

王 静,郭熙盛,吕国安,等. 农业面源污染研究进展及其发展态势分析[J]. 江苏农业科学,2016,44(9):21-24.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2016.09.006

# 农业面源污染研究进展及其发展态势分析

王 静<sup>1,2,3</sup>, 郭熙盛<sup>1,3</sup>, 吕国安<sup>2</sup>, 王允青<sup>1,3</sup>, 叶 寅<sup>1,3</sup>, 王道中<sup>1,3</sup>

(1. 安徽省农业科学院土壤肥料研究所,安徽合肥 230031; 2. 华中农业大学资源与环境学院,湖北武汉 430070;  
3. 安徽省养分循环与资源环境省级实验室,安徽合肥 230031)

**摘要:**在点源污染逐步得到控制后,农业面源污染问题日益突出,已成为目前水环境污染控制的重点和难点。在广泛调研国内外相关领域研究成果的基础上,对农业面源污染的成因和特点、研究历程、面源污染物的迁移转化机制、污染负荷模型以及面源污染的防控机制进行论述,在此基础上提出我国农业面源污染的研究需要在几个方面进行加强,即多种同位素联合示踪农业面源污染源;污染物在沟渠系统的迁移模型;农业面源污染对地下水的影响研究;构建流域容量总量控制体系;健全农业面源污染监测和预警体系。

**关键词:**农业面源污染;研究进展;发展趋势

**中图分类号:** X71 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2016)09-0021-03

水是人类赖以生存和发展的基础,水体环境污染直接影响和制约人类的可持续发展。随着工业污染源排放得到较好控制和治理的同时,面源污染对水体的影响也日益凸显,成为水环境污染的一个重要原因。面源污染,即非点源污染(non-point source pollution),是相对于排污点集中、排污途径明确的点源污染而言,是指溶解的或固体的污染物从非特定的地点,在降水(或融雪)冲刷作用下,通过径流过程而汇入受纳水体(包括河流、湖泊、水库和海湾等)并引起水体的富营养化或其他形式的污染<sup>[1]</sup>。农业面源污染是指由农业生产活动引起的氮、磷、农药等污染物以广域的、低浓度、分散的形式,从农田生态系统向水体迁移扩散的过程。主要包括化肥污染、农药污染、集约化养殖场污染、农膜污染、农村生活污水污染等。目前从世界范围来看,面源已成为水环境的一大污染源或首要污染源。全球30%~50%的地球表面已受到面源污染的影响,农业面源污染已引起1.44亿hm<sup>2</sup>耕地不同程度地退化<sup>[2]</sup>。美国的面源污染占污染总量的2/3,其中农业面源污染的贡献率为68%~83%,氮、磷营养元素是农业面源污染主要的污染物质<sup>[3]</sup>。丹麦270条河流中94%的氮负荷、52%的磷负荷是来自于农业面源污染<sup>[4]</sup>。中国的农业面源污染形势也非常严峻,据2010年国家三部委联合发布的第1次全国污染源普查公报,我国主要污染源排放量中,农业生产(含畜禽养殖业、水产养殖业、种植业)排放的化学需氧量(COD)、N、P等主要污染物质,已远超过工业与生活源,成为污染源之首,其中COD排放量已占总量的46%以上,N、P占50%以上。农业面源污染将大量的氮、磷、农药、重金属等污

染物质带入水体,不仅直接危害农业生态系统,而且对区域水环境和人类健康将产生严重的危害,污染饮用水源会造成地表水的富营养化和地下水的污染。如何科学认识并有效控制面源污染已成为当前亟待解决的重大科学问题与应用问题。

## 1 农业面源污染的成因及特点

### 1.1 农业面源污染的成因

农业面源污染的根本原因在于粮食安全压力大,从而导致农用化学品的过量、不合理施用,农田的污染物质已经成为水环境污染的主要来源<sup>[5]</sup>。我国的耕地不到世界的1/10,但是近年来氮肥的使用量却占全世界的近30%,然而,我国农业化肥的平均有效率仅为30%~35%,大量未被利用的营养元素经降雨径流、淋溶或农田退水直接或间接进入水体。另外,我国农药施用量大,且施用方法不合理,农药利用率低,从而导致大部分农药以大气沉降和雨水冲刷的形式进入水体、土壤、空气和农产品中,对生态环境和人类造成了严重危害。

