

王磊, 香宝, 苏本营, 等. 京津冀地区农业面源污染风险时空差异研究[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(7): 1254–1265.

WANG Lei, XIANG Bao, SU Ben-ying, et al. Spatial-temporal variation of agricultural non-point source pollution risk in Beijing-Tianjin-Hebei Region, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(7): 1254–1265.

京津冀地区农业面源污染风险时空差异研究

王磊^{1,2}, 香宝^{1,2*}, 苏本营^{1,2}, 王玥^{1,2}, 方广玲^{1,2}, 胡钰^{1,3}, 潘丽波^{1,2}, 戴霞^{1,2}

(1. 中国环境科学研究院农业面源污染防治与管理研究中心, 北京 100012; 2. 国家环境保护区域生态过程与功能评估重点实验室, 北京 100012; 3. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875)

摘要:为探究京津冀区域农业面源污染情况, 采用 GIS 空间分析方法, 对该地区农业面源的时空动态变化进行了研究。结果表明: 时间上该区域化肥施用量呈逐年增加态势, 由 2000 年的 305.12 万 t 增加到 2014 年的 370.50 万 t; 化学农药施用量相对稳定, 由 2000 年的 81.88 万 t 增加到 2014 年的 89.93 万 t; 而畜禽粪尿排放量则由 2000 年的 2.35 亿 t 减少到 2014 年的 1.96 亿 t。空间上化肥污染高风险县市区和畜禽粪尿污染(主要为氮素和磷素污染)县市区数量增长较快, 分别从 2000 年的 33、34、60 个增加到 2014 年的 72、78、112 个。该区域化肥污染高风险县市区主要分布在中部和东部的北京、天津、唐山、秦皇岛大部分县市区及南部的石家庄、衡水、邯郸部分县市区; 氮素高风险县市区主要分布在石家庄、保定、张家口、承德、秦皇岛、邯郸等大牲畜奶牛、肉牛及生猪优势产区; 磷素高风险区主要分布在石家庄、保定、廊坊、张家口、承德、秦皇岛、邯郸等大牲畜奶牛、肉牛及家禽集中养殖区。研究表明, 京津冀地区化肥和畜禽粪尿(N、P)高污染风险县市区数量大幅增加且分布广泛, 对农作物单产过度追求是化肥施用量逐年增加的主要驱动因素, 而耕地面积减少和集约化养殖是氮磷面源污染高风险县市区增加的主要原因。

关键词: 京津冀; 农业面源污染风险; 时空差异

中图分类号: X592 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2017)07-1254-12 doi:10.11654/jaes.2016-1539

Spatial-temporal variation of agricultural non-point source pollution risk in Beijing-Tianjin-Hebei Region, China

WANG Lei^{1,2}, XIANG Bao^{1,2*}, SU Ben-ying^{1,2}, WANG Yue^{1,2}, FANG Guang-ling^{1,2}, HU Yu^{1,3}, PAN Li-bo^{1,2}, DAI Xia^{1,2}

(1. Agricultural Non-point Source Pollution Control and Management Research Center, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. State Environment Protection Key Laboratory of Regional Ecological Processes and Functions Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 3. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: In order to understand current situation of agricultural non-point source pollution (ANSP) in Beijing-Tianjin-Hebei region. GIS spatial analysis was used to research the temporal and spatial variation of ANSP in Beijing-Tianjin-Hebei region. The results showed that the application rate of chemical fertilizers increased year by year from 3.051×10^6 t in 2000 to 3.705×10^6 t in 2014. The application rate of

收稿日期: 2016-12-01

作者简介: 王磊(1991—), 男, 安徽阜阳人, 硕士研究生, 主要从事农业面源污染防治研究。E-mail: mywlei@yeah.net

* 通信作者: 香宝 E-mail: xiangbao@craes.org.cn

基金项目: 国家科技支撑计划课题(2014BAD14B02); 国家重点研发计划课题(2016YFD0800905); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2015ZX0720300700101); 中国环境科学研究院院长基金(2006001001004028)

Project supported: The National Key Technology Research and Development Program of the Ministry of Science and Technology of China(2014BAD14B02); The National Science and Technology Major Project of the Ministry of Science and Technology of China(2016YFD0800905); The National Water Pollution Control and Management of Science and Technology Major Projects of China(2015ZX0720300700101); The Dean Foundation of Chinese Research Academy of Environmental Sciences(2006001001004028)

chemical pesticide was relatively stable from 8.188×10^6 t in 2000 to 8.993×10^5 t in 2014; livestock and poultry manure discharge reduced from 2.35×10^8 t in 2000 to 1.96×10^8 t in 2014 in the region. The spatial distribution analysis showed that the amounts of chemical fertilizer pollution and livestock and poultry manure pollution(N,P) in high-risk counties respectively increased from 33,34,60 in 2000 to 72,78,112 in 2014. The chemical fertilizer pollution in high-risk area is mainly distributed in the central and eastern parts of the region(counties in Beijing,Tianjin,Tangshan,Qinhuangdao) and southern parts of the region(counties of Shijiazhuang, Hengshui,Handan). Nitrogen pollution high-risk areas are mainly distributed in large livestock cows, beef cattle and advantage of pig producing areas in Shijiazhuang, Baoding, Zhangjiakou, Chengde, Qinhuangdao and Handan; Phosphorus high-risk areas are mainly distributed in large livestock cows, beef cattle and poultry breeding areas in Shijiazhuang, Baoding, Langfang, Zhangjiakou, Chengde, Qinhuangdao and Handan. Our results indicated that chemical fertilizers and livestock and poultry manure pollution(N,P) in high-risk counties were increased rapidly and wide-spreading in Beijing-Tianjin-Hebei region. The excessive yield of crops is the main driving force to increasing application rate of chemical fertilizer. The reduction of cultivated land area and intensification of farming were the main reasons for the increase of nitrogen and phosphorus high-risk counties.

Keywords: Beijing-Tianjin-Hebei; agricultural non-point source pollution risk; spatial-temporal variation

农业面源污染,又称为农业非点源污染,指溶解性或固体污染物在大面积降水和径流冲刷作用下,汇入受纳水体而引起的水体污染,其污染物来源主要包括水土流失、农业化学品过量施用、生活污水、畜禽养殖和农业与农村废弃物等^[1]。与农业面源污染相关的工作及相应的法规和政策最早见于美国,1972年,针对日益严重的水体环境污染,美国环保局要求各州从1975年开始必须给出非点源控制方案,紧接着,1977年美国清洁水法案出台,制定了控制污水排放的基本法规。自此以后,西方各国纷纷开展农业非点源污染研究,主要针对观测资料的统计与分析,并提出相应的政策与农业管理措施。Carpenter等^[2]于1998年指出,非点源污染是美国地表水中氮和磷的主要来源,农田中过量施肥与畜禽养殖密度过大导致的氮素盈余成为非点源污染的重要原因,在国际上引起很大反响,农业非点源污染研究逐渐走向深入。

随着人们对物质迁移转化过程的深入了解,以及计算机运算能力的提高,“3S”技术逐渐被引入生物迁移、转化、污染扩散与风险评估中,各国相继制定了各类污染物排放标准和风险评估技术规范^[3]。此外,国外学者在农业面源污染防治政策的激励机制方面也进行了深入的理论研究,各国也结合自身面源污染发生特征出台了相应的控制政策法规^[4]。国内相关学者对农业面源污染问题也开展了一系列研究与探讨,目前主要集中在农业面源污染的社会经济诱因^[5]、形成机理^[6]、农户行为^[7]等。2013年高懋芳等^[8]通过统计1995—2012年ISI Web of Science和CNKI两大数据库中有关农业面源污染方面的文章发现,污染治理技术、污染现状调查等方面文章数量处于前两位,面源污染负荷模拟次之,较为缺乏的是关于面源污染控制

