关系。^[7]

2. 中国化肥投入面源污染时空分异

从总量分布及变化趋势来看,1990年中国化肥投入的总氮、总磷污染数量分别为313.27万吨和16.66万吨,到2008年这一数量分别增长至408.88万吨和25.03万吨,增幅分别达到30.52%和50.24%。各省(市)1990—2008化肥施用面源污染的总氮数量如表3所示。

表3 1990-2008中国化肥施用面源污染的总氮(TN)数量及区域分异(万吨)

地区	1990	1995	2000	2002	2004	2006	2007	2008
北京	3.10	3.81	3.12	2.49	2.37	2.34	2.16	2.09
天津	1.47	2.31	2.76	2.82	3.45	3.63	3.81	3.62
河北	19.15	25.72	29.6	29.54	29.84	31.02	31.22	30.69
山西	3.56	4.02	4.22	4.08	4.05	4.08	4.05	4.03
内蒙古	4.51	6.46	8.56	9.18	10.84	12.8	13.52	14.6
辽宁	11.77	13.46	13.34	12.7	12.88	12.68	13.08	13.11
吉林	11.68	12.4	12.94	12.58	17.68	12.42	12.54	12.78
黑龙江	4.00	5.12	5.24	5.27	5.71	6.12	6.59	6.66
上海	4.85	5.52	4.57	3.72	2.85	2.61	2.49	2.66
江苏	46.45	53.01	56.79	55.8	54.93	54.84	54.84	54.22
浙江	20.69	20.49	17.91	17.04	16.59	16.62	16.17	16.08
安徽	9.30	10.59	11.84	11.89	11.09	11.17	11.15	11.18
福建	8.98	10.32	11.14	10.42	10.26	9.98	9.68	9.47
江西	4.71	6.00	4.75	4.68	4.70	4.74	4.53	4.51
山东	32.29	37.82	39.72	37.94	37.06	38.72	38.62	34.06
河南	14.00	17.68	20.57	22.05	22.13	23.54	23.90	23.95
湖北	18.81	25.92	26.54	26.62	28.50	28.10	28.56	29.87
湖南	15.71	19.30	19.62	19.50	20.78	21.36	21.54	21.30
广东	29.59	29.85	28.77	28.98	28.80	28.26	28.35	29.43
广西	4.65	5.40	5.69	5.93	6.15	6.54	6.73	6.79
海南	0.74	0.78	1.07	0.96	1.22	1.19	1.16	1.39
川渝	14.11	15.32	16.90	16.32	16.66	17.11	17.59	17.86
贵州	5.35	7.36	8.44	8.72	8.66	9.14	9.18	9.25
云南	7.27	10.20	13.22	14.54	15.76	16.64	17.32	18.38
西藏	0.08	0.08	0.12	0.14	0.17	0.18	0.19	0.17
陕西	9.93	13.38	14.6	14.28	15.50	15.30	16.22	16.26
甘肃	2.25	2.69	3.00	3.45	3.52	3.67	3.82	3.77
青海	0.29	0.32	0.33	0.33	0.30	0.32	0.32	0.33
宁夏	1.70	2.18	2.72	2.90	2.86	3.14	3.32	3.33
新疆	2.38	3.64	4.28	4.31	4.89	5.84	6.35	7.14
全国	313.27	371.15	392.27	389.08	400.20	404.10	409.00	408.88

数据来源:历年《中国统计年鉴》,经作者计算整理所得

3. 不同经济发展水平下化肥投入面源污染

从化肥施用面源污染及地区间的差异来看,在我国人均 GDP 排名前六的省市中,化肥施用的总氮和总磷污染在整体上均呈现出先上升后下降的趋势(图 7),结合表 3,从 2000—2008 年,上海、北京、天津、浙江和江苏省的化肥投入总氮污染数量分别从 2000 年的 4.57 万吨、3.12 万吨、2.76 万吨、17.91 万吨和 56.79 万吨下降到 2008 年的 2.66 万吨、2.09 万吨、3.62 万吨、16.08 万吨和 54.22 万吨。从图 8 可以看出,全国人均 GDP 排名末六位的省份,其化肥施用面源污染中的总氮污染物数量呈现出不断增加的趋势。具体而言,从 1990—2008 年,贵州、云南、甘肃、安徽、川渝和广西

等经济落后地区化肥施用的总氮污染数量分别从 1990 年的 5.35 万吨、7.27 万吨、2.25 万吨、9.3 万吨、14.11 万吨和 4.5 万吨上升至 2008 年的 9.25 万吨、18.38 万吨、3.77 万吨、11.18 万吨、17.86 万吨和 6.79 万吨。