近年来,我国集约化养殖发展迅速,导致一些地方的养殖总量已经超过当地负荷警戒值,大量的畜禽粪便处理率低<sup>[6]</sup>,随意堆放,流失量大,已经成为农村的主要污染源之一。如我国巢湖流域,2004年畜禽养殖产生粪便量达1257万t,其中经过无害化处理108万t,仅占粪便总量的8.6%<sup>[7]</sup>。

城镇化发展、地面硬化程度的提高,加速了面源污染物质的扩散和迁移。镇、村居民点地表径流也已成为水环境污染或水体富营养化的重要来源<sup>[8]</sup>。水土流失和传统灌溉加重了农业面源污染和生态环境的恶化。另外,农业技术推广滞后,公众缺乏环境意识,也是农业面源污染日趋严重的重要因素之一。

### 1.2 农业面源污染的特点

与点源污染相比,农业面源污染具有随机、分散、复杂、难监测等特点。农业面源污染主要以扩散的方式发生,一般与降雨径流(或农田排水)的发生有关,而降雨径流具有随机性,所以由此产生的面源污染必然具有随机性,再加上流域内

收稿日期:2015-11-27

基金项目:国家自然科学基金(编号:41401308);国家科技重大专项(编号:2015ZX07204-007);国家科技支撑计划(编号:2012BAD15B03)。

作者简介:王 静(1982—),女,安徽萧县人,博士研究生,助理研究员,主要从事农业面源污染研究。Tel:(0551)65149155;E-mail:wangjinghf1982@163.com。

土地利用状况、地形地貌、水文特征等不同,导致面源污染时空分布的不均一性。农业面源污染物来源分散且复杂,涉及的地域范围广,不仅包括农田径流、农户的生活污水排放和村镇地表径流,还包括农村生活垃圾、小型畜禽养殖和池塘水产养殖等造成的污染。这就造成了难以在发生之处进行监测,真正的源头难以或者无法追踪,治理难度大<sup>[9]</sup>。污染一旦发生,其控制与治理代价高昂且非常困难。

## 2 农业面源污染的研究历程

农业面源污染研究起步于20世纪60年代,欧、美等发达国家率先开展,70年代后在世界各地逐渐受到重视。国外农业面源污染的研究可以分为以下3个阶段,即20世纪70年代,主要是对面源污染特征、影响因素、单场暴雨和长期平均污染负荷输出方面的研究;20世纪80年代,面源污染基础研究地域范围广,类型多样、因素分析和污染物迁移机理研究更加深入;进入20世纪90年代以后,微生物对面源污染物迁移、转化影响的研究成为新的增长点,农业面源污染成为国际上环境问题研究的活跃领域。随着对农业面源污染形成机制及其危害认识的深入,人们提出了各种控制管理措施,涉及到经济、法律、政策等。

相对国外而言,我国对农业面源污染的研究起步较晚,20世纪80年代进行的湖泊富营养化调查,之后在于桥水库、滇池、太湖、巢湖、晋江流域等区域也展开了农业面源污染探索性的研究,主要研究方法是分析土地利用方式与面源污染的关系,立足于接纳水体的水质,建立计算汇水区域污染物输出量的经验统计模型。这一阶段只是农业面源污染的特点与污染负荷定量计算的初步研究。进入20世纪90年代之后,中国对农业面源污染的产污机理及影响因素进行更为深入的探讨;农药、化肥污染的特征、影响因素研究和黑箱经验统计模型模式在农业面源污染研究中占据了重要地位。近年来,随着国外面源污染模型尤其是机理模型的引进发展迅速,大批研究者运用各种模型和计算方法(主要来自美国)在全国不同地区、不同尺度范围内开展了大量应用研究,在国际上的影响力越来越大。