管理、驱动因子与影响因素、环境风险评价等方面的研究,弥补这些方面研究的空白和缺陷已经逐渐成为面源污染研究的热点问题。

中国是农业大国,种植业和养殖业分布广泛、普遍存在,致使农业面源污染分布具有范围广、随机性大、隐蔽性强、不易监测、难量化及控制难度大等特点。第一次全国污染源普查公报显示,农业源COD、TN和TP的排放量占污染源总排放的比例分别为43.7%、57.2%和67.4%,农业面源污染已成为中国目前环境污染的重要来源,也是当前农村环境质量提升的主要限制因素,制约着农业现代化的发展。针对农业面源污染研究的尺度,大多集中于市、县(区)级的农业面源污染现状与防控方面,而对省域等大尺度上的研究较少。另外,在研究方法上,运用GIS技术探讨农业面源状况的报道较少^[9-10],缺乏对农业面源污染空间动态变化等方面的研究^[11]。

京津冀地区同属京畿重地,战略地位十分重要,近年来,随着该区域城市人口迅猛增加和农村经济快速发展,化肥、农药投入强度已处于全国前列^[12],严重威胁着区域农业可持续发展。鉴于此,该区域相关省市相继出台了《农业面源污染治理行动计划》等相关政策文件;针对化肥农药过量施用、规模化养殖场畜禽废弃物无害化程度低等环境问题,国家启动了京津冀地区耕地质量提升、生态循环农业试点建设、畜禽水产标准化规模养殖、测土配方施肥等项目,以期缓解和改善该区域农业面源污染问题。但由于京津冀地域辽阔,地貌复杂多样,同时各县市区自然环境和经济社会发展环境各具特色,农业面源污染特征差异较大,调查难度加大,导致该区域面源污染时空特征研究相对缺乏。为此,本研究以京津冀农业生产区为研

究对象,分析了近15年区域农业面源污染时空变化规律,以期为京津冀地区农业面源污染风险管控和生态环境质量提升决策提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

京津冀地处华北平原,位于 $113^{\circ}27'\sim 119^{\circ}50'E$, $36^{\circ}05'\sim 42^{\circ}40'N$,是我国重要粮棉产区和集约化蔬菜种植区,也是城郊型农业集中分布区。区域土地面积为21.6万 km^2 ,约占全国的2.7%,人口达1.1亿;区域内分布的海河、滦河两大河流水系,是居民生活和农业生产的主要水源;区域土壤类型以棕壤、褐土、潮土、栗钙土为主,耕地面积6.54万 km^2 ,约占区域总面积的30%。

京津冀地区包括北京、天津两直辖市以及河北省的保定、廊坊、唐山、秦皇岛、石家庄、张家口、承德、沧州、邯郸、邢台、衡水11个地级市,作为未来中国区域发展“三大战略”之一,该区域在中国社会经济发展中具有重要的战略地位。2015年4月30日中共中央政治局审议通过的《京津冀协同发展规划纲要》明确指出,京津冀是一个整体,京津冀协同发展不只是经济文化协同共进,大气污染治理、水环境保护、面源污染治理等生态环境问题也应协同治理、共同进步。近年来,由于化肥、农药过量施用,畜禽粪尿、生活污水、生活垃圾随意排放,该区域农业面源污染问题突出,引发雾霾频发、水体富营养化、农产品质量安全等问题,对区域大气、水体、土壤等生态环境和人体健康构成极大威胁。

1.2 数据来源

本研究采用的化肥施用量、农药施用量、畜禽养殖量、农作物播种面积及耕地面积等资料数据分别来自《中国农村统计年鉴(2000—2014)》《北京市农业统计年鉴(2000—2014)》《天津市农业统计年鉴(2000—2014)》《河北省农业统计年鉴(2000—2014)》。排污系数、畜禽饲养天数等数据源于已发表的文献及学位论文^[13-17]。

1.3 研究方法

数据分析与绘图方法:以县市区为基本单元,应用SPSS 19.0数据处理软件对京津冀地区相关数据(化肥、农药施用量,畜禽养殖出/存栏量)进行分析,并参考前人研究成果,对京津冀农业面源污染进行分级,利用SPSS 19.0、Origin 9.0、ArcMap10.1软件,结合相关系数(表1)绘制施肥量、畜禽粪尿排放量年际变

表1 畜禽污染物的年排泄情况、肥分数据

Table 1 Annual discharge of pollutants and nutrients (N and P) from livestock and poultry breeding

污染源	牛	猪	蛋禽	肉禽	羊
粪/kg·头 ⁻¹ ·d ⁻¹	32.84	2.53	0.12	0.10	2.0
尿/kg·头 ⁻¹ ·d ⁻¹	13.24	8.32	0	0	0.5
饲养时间/d	365	180	365	55	365
N/% 粪	0.60	0.78	1.30	1.10	0.68
尿	0.64	0.48	0	0	1.45
P/% 粪	0.25	0.10	1.60	1.01	0.38
尿	0.05	0.10	0	0	0.11

化表格、图形,按分级标准绘制典型年份京津冀化肥、农药、畜禽粪尿氮磷污染风险空间分布图。此外,由于部分县市区耕地面积数据缺失,采用农作物复种指数进行折算^[18]。

化肥污染风险分区方法:针对化肥过量施用导致的污染,我国目前缺乏这方面分级法律法规,采用发达国家为防止化肥对水体造成污染而设置的警戒线(单位播种面积 $225\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)为标准^[19],国内学者开展的相关研究^[11,20]多以该警戒线为依据。因此,将化肥污染低风险区、中风险区、高风险区分别对应: <225 、 $225\sim 400$ 、 $>400\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

农药污染风险分区方法:由于农药种类繁多、成分复杂,具体施用量受农民种植习惯、农作物种植类型和气候等因素影响,国内外缺乏对于化学农药污染的标准、规范。因此,参考前人研究成果,采用单位农作物播种面积农药施用量来区分农药污染程度^[21],农药污染低风险区、中风险区、高风险区分别对应: <10 、 $10\sim 20$ 、 $>20\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

畜禽粪尿氮磷污染分区方法:畜禽养殖污染程度采用粪尿中N、P排放强度来表示,即单位耕地面积N、P负荷量。根据京津冀区域养殖现状,其畜禽主要包括牛、猪、羊和家禽四类。中国缺乏畜禽粪尿污染控制方面的标准、规范,本研究采用欧盟硝酸盐法中规定的标准,即单位耕地面积畜禽粪尿氮磷素负荷限量值为 $170\text{ kgN}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $35\text{ kgP}\cdot\text{hm}^{-2}$ ^[22]。国内学者开展的相关研究^[19,23]多数参考该限量值。结合该区域畜禽粪尿氮磷素负荷状况,将氮素污染低风险区、中风险区、高风险区分别对应: <170 、 $170\sim 340$ 、 $>340\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$;磷素污染低风险区、中风险区、高风险区分别对应: <35 、 $35\sim 70$ 、 $>70\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