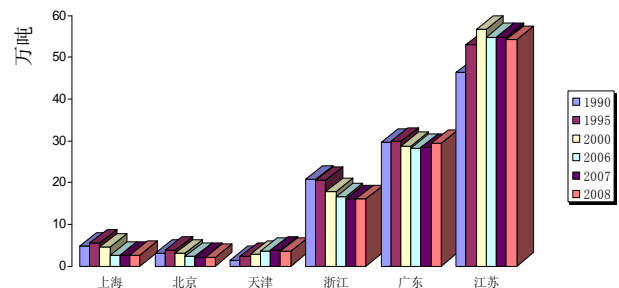


图7 人均GDP前六位省份总氮污染量的分布

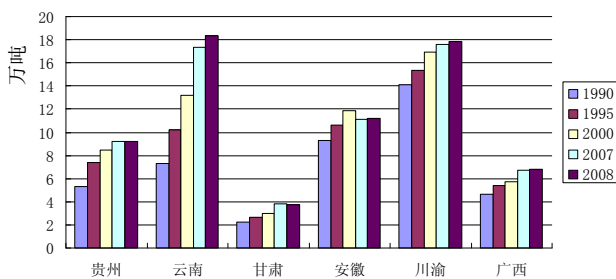


图8 人均GDP全国末六省总氮污染量分布

四、结论及启示

2008年,中国施肥量超过 400 kg/hm^2 以上省份有9个,主要分布在经济发达的东部沿海地区,如天津、福建、广东、山东、北京、江苏和海南等,其中天津、海南和福建每公顷播种面积的化肥投入量一度高达530千克以上,如此高强度的化肥投入对中国粮食的增产效应已经逐渐变得不显著,单纯依靠增施化肥来提高粮食产量的方法越来越行不通。同时,由于中国农户施肥技术水平落后和政府农业环境管制政策的缺失,使得中国化肥投入的环境污染问题逐渐成为农业面源污染最主要的来源之一,是近年来全国各主要河流、湖泊、近海和地下水等水体污染的主要原因之一。本文利用清单分析方法对中国化肥投入的总氮和总磷污染数量进行测度,结果表明:2008年全国化肥投入产生的总氮和总磷污染数量分别达到408.88万吨和25.03万吨;对全国经济发达和经济落后地区的化肥投入环境污染进行对比分析发现,经济发达地区的化肥投入的总氮、总磷污染存在先上升后下降的特点,而经济落后地区则一直处于上升的趋势。主要原因可能是发达地区农业生产和农产供应地已经逐渐向经济发展相对落后的内陆和周边省市转移,是比较优势规律作用的结果,也是资源重新配置和优化组合的必然选择。在欠发达地区,农业生产已经没有向其他地区转移的可能性,解决和控制化肥投入的

面源污染的关键之处在于降低农户的化肥投入数量和优化化肥投入结构。

因此,为了确保国家粮食安全,降低化肥投入的环境风险,需要在减量施用化肥的同时优化化肥的投入结构,这依赖于科学施肥技术的开发与推广。结合实际,测土配方施肥技术是联合国公认的环境友好型施肥技术,也是近年来中国大力普及推广的科学施肥技术。大量的田间实验表明,该技术不仅具有增产增收技术的特征,能够显著地改善化肥的投入结构,提高化肥利用率,进而降低施肥对环境的影响。2005年至今,国家投入了大量的财力、物力和人力推广应用该技术,但是农户的实际采用率并不高。因此,采取多种途径,大幅提高农户测土配方施肥技术采用水平,对于降低中国化肥投入水平、优化化肥投入结构、提高化肥利用效率、降低化肥施用对环境的影响,意义重大。

参考文献:

- [1] 张维理,武淑霞,冀宏杰,等. 中国农业面源污染形势估计及控制对策 I. 21世纪初期中国农业面源污染的形势估计[J]. 中国农业科学, 2004(7): 1008-1017.
- [2] 朱兆良, David Norse, 孙波. 中国农业面源污染控制对策[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2006.
- [3] 郑鑫. 丹江口库区农户有机肥施用的影响因素分析[J]. 湖南农业大学学报: 社会科学版, 2010(1): 11-15.
- [4] 李庆逵, 朱兆良, 于天仁. 中国农业持续发展中的肥料问题[M]. 南昌: 江西科学技术出版社, 1998.
- [5] 陈玉成, 杨志敏, 陈庆华, 等. 基于“压力—响应”态势的重庆市农业面源污染的源解析[J]. 中国农业科学, 2008(8): 2362-2369.
- [6] 陈晓华, 张红宇. 中国环境、资源与农业政策[M]. 北京: 中国农业出版社, 2007.
- [7] 梁流涛, 冯淑怡, 曲福田. 农业面源污染形成机制: 理论与实证[J]. 中国人口、资源与环境, 2010(4): 74-80.

责任编辑: 李东辉