## 3 农业面源污染负荷估算与评估模型

为了对农业面源污染进行有效的控制和治理,污染负荷的估算显得极为重要。但由于农业面源污染具有随机、分散、复杂、难监测等特点,其负荷计算远比点源困难,但获得准确的水体污染负荷量又是对水环境实施污染总量控制管理的基础和关键<sup>[10]</sup>。农业面源污染负荷的计算方法始于美国20世纪60—70年代,通过在北美地区开展的一系列深入研究,研发了包括输出系数模型、机理模型等在内的一系列面源污染负荷计算方法<sup>[11]</sup>。进入21世纪以后,该领域的研究引起了世界各国的广泛关注,一些功能强大的模型被研发出来,比如比较著名的模型有SWAT、Ann AGNPS、CREAMS、HSPF等。中国的面源污染模型研究基本以引进国外模型,进行验证和模拟应用为主<sup>[12]</sup>。由于现有主流模型大多根据北美地区环境特点研发,在国内应用时难免会出现各种问题,近年来,国内一些研究者尝试对国外模型进行改进,使之能更好地适应研究区的实际情况,在国际上的影响力越来越大<sup>[13]</sup>。

## 4 农业面源污染物的迁移转化机制

农业面源污染物主要来自于土壤圈中的农业化学物质,因而其产生、迁移与转化过程实质上是污染物从土壤圈向其他圈层,尤其是水圈扩散的过程,农业面源污染本质上是一种扩散污染。农业面源污染物从土壤圈向水圈迁移的过程主要包括两方面,一是污染物在土壤圈中的行为;二是污染物在外界条件(降水、灌溉等)下从土壤向水体迁移的过程。前者是研究的基础,后者是研究的重点和关键。农业面源污染物的形成,作为一个连续的动态过程,主要由以下几个过程组成,即降雨径流、土壤侵蚀、地表溶质溶出和土壤溶质渗漏,这4个过程相互联系相互作用,成为农业面源污染的核心内容<sup>[14]</sup>。氮施入土壤中,氨态氮( $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ )呈球形扩散,硝态氮( $\text{NO}_3^- - \text{N}$ )主要以质流方式迁移,一般来说,排水当中的 $\text{NNO}_3^- - \text{N}$ 比较稳定,而 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的迁移转化相当复杂<sup>[15]</sup>。磷的流失以吸附作用为主,主要是因为磷与土壤胶粒间亲和力的存在,多数土壤可溶态磷随土壤侵蚀、径流、排水、渗漏进行<sup>[16]</sup>。

另外,氮在沉积物-水体界面的迁移和交换是一个复杂的生物化学过程,硝化作用和反硝化作用是沉积物-水界面氮迁移和交换的主要形式<sup>[17]</sup>。土-水界面上磷的形态变化及其化学反应机理远比氮要复杂,包括磷的生物循环,含磷颗粒的沉降与再悬浮、溶解态磷的吸附与解吸、磷酸盐的沉淀与溶解等物理、化学、生物过程及其相互作用。沉积物与水体的物质交换主要通过扩散来实现,交换的强度主要取决于沉积物间隙水中的营养物质浓度梯度<sup>[18]</sup>。国内外已开展了关于水体沉积物与水体氮、磷迁移与交换<sup>[19-20]</sup>、氮磷营养元素赋存形态及其比例对藻类等水生生物生长的影响等<sup>[21-22]</sup>,但不同陆面斑块界面之间氮、磷迁移转化机制研究较薄弱。

## 5 农业面源污染物的防控机制

农业面源污染作为流域内影响水质的主要过程之一,其污染控制应从整个农业生态系统或流域出发,从根本上达到治理面源污染的目的<sup>[23]</sup>。就众多的防治方法来看,大体可以分为两大类,即“源”(source)防治和“汇”(sink)防治<sup>[24]</sup>。“源”防治方法,即从污染源头和减少N、P流失,主要通过产业结构、施肥措施、养殖业控制、饲养方式等,控制N、P的排放量、流失量来减少、控制面源污染。从微观上控制农业化学物质释放的膜控制释放技术(membranes controlled release,简称MCR)以及在环境约束下根据气象、市场、作物生长和农业非点源污染程度等制定的、政府和农民都能接受的、成本低廉的最佳管理措施。“汇”防治方法着重于对污染物的去除和削减,研究较多的方法有湿地去除、水生植物去除、生物技术等。国内学者构建了包括控制类型、控制环节、控制手段3个层面的农业面源污染的立体化消减体系<sup>[25]</sup>。在控制类型层面,通过调整土地利用方式、提高化学品的利用率、改变灌溉方式来实现种植型农业面源污染的控制;通过推行清洁养殖、制定水产养殖容量、防治普遍性污染等措施控制养殖型面源污染;通过建立生活、生产废气物分类处理和回收点,完善管道设施、实行径流污水分流来控制生活型面源污染。在控制环节层面,实行产前减少面源污染的产生量;产中