畜禽粪尿氮(磷)素排放量=日排放系数 $\times$ 饲养头数 $\times$ 畜禽数量 $\times$ 肥分百分比。

2 结果与分析

2.1 京津冀地区农业面源污染时间变化特征

2.1.1 化肥污染

通过对京津冀地区 15 年来,12 种主要农作物播种面积、化肥施用量等相关数据对比分析发现,2014 年与 2000 年相比,该区域农作物播种总面积减少 619.44 万 hm^2 ,降低 6.2%;但经济作物+蔬菜的播种面积所占比例却从 25.71%增长到 28.30%,增加 2.59%。化肥施用总量、化肥施用强度处于持续增长的趋势(表 2),15 年间,该区域化肥施用总量和单位播种面积施用量分别从 2000 年的 305.12 万 t 和 304.77 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 增加到 2014 年的 370.50 万 t 和 394.48 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。与发达国家为防止化肥对水体造成污染而设置的安全警戒线 225 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 相比,单位播种面积化肥施用量(304.77 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)最低的年份(2000 年)也超过了安全警戒线,尤其从 2007 年开始,每年单位播种面积化肥施用量均在国际警戒线水平的 1.5 倍以上。自 2010 年起,该区域化肥施用总量增长速度相对减慢,仅增加了 2.3%,但单位播种面积化肥施用量增加了 3.5%,增速远远大于总量增速。

近年来,我国经济作物和蔬菜的单位面积施肥量不断增长^[24],京津冀地区由于种植结构的调整,经济

作物+蔬菜播种面积所占比例增加,可能是引发该区域化肥施用总量不断增加的原因^[25-26]。此外,由于城镇化和工业化发展导致该区域农作物播种面积不断下降,使得化肥施用强度持续快速增加,近 5 年平均施用量 386.33 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,超出全国平均水平^[24](346.1 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)12%,是全国面源污染重点防控地区。

2.1.2 农药污染

京津冀地区由于作物种植类型和自然气候条件多样,农药施用类型也相对多样,且成分复杂。表 3 显示 2000—2014 年京津冀地区农药施用情况。就施用总量而言,2014 年该区域农药总施用量为 89.93 万 t,与 2000 年相比增加了 9.83%;农药单位播种面积施用量 2014 年为 9.58 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,较 2000 年增加了 20.42%。2000—2014 年间京津冀地区农作物播种面积因城市扩张而逐年减少,尽管农药施用总量增加幅度较小,但单位播种面积施用量却大幅增加,2014 年北京市单位播种面积农药施用量已高达 18.4 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,部分县市区处于高污染风险区域。此外,长期农药施用已导致病虫抗药性增加,防治效果大幅降低,农药施用有进一步增加的趋势,致使农药污染进一步加重,且呈现污染类型多样化。农药污染物一般难以降解,在农产品、土壤、地表水和地下水中持续累积,对生态环境和人体健康构成极大威胁。

2.1.3 畜禽粪尿污染

近年来,随着京津冀地区区域功能定位和农业生产方式转变,该区域畜禽养殖量呈先增加后降低的趋势,2000—2005 年快速增长,2005—2014 年有所下降,其中大牲畜牛的养殖数量大幅降低,存栏量由 2000 年的 736.53 万头下降到 2014 年的 452.04 万

表 2 京津冀区域 2000—2014 年播种面积、种植结构及化肥施用情况

Table 2 Chemical fertilizer application during year 2000—2014 in Beijing-Tianjin-Hebei Region

年份	总播种面积/ 万 hm^2	占总播种面积的比例/%		化肥施用量	
		粮食作物	经济作物+蔬菜	总量/ 万 t	单位播种面积 施用量/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$
2000	10 011.50	74.29	25.71	305.12	304.77
2001	9 915.30	70.83	29.17	306.38	308.99
2002	9 792.90	69.54	30.46	311.30	317.88
2003	9 441.00	65.65	34.35	315.41	334.09
2004	9 503.70	66.19	33.81	327.28	344.38
2005	9 592.80	68.91	31.09	341.49	355.99
2006	9 463.70	70.66	29.34	344.33	363.85
2007	9 381.70	70.05	29.95	351.66	374.83
2008	9 481.50	69.58	30.42	351.93	371.18
2009	9 457.70	70.51	29.49	355.99	376.41
2010	9 494.97	70.95	29.05	362.03	381.28
2011	9 544.70	70.48	29.52	364.48	381.88
2012	9 548.50	70.64	29.36	367.53	384.92
2013	9 465.00	71.21	28.79	368.14	388.94
2014	9 392.06	71.70	28.30	370.50	394.48

表 3 京津冀区域 2000—2014 年农药施用情况

Table 3 Pesticides application during year 2000—2014 in Beijing-Tianjin-Hebei Region

年份	农药		年份	农药	
	总量/ 万 t	单位播种面积 施用量/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$		总量/ 万 t	单位播种面积 施用量/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$
2000	81.88	8.18	2008	92.75	9.78
2001	81.12	8.18	2009	94.27	9.97
2002	81.88	8.36	2010	92.31	9.72
2003	82.98	8.79	2011	90.54	9.49
2004	84.07	8.85	2012	88.71	9.29
2005	88.77	9.25	2013	90.58	9.57
2006	89.32	9.44	2014	89.93	9.58
2007	90.78	9.68			

头,粪尿产生量由2000年的1.24亿t下降到2014年的0.76亿t。而消费量相对较大的猪、羊和家禽出栏量/存栏量均呈小幅增加趋势,猪、羊和家禽粪尿产生量分别由2000年的7933、1886、1306万t增加到2014年的8458、2122、1400万t(图1)。2000—2014年该区域畜禽粪尿氮磷的变化趋势与畜禽养殖数量变化趋势一致(图2),2000年牛、猪、家禽、羊粪尿中氮素产生量分别为70.06、43.63、16.45、15.73万t,2014年分别为43、46.51、17.63、17.69万t;15年间牛养殖产生的粪尿氮素降低了39%,而猪、家禽和羊的产生量略有增加;2000年牛、猪、家禽和羊粪尿磷素产生量分别为23.85、7.93、19.34、6.15万t,2014年则分别为14.64、8.46、20.73、6.92万t,15年间牛养殖产生的粪尿磷素降低了39%,猪、家禽和羊的略有增加。

2000—2014年该区域畜禽粪尿组成结构发生较大变化,但牛和猪粪尿是畜禽粪尿的主要组成,其中,牛粪尿占总畜禽粪尿排放量的比例由2000年的50%

下降到2014年的38%,而猪粪尿占总畜禽粪尿比例则从2000年的34%增加到2014年的43%。对畜禽粪尿氮磷素分析可知,牛和猪粪尿氮素和磷素产生量一直处于主导地位,但是牛粪尿氮素和磷素的产生量在2000—2014年间不断下降,而猪和家禽粪尿氮素和磷素产生量则不断上升,其中猪粪尿氮素产生量于2012年超过牛,占总畜禽粪尿氮素产生量的37%;而家禽粪尿中磷素产生量则于2006年超过牛,占总畜禽粪尿磷素产生量的41%。这些变化无疑会加重京津冀区域畜禽粪尿氮磷素污染,故应重视对规模化猪、牛、家禽养殖场的整改,配套相应粪尿处理设施,并将畜禽粪尿磷素污染防治纳入重点,防止畜禽粪尿随意排放引发的区域环境污染。

2.2 京津冀农业面源污染风险空间格局

针对京津冀地区农业面源污染风险空间分布特征,文章选择4个代表年份(2000、2005、2010、2014年),分析了该区域182个县市区农业面源污染风险发生的时空变化。

2.2.1 化肥污染风险分布

由图3可以看出,京津冀地区由化肥过量施用导致的农业面源污染较为严重,2014年该区域部分县市区单位播种面积化肥施用量超过 $1000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。从2000年到2014年该区域单位播种面积化肥施用量增幅较大,高风险污染($>400\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)的县市区从33个增加到72个,表明该区域化肥施用导致的污染高风险区大幅度增加。

从空间分布来看,2000年污染高风险区主要分布在中部的顺义、通州、大兴、香河、三河、蓟县等,东北部的兴隆、迁西、卢龙、昌黎等县,西南部的正定、新乐、邯郸、磁县等;而2014年该区域中部和东北部的北京市、天津市、唐山市、秦皇岛市大部分县市区均处于高风险污染区,西南部的污染高风险区扩大到深州、隆尧、定兴等地区,东南部各县市区也从2000年的低风险区恶化到较高风险污染区。对单位面积农产品产出和产值增加的追求、农业种植结构和生产方式调整是引起该区域污染高风险区增加的主要原因之一,例如唐山市、秦皇岛市部分郊县市区由原来粮食作物种植向蔬菜瓜果等种植模式的转变。此外,近年来国家为了促进农业发展、保证农民收益,对化肥企业给予一定补贴,限制化肥价格,使化肥大量施用,进而导致化肥污染高风险区增加。

2.2.2 农药污染风险分布

京津冀地区气候条件及种植结构差别大,导致农

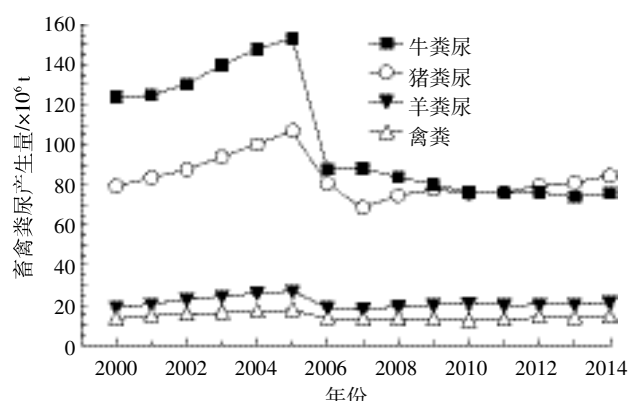


图1 京津冀2000—2014年畜禽粪尿产生量

Figure 1 Change of pollutants discharge from livestock and poultry breeding during year 2000—2014 in Beijing-Tianjin-Hebei

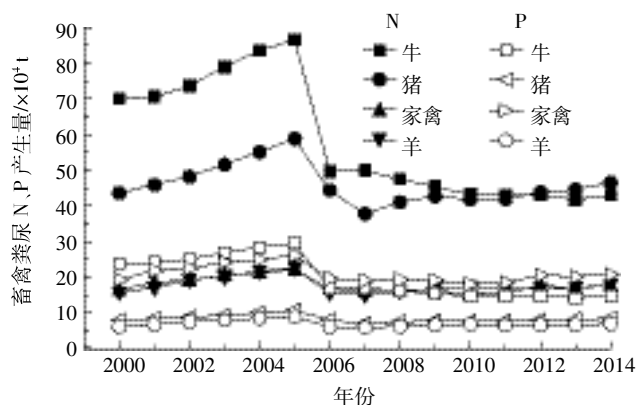


图2 京津冀2000—2014年畜禽粪尿中N、P素产生量

Figure 2 Change of N and P discharge in livestock and poultry breeding during year 2000—2014 in Beijing-Tianjin-Hebei

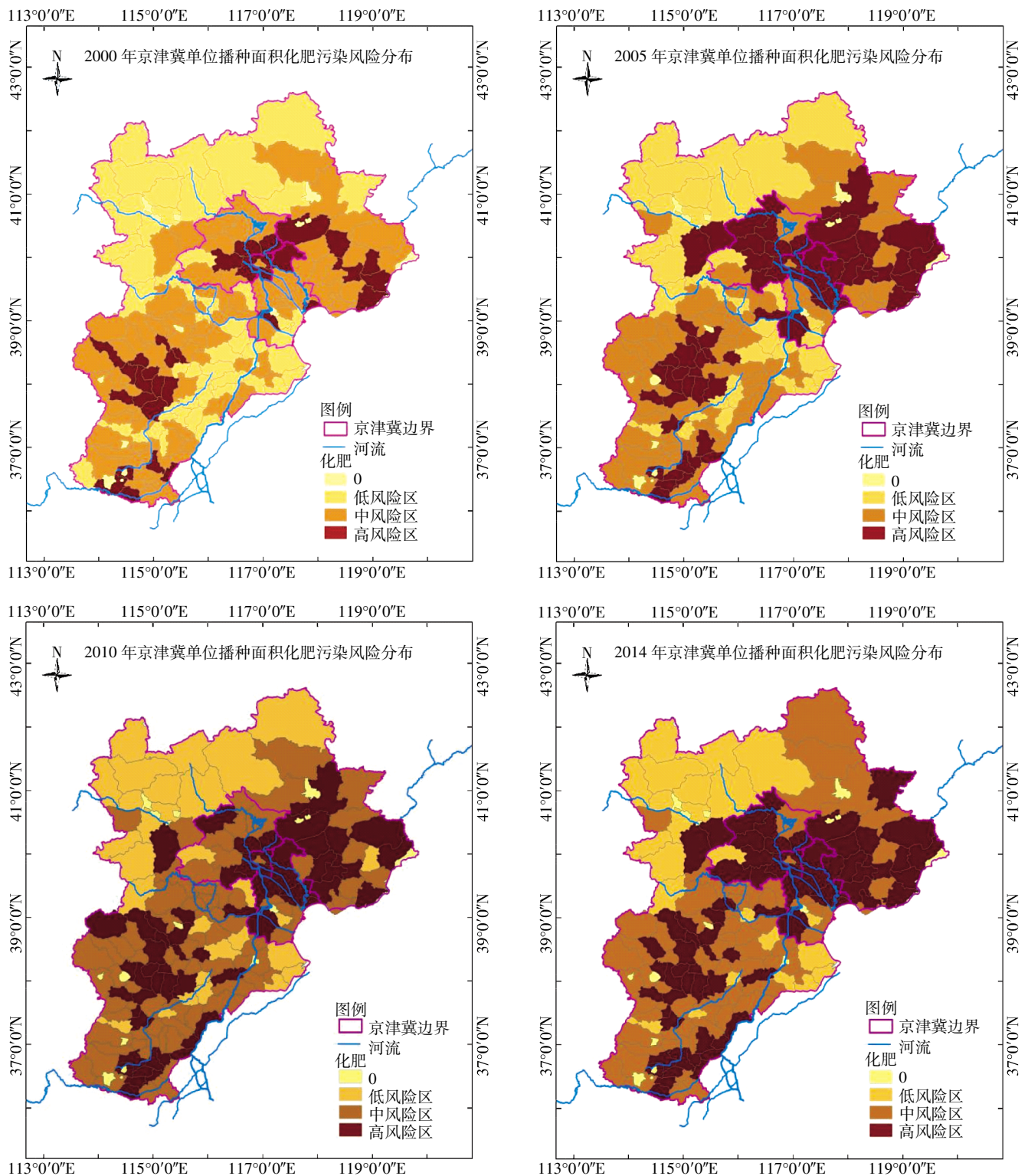


图3 京津冀化肥污染风险分布

Figure 3 Chemical fertilizer pollution risk distribution in Beijing-Tianjin-Hebei

药施用种类、施用量及农药残留等变化较大。从图4可以看出,2000年该区域农药污染高风险($>20 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)的县市区有朝阳、丰台、海淀、平谷、汉沽、东丽、

抚宁、辛集及赵县共9个,而2014年昌平、怀柔、兴隆、卢龙、昌黎、深州、东光等也都超过 $20 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,高风险污染县市区增加到20个,其中部分县市区高达