减少面源污染的排放量;产后通过建立缓冲带、生物篱埂、前置库等技术减少面源污染的赋存量。在控制手段层面,从行政、经济、法律、教育、规划、技术等方面进行综合治理。

## 6 研究展望

农业面源污染研究涉及物理、化学、生物等多学科的理论和方法,农业面源污染的治理是一项复杂的系统工程,在归纳当前研究现状的基础上总结近期和未来的研究重点,主要体现在以下几个方面。

### 6.1 多种同位素联合示踪农业面源污染源研究

由于农业面源污染的复杂性,各污染源的贡献率至今仍然不是很清晰。同位素技术的应用给其研究提供了实用的试验手段和精确的科学数据,已成为该领域的一项新技术而逐步得到应用,近几年的研究表明,以流域为单元,把大气—植被—土壤—地表水—地下水作为一个系统,以同位素作为示踪手段,结合现代信息技术和流域内的水文地球化学等指标来研究农业面源污染,有望在辨识农业面源污染物的来源、定量估算农业面源污染物输出负荷和面源污染物迁移转化机理等问题上取得突破。

### 6.2 污染物在沟渠系统的迁移模型研究

沟渠系统作为面源污染源与水体之间的缓冲过渡区,污染物在其中的迁移转化对控制其最终输出负荷有非常重要的作用。随着农业面源污染防治技术研究的深入,面源污染物产生以后在沟渠系统中的迁移转化逐渐引起研究者的重视,并逐步快速发展起来。沟渠能够通过其中的底泥吸附、植物吸收、生物降解等一系列自然净化机制,降低进入河流等地表水中的污染物含量,对面源污染物的去除有很大潜力,但同时也有很大的不确定性<sup>[26]</sup>。目前,虽然国内外学者对污染物在沟渠系统中迁移转化的研究已经取得一些初步进展<sup>[27-28]</sup>,但是还没有成熟的模型出现。因此,在目前研究的基础上,积极构建农业面源污染物在排水沟渠中的迁移转化模型非常有必要,这将是今后研究的一个重要突破口<sup>[29]</sup>。

### 6.3 农业面源污染对地下水的影响研究

近年来,农业面源污染的研究主要集中在污染物对河流、湖泊、水库等地表水体的影响方面。地下水也是水环境的一部分,其污染与农业面源污染密切相关。目前,国内外对这方面的研究较少,特别是对农田生态系统中硝酸盐淋失动态及其对区域地下水的研究尤其少,因此农业面源污染在地下水中的输出规律及其对地下水的影响预测与评价也是未来的研究热点之一。

### 6.4 构建流域容量总量控制体系

根据水质目标和环境容量,建立面向水质目标的整个流域容量总量控制体系,形成流域环境治理和管理量化机制。从地理系统角度来看,按湖泊(河流)—一级支流—二级支流—小流域(三级支流—四级支流)逐级顺推的路径,将治理目标进行分解;按逐级倒推的路径,制定治理方案,解决小流域污染物“减什么、减多少、减哪里、怎么减”的核心问题。