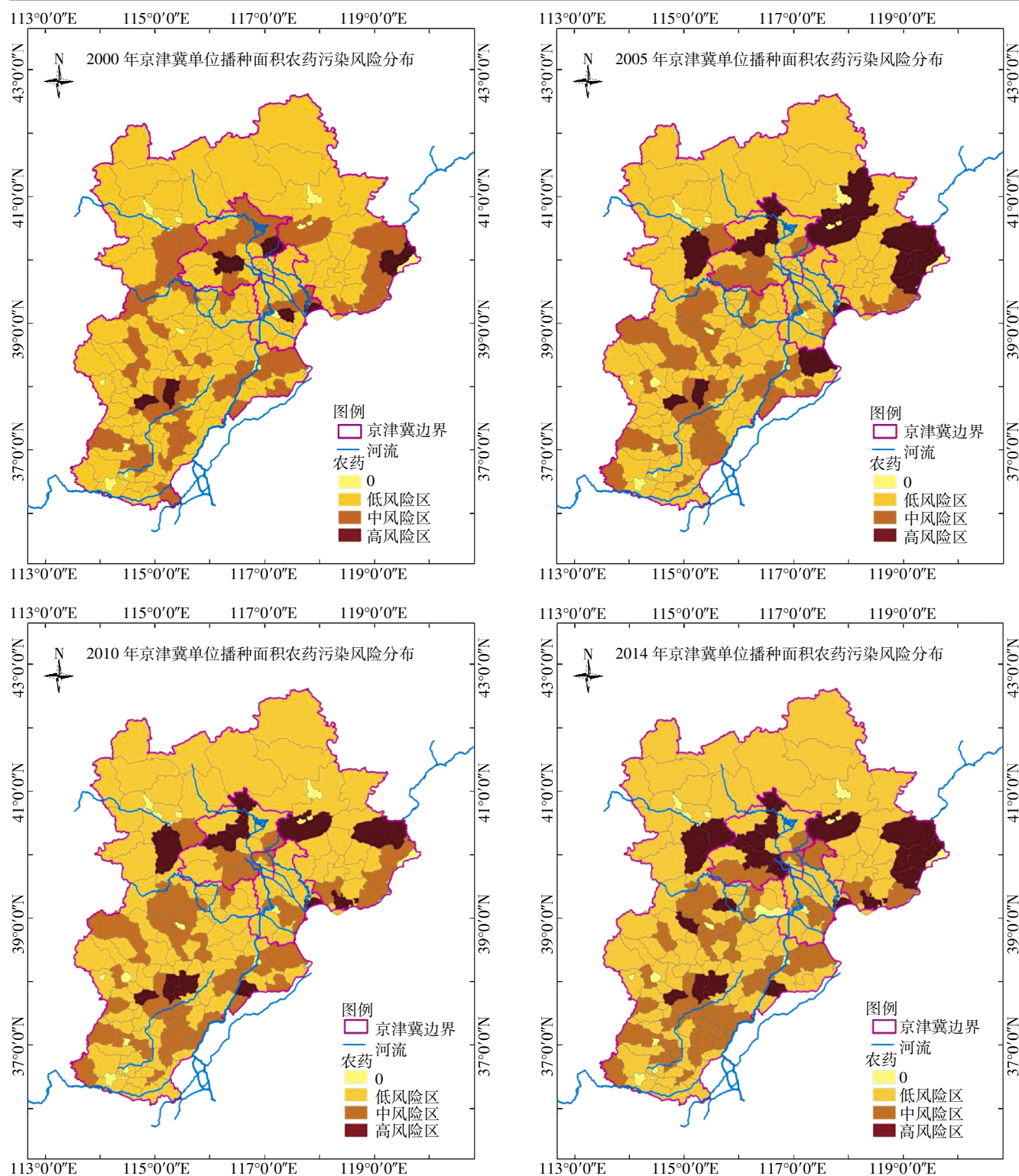


图4 京津冀农药污染风险分布

Figure 4 Pesticides pollution risk distribution in Beijing-Tianjin-Hebei

60 kg·hm⁻²。该区域单位农作物播种面积农药施用量增幅不大,但高风险县市区数量增加一倍多。农药污染高风险区域主要分布在城市周边蔬菜集中生产供

应基地,例如北京市的顺义、大兴、昌平等是北京市蔬菜主要生产地区,河北省的怀来、万全等也是环京津蔬菜商品重要生产基地。农药污染高风险区域扩大,

将对农产品安全、土壤环境构成极大威胁。

2.2.3 畜禽粪尿中氮磷素污染风险分布

由于天津市和河北省多数县市区家禽数量统计数据缺失,为了保证数据统一,仅对猪、牛、羊三种畜禽粪尿累积氮磷素污染风险进行空间差异分析。

由图5可知,2000—2005年京津冀地区单位耕地面积畜禽粪尿氮素污染呈局部加重的特点,2000年和2005年该区域畜禽粪尿中氮素高风险污染空间分布区域大体相同,主要分布在京津冀北部及西南部少数县市区。2010年整个区域畜禽粪尿中氮素污染与2005年相比明显降低,原因可能在于,经济疲软和畜产品安全事件引发畜产品价格波动较大,导致2010年各县市区生猪出栏和牛存栏量大幅度下降^[4]。但2014年该区域畜禽粪尿中氮素污染高风险区大幅增加,坝上高原生态防护区、燕山—太行山生态涵养区所在的部分县市区单位耕地面积氮素负荷已超过 $170\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,氮素污染高风险县市区数量达136个,占总县市区个数的75%,除北京、天津、张家口、廊坊、衡水辖区少部分县市区外,其他各县市区均处于氮素污染高风险或较高风险区。

由图6可知,该区域畜禽粪尿磷素污染更为严重,部分氮素污染低风险的县市区磷素污染却达到高风险水平。2000年和2005年该区域畜禽粪尿磷素高风险污染空间分布基本相同,但2005年磷素负荷局部加重,主要分布在北部、南部的边缘县市区;2014年该区域畜禽粪尿中磷素污染高风险区大幅增加,单位耕地面积磷素负荷超过 $35\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的县市区有148个,占总县市区个数的81%;超过 $70\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的县市区有112个,占总县市区个数的62%。秦皇岛、唐山等海岸海域生态防护区大部分地区处于磷素污染高风险区,除北京、天津等少部分县市区,其他各县市区均处于磷素污染较高或高污染风险区。

随着京津冀地区工业化、城镇化的快速发展,2014年该地区耕地面积为 $7\,147.54\text{ 万 hm}^2$,与2000年($7\,610.38\text{ 万 hm}^2$)相比下降6.08%。区域功能转变及集约化、规模化养殖业快速发展,是导致该区域畜禽粪尿氮磷素高风险县市区数量增加的主要因素。例如,石家庄、保定、唐山、邯郸和衡水等市是京津冀生猪主要养殖区,张家口、承德、唐山等市是京津冀奶牛、肉牛主要饲养区。

3 讨论

京津冀地区农业面源污染风险时空差异显著,尤

其化肥、畜禽粪尿中氮磷时空变化大,农药时空差异相对较小,仅有小部分高风险县市区。Xin等^[25]研究分析了我国1998—2008年间不同作物化肥投入量时空差异,发现种植结构变化是导致化肥施用量增加的主要因素。本研究发现,京津冀地区自2000年以来种植结构调整较大,经济作物、蔬菜种植面积不断增加,导致化肥施用总量持续增长、单位播种面积化肥施用量远大于警戒线,化肥污染高风险面积扩大;农药污染高风险区集中分布在大城市周边县市区,设施蔬菜和果园面积增加引起的农药喷施量加大是导致城郊区部分县市区农药高风险区域增加的重要因素;畜禽粪尿产生总量年际间整体呈降低趋势,但由于耕地面积减少、集约化养殖场增加,使得部分区域单位耕地面积畜禽粪尿氮磷污染负荷增加。

京津冀地区农业面源污染风险不断增大、高风险区域不断增加,将会带来一系列环境问题。Ongley等^[27]和Shen等^[28]对三峡库区水体污染来源进行研究发现,农业面源是三峡库区水环境污染最大的污染源;蔡金洲等^[20]的研究发现,三峡库区水体中农业面源污染源中56%来自化肥过量施用。此外,张宏威等^[29]对设施蔬菜的试验研究发现,大量施肥使深层土壤有机态氮含量增加,可能引发地下水污染;Wilkinson等^[30]研究发现,过多的养分输入会带来土壤次生盐渍化,导致土壤退化。此外,粪尿中的抗生素随养殖废水进入周边水体环境介质,给生态环境带来不良影响,并通过食物链传递,对人体健康产生危害^[31]。还有研究表明,畜禽粪尿堆放或储存过程中,有10%的粪尿流失进入水体,对流域水体氮磷素富营养化的贡献率分别为10%和20%^[32]。本研究发现,京津冀地区较多的化肥和畜禽粪尿氮磷污染高风险县市区位于密云水库上游水系以及清河、大洋河等重要流域内(图3、图5、图6),化肥过量施用及畜禽粪尿的不合理处置,可能导致该区域重点保护水体的水体富营养化、地下水污染等环境问题加剧,限制该区域环境质量的整体提升。

京津冀地区面临着化肥污染风险逐年升高、部分县市区农药污染严重、畜禽粪尿氮磷素污染风险范围广等问题。针对化肥污染,推荐采用优化种植结构、指导农户科学施肥、有机肥替代化肥等措施降低其污染风险;针对农药污染严重的县市区,提倡使用生物农药、低毒低残留农药;针对畜禽粪尿氮磷素高风险县市区,建议加强规范化养殖、提高畜禽粪污无害化处理、推广科学合理还田等措施,防止污染物进入土壤、

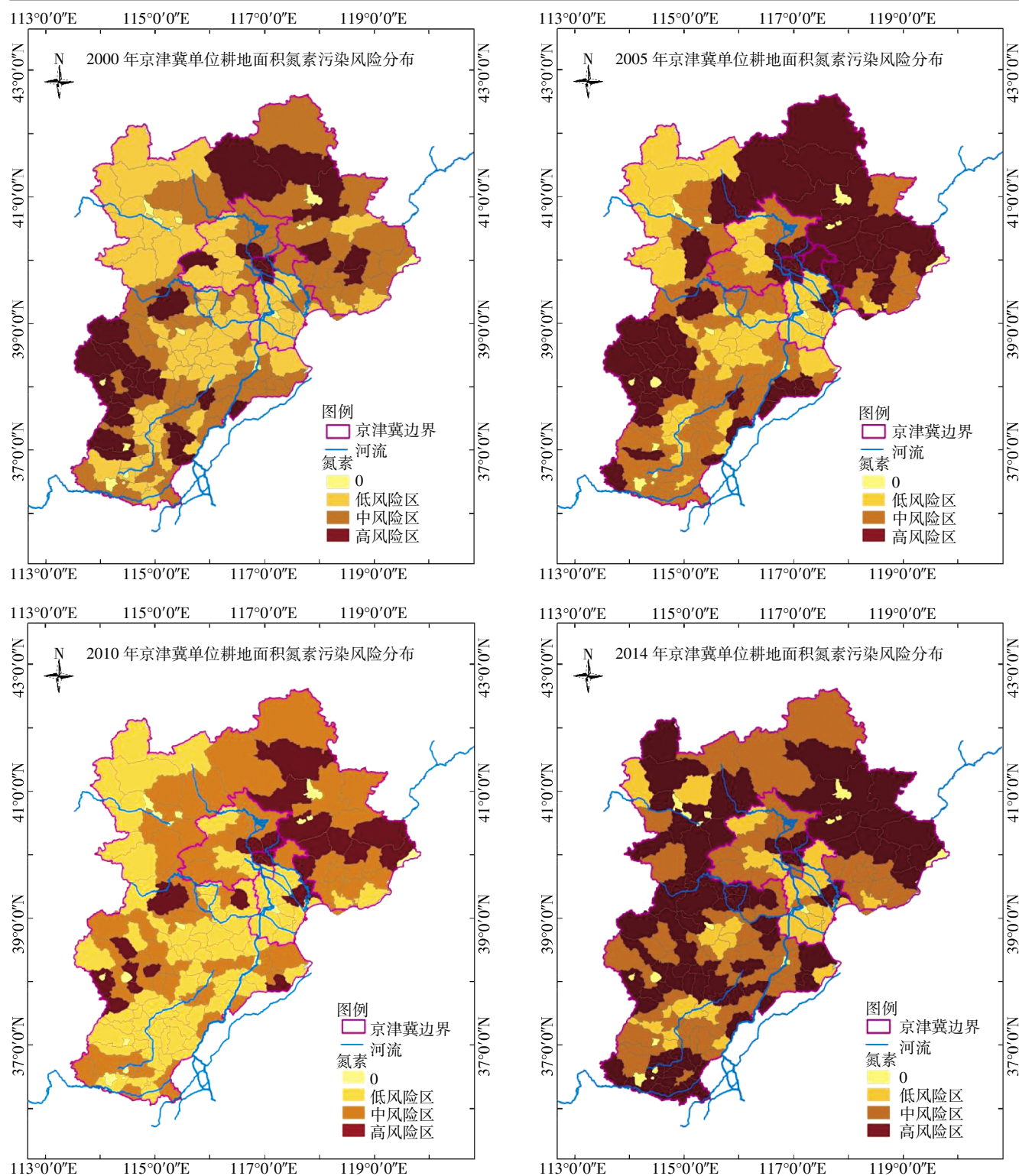


图5 京津冀畜禽粪尿中氮素污染风险分布

Figure 5 N pollution risk distribution from livestock and poultry breeding in Beijing-Tianjin-Hebei

水体。此外,针对京津冀地区农业面源污染防控,应强化建立区域联动协调机制,分级分区分类进行污染源管控,共同面对京津冀区域面临的生态环境问题,同

步治理、协同管理、优化布局,共同提升京津冀地区生态环境质量。

本研究仅针对农业面源污染主要来源的化肥、农

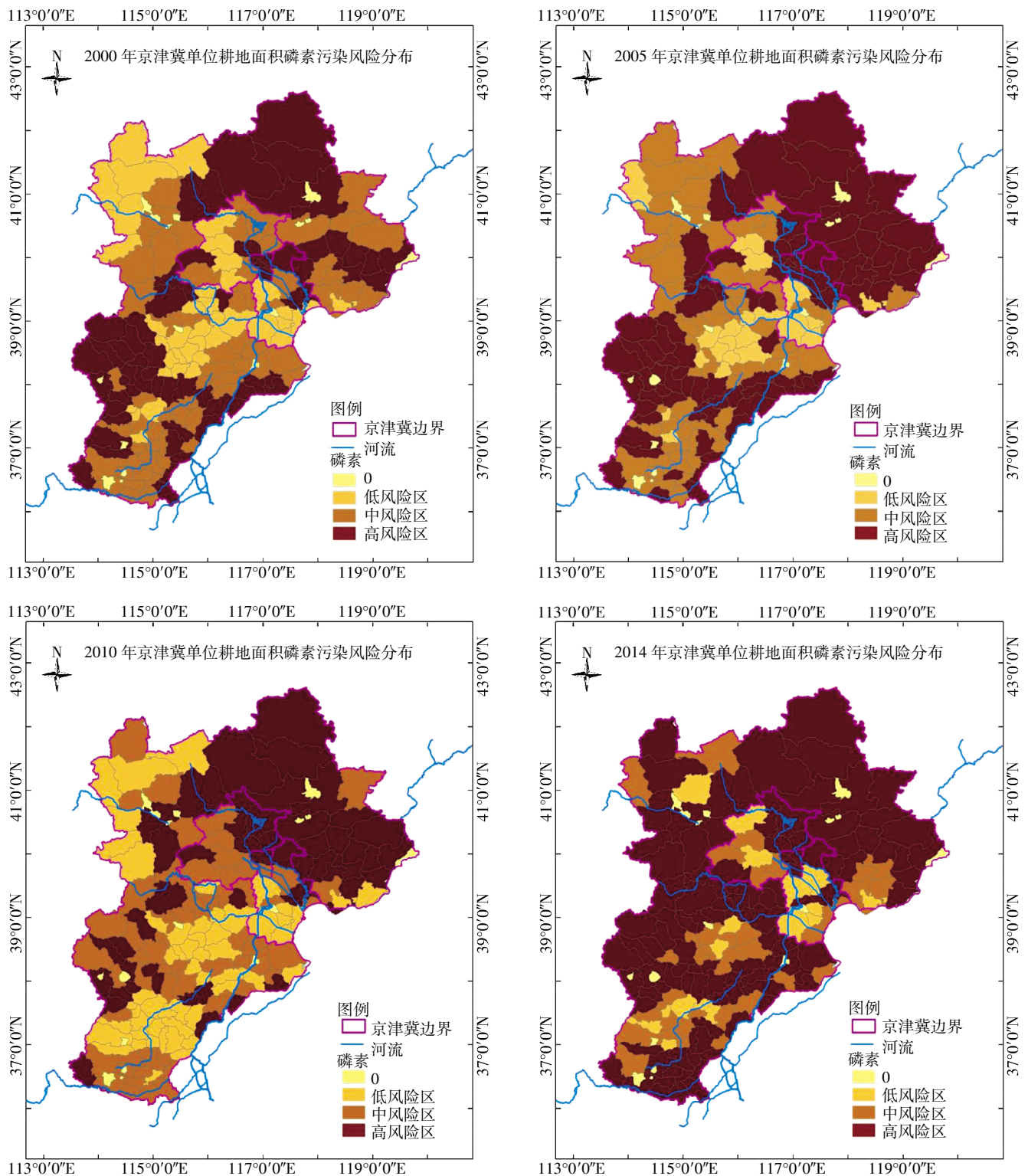


图 6 京津冀畜禽粪尿中磷素污染风险分布

Figure 6 P pollution risk distribution from livestock and poultry breeding in Beijing-Tianjin-Hebei

药施用和畜禽粪尿污染进行分析,并未考虑农膜、秸秆、水产养殖、生活垃圾、生活污水等,以后有必要进一步结合,对区域农业面源污染开展更系统的研究。此外,

我国尚缺乏化肥、农药施用量的限量标准,本研究采用发达国家的标准及前人的研究成果对化肥、农药、畜禽粪尿氮磷污染程度进行分级,可能导致部分区域

污染风险被高估或低估,后续应加强农业面源污染物风险评估分级标准相关的研究。由于本研究对该地区畜禽粪尿氮磷素污染风险分析中,重点考虑了粪污产生总量对耕地的污染风险,未考虑养殖场治污设施的配备情况,可能会导致部分县市区被高估,后续研究应结合更详尽的统计数据进行分析。

4 结论

(1)京津冀化肥和化学农药施用总量逐渐增加,单位播种面积化肥和化学农药施用量仍居高不下。畜禽粪尿排放总量逐渐降低,且猪粪尿产生总量逐渐取代牛粪尿趋于主导地位。

(2)京津冀地区化肥污染和畜禽粪尿氮磷素污染高风险市区县个数增加较快,化学农药增加较慢。化肥污染和畜禽粪尿氮磷素污染高风险市区县分布广泛,化肥农药污染高风险市区县集中分布在少数几个城市周边蔬菜种植地区。

(3)化肥污染风险增加的主要原因是农作物单产的过度追求;耕地面积减少和集约化养殖共同导致了畜禽粪尿氮磷素污染风险增加。

参考文献:

- [1] 郝芳华,程红光,杨胜天.非点源污染模型:理论方法与应用[M].北京:中国环境科学出版社,2006.
HAO Fang-hua, CHENG Hong-guang, YANG Sheng-tian. The pollution model, theoretical method and application of non-point source[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2006; 5.
- [2] Carpenter S R, Caraco N F, Correll D L, et al. Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen[J]. *Ecological Applications*, 1998, 8(3): 559-568.
- [3] 谭绮球,苏柱华,郑业鲁.国外治理农业面源污染的成功经验及对广东的启示[J].广东农业科学,2008(4):67-71.
TAN Qi-qiu, SU Zhu-hua, ZHENG Ye-lu. The successful experience of foreign control of agricultural non-point source pollution and the enlightenment of Guangdong[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2008(4): 67-71.
- [4] 程磊磊,尹昌斌,鲁明中,等.国外农业面源污染控制政策的研究进展及启示[J].中国农业资源与区划,2010,31(3):76-80.
CHENG Lei-lei, YIN Chang-bin, LU Ming-zhong, et al. The research progress and enlightenment of foreign agricultural non-point source pollution control policy[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2010, 31(3): 76-80.
- [5] 张智奎,肖新成.经济发展与农业面源污染关系的协整检验:基于三峡库区重庆段1992—2009年数据分析[J].中国人口·资源与环境,2012,22(1):57-61.
ZHANG Zhi-kui, XIAO Xin-cheng. Cointegration test on the relationship between agricultural non-point source pollution and economic development: Based on the data analysis of Chongqing section of the Three Gorges Reservoir region in 1992—2009[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2012, 22(1): 57-61.
- [6] 刘鸿渊, 闰泓.农业面源污染形成机理的实证研究:以四川省1982—2006年统计数据为例[J].农村经济,2010(5):98-101.
LIU Hong-yuan, RAN Hong. Case study of agricultural non-point source pollution in Sichuan province: Based on the statistic data between 1982—2006[J]. *Rural Economy*, 2010(5): 98-101.
- [7] 魏欣,李世平,张忠潮,等.基于农地产权制度视角的农户农业面源污染行为分析[J].农村经济,2012(5):108-112.
WEI Xin, LI Shi-ping, ZHANG Zhong-chao, et al. Analysis on the firm household's behavior upon agricultural non-point source pollution based on the perspective of farmland property right system[J]. *Rural Economy*, 2012(5): 108-112.
- [8] 高懋芳,邱建军,刘三超,等.基于文献计量的农业面源污染研究发展态势分析[J].中国农业科学,2014,47(6):1140-1150.
GAO Mao-fang, QIU Jian-jun, LIU San-chao, et al. Status and trends of agricultural diffuse pollution research based on bibliometrics[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(6): 1140-1150.
- [9] 叶春,王云鹏. GIS支持的珠江三角洲农业面源污染时空分析[J].农机化研究,2007(2):40-43.
YE Chun, WANG Yun-peng. Spatio-temporal analysis of agriculture non-point pollution in pearl river delta based on GIS[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2007(2): 40-43.
- [10] 叶延琼,章家恩,李逸勉,等.基于GIS的广东省农业面源污染的时空分异研究[J].农业环境科学学报,2013,32(2):369-377.
YE Yan-qiong, ZHANG Jia-en, LI Yi-mian, et al. Spatial-temporal variation of agricultural nonpoint source pollution based on GIS technology in Guangdong Province, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(2): 369-377.
- [11] 宋家永,李英涛,宋宇,等.农业面源污染的研究进展[J].中国农学通报,2010,26(11):362-365.
SONG Jia-yong, LI Ying-tao, SONG Yu, et al. Research and prospect on non-point pollution from agriculture[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(11): 362-365.
- [12] 李海鹏,张俊飏.中国农业面源污染的区域分异研究[J].环境保护,2009,30(2):43-45.
LI Hai-peng, ZHANG Jun-biao. Studies on regional differentiation of non-point source pollution contamination in China agriculture[J]. *Environment Protection*, 2009, 30(2): 43-45.
- [13] 程鹏.北京地区典型奶牛场污染物排泄系数的测算[D].北京:中国农业科学院,2008.
CHENG Peng. Experimental study of excretion coefficient on typical dairy farm in Beijing[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2008.
- [14] 郭德杰,吴华山,马艳,等.不同猪群粪、尿产生量的监测[J].江苏农业学报,2011,27(3):516-522.
GUO De-jie, WU Hua-shan, MA Yan, et al. Monitoring of the amount of pig manure and urine in different swineries[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2011, 27(3): 516-522.
- [15] 王方浩,马文奇,窦争霞,等.中国畜禽粪便产生量估算及环境效应

- [J]. 中国环境科学, 2006, 26(5):614-617.
- WANG Fang-hao, MA Wen-qi, DOU Zheng-xia, et al. The estimation of the production amount of animal manure and its environmental effect in China[J]. *China Environmental Science*, 2006, 26(5):614-617.
- [16] 郭德杰, 吴华山, 马艳, 等. 集约化养殖场羊与兔粪尿产生量的监测[J]. 生态与农村环境学报, 2011, 27(1):44-48.
- GUO De-jie, WU Hua-shan, MA Yan, et al. Study on the amount of manure and urine excreted by sheep and rabbits in intensive pasture[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2011, 27(1):44-48.
- [17] 杨自立, 赵瑾, 邵锦香. 家畜粪尿排泄量和肥分的研究进展[C]//中国畜牧兽医学会家畜生态学分会全国代表大会暨学术研讨会. 2008.
- YANG Zi-li, ZHAO Jin, SHAO Jin-xiang. The research progress of the discharge and nutrients(N and P) in livestock and poultry breeding feces excretion and maps[C]//The Livestock Ecology Seminar Branch of Chinese Association of Animal & Veterinary Sciences of the National Congress, 2008.
- [18] 谢花林, 刘桂英. 1998—2012 年中国耕地复种指数时空差异及动因[J]. 地理学报, 2015, 70(4):604-614.
- XIE Hua-lin, LIU Gui-ying. Spatiotemporal difference and determinants of multiple cropping index in China during 1998—2012[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(4):604-614.
- [19] 杨飞, 杨世琦, 诸云强, 等. 中国近 30 年畜禽养殖量及其耕地氮污染负荷分析[J]. 农业工程学报, 2013, 29(5):1-11.
- YANG Fei, YANG Shi-qi, CHU Yun-qiang, et al. Decomposition of factors contributed to the increase of China's chemical fertilizer use and projections for future fertilizer use in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural*, 2013, 29(5):1-11.
- [20] 蔡金洲, 范先鹏, 黄敏, 等. 湖北省三峡库区农业面源污染解析[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(7):1421-1430.
- CAI Jin-zhou, FAN Xian-peng, HUANG Min, et al. Sources analysis of agricultural non-point source pollution in the Three Gorges Reservoir Area of Hubei Province, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(7):1421-1430.
- [21] 宋大平, 陈巍, 高彦征. 淮河流域氮肥农药施用的合理性及其环境影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(6):1144-1151.
- SONG Da-ping, CHEN Wei, GAO Yan-zheng. The usage rationality and environmental impacts of chemical nitrogen fertilizer and pesticide in the Huaihe River Basin, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(6):1144-1151.
- [22] 耿维, 胡林, 崔建宇, 等. 中国区域畜禽粪便能源潜力及总量控制研究[J]. 农业工程学报, 2013, 29(1):171-179.
- GENG Wei, HU Lin, CUI Jian-yu, et al. Biogas energy potential for livestock manure and gross control of animal feeding in region level of China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(1):171-179.
- [23] 陈瑶, 王树进. 我国畜禽集约化养殖环境压力及国外环境治理的启示[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(6):862-868.
- CHEN Yao, WANG Shu-jin. Environmental pressure of intensive livestock breeding in China and the revelation of environmental governance from developed countries[J]. *Resources and Environment in the Yangze Basin*, 2014, 23(6):862-868.
- [24] 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 Jiang, QIU Huan-guang, JING Yue, et al. Decomposition of factors contributed to the increase of chemical fertilizer use and projections for future fertilizer use in China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2013, 28(11):1869-1878.
- [25] Xin L J, Li X B, Tan M H. Temporal and regional variations of China's fertilizer consumption by crops during 1998—2008[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2012, 22(4):643-652.
- [26] 彭海英, 史正涛, 刘新有, 等. 农作物种植结构与农民收入及其对环境的影响分析[J]. 环境科学与管理, 2008, 33(2):44-48.
- PENG Hai-ying, SHI Zheng-tao, LIU Xin-you, et al. Analysis of infection in environment and farmers economical income with the change of growing structure of crops[J]. *Environmental Science and Management*, 2008, 33(2):44-48.
- [27] Ongley E D, Zhang X, Yu T. Current status of agricultural and rural non-point source pollution assessment in China[J]. *Environmental Pollution*, 2010, 158(5):1159-68.
- [28] Shen Z Y, Qiu J L, Hong Q, et al. Simulation of spatial and temporal distributions of non-point source pollution load in the Three Gorges Reservoir Region[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 493:138-146.
- [29] 张宏威, 康凌云, 梁斌, 等. 长期大量施肥增加设施菜田土壤可溶性有机氮淋溶风险[J]. 农业工程学报, 2013, 29(21):99-107.
- ZHANG Hong-wei, KANG Ling-yun, LIANG Bin, et al. Long-term heavy fertilization increases leaching risk of soil soluble organic nitrogen in vegetable greenhouse[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(21):99-107.
- [30] Wilkinson J M, Hill J, Phillips C J. The accumulation of potentially toxic metals by grazing ruminants[J]. *Proceedings of the Nutrition Society*, 2003, 62(2):267-277.
- [31] 卢信, 罗佳, 高岩, 等. 畜禽养殖废水中抗生素和重金属的污染效应及其修复研究进展[J]. 江苏农业学报, 2014, 30(3):671-681.
- LU Xin, LUO Jia, GAO Yan, et al. A review in ecotoxic effect of antibiotics and heavy metals co-contamination in livestock and poultry breeding wastewater and its remediation[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2014, 30(3):671-681.
- [32] 张维理, 冀宏杰, Koleb, 等. 中国农业面源污染形势估计及控制对策 II. 欧美国家农业面源污染状况及控制[J]. 中国农业科学, 2004, 37(7):1018-1025.
- ZHANG Wei-li, JI Hong-jie, Koleb H, et al. Estimation of agricultural non-point source pollution in China and the alleviating strategies: II. Status of agricultural non-point source pollution and the alleviating strategies in European and American countries[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(7):1018-1025.