### 6.5 健全农业面源污染监测和预警体系

充分发挥时效性和宏观性方面具有明显优势的“3S”技术,结合农业面源污染负荷评价模型和面源污染防治标准,在不同类型区建立农业面源污染的监测系统,并在国家级农业

环境监测网络的基础上,通过数据分析与系统集成,建立农业面源污染的预警体系,及时发布污染风险预警,为决策者进行判断和宏观管理提供支撑。

## 参考文献:

- [1] Novotny V, Chester C. Handbook of non-point pollution, sources and pollution and management [M]. New York: van Nostrand Reinhold Company, 1981: 81-103.
- [2] Dennis L C, Peter J V, Keith L. Modeling non-point source pollution in vadose zone with GIS [J]. Environmental Science and Technology, 1997, 8: 2157-2175.
- [3] 贺缠生, 傅伯杰, 陈利顶. 非点源污染的管理及控制[J]. 环境科学, 1998, 19(5): 87-91.
- [4] Kronvang B, Graesbøll P, Larsen S E, et al. Diffuse nutrient losses in denmark [J]. Water Science and Technology, 1996, 33(4): 81-88.
- [5] 杨林章, 施卫明, 薛利红, 等. 农村面源污染治理的“4R”理论与工程实践——总体思路与“4R”治理技术[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(1): 1-8.
- [6] 吴永红, 胡正义, 杨林章. 农业面源污染控制工程的“减源—拦截—修复”(3R)理论与实践[J]. 农业工程学报, 2011, 27(5): 1-6.
- [7] 黄文星. 安徽省畜禽业污染源产排污特征与规律研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2011.
- [8] 夏立忠, 杨林章, 吴春加, 等. 太湖地区典型小城镇降雨径流 NP 负荷空间分布的研究[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(3): 267-270.
- [9] 杨林章, 冯彦房, 施卫明, 等. 我国农业面源污染治理技术研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(1): 96-101.
- [10] 麻德明, 石洪华, 丰爱平. 基于流域单元的海湾农业非点源污染负荷估算——以莱州湾为例[J]. 生态学报, 2014, 34(1): 173-181.
- [11] Ongley E D, Zhang X, Yu T. Current status of agricultural and rural non-point source pollution in China [J]. Environmental Pollution, 2010, 158(5): 1159-1168.
- [12] 刘庄, 晁建颖, 张丽, 等. 中国非点源污染负荷计算研究现状与存在问题[J]. 水科学进展, 2015, 26(3): 432-442.
- [13] 赖正清, 李硕, 李呈昱, 等. SWAT 模型在黑河中上游流域的改进与应用[J]. 自然资源学报, 2013, 28(8): 1404-1413.
- [14] 张玉珍. 九龙江上游五川流域农业面源污染研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2003.
- [15] 窦培谦, 王晓燕, 王丽华. 非点源污染中氮磷迁移转化机理研究进展[J]. 首都师范大学学报: 自然科学版, 2006, 27(2): 93-98.
- [16] 吴春艳, 庄舜尧, 杨浩, 等. 土壤磷在农业生态系统中的迁移[J]. 东北农业大学学报, 2003, 34(2): 210-218.
- [17] 杨龙元, 蔡启铭, 秦伯强, 等. 太湖梅梁湾沉积物—水界面氮迁移特征初步研究[J]. 湖泊科学, 1998, 10(4): 41-47.
- [18] Bostrom B, Persson G, Broberg B. Bioavailability of different phosphorus forms in freshwater systems [J]. Hydrobiologia, 1988, 170(1): 133-155.
- [19] 陈永川, 汤利. 沉积物—水界面氮磷的迁移转化规律研究进展[J]. 云南农业大学学报, 2005, 20(4): 528-533.
- [20] 周培疆, 郑振华, 仇银燕, 等. 普通小球藻生长与武汉东湖水体磷形态的相关研究[J]. 水生生物学报, 2001, 25(6): 571-575.

陶波,刘洋,李向勇,等.大豆中不同除草剂作用靶标酶的 miRNA 前体克隆[J].江苏农业科学,2016,44(9):24-27.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2016.09.007

# 大豆中不同除草剂作用靶标酶的 miRNA 前体克隆

陶波<sup>1</sup>,刘洋<sup>1</sup>,李向勇<sup>1</sup>,金龙国<sup>2</sup>,邱丽娟<sup>2</sup>

(1.东北农业大学农学院,黑龙江哈尔滨 150010;2.中国农业科学院作物科学研究所/

国家农作物基因资源与遗传改良重大科学工程/农业部作物种质资源与生物技术重点开放实验室,北京 100081)

**摘要:**对前人已预测的大豆 miRNA 的 4 个茎环结构进行引物设计、克隆 miRNA 前体,先将设计好的接头与大豆小 RNA 的 3'末端连接,然后利用与接头序列互补的引物对小 RNA 进行反转录,即可得到加接头的第 1 链 cDNA,再用基因特异引物 CSP 和通用接头引物的组合,经 PCR 扩增后即可捕获位于已知序列区和接头之间的 3'端 RNA 序列。结合 3'端引物的测序结果,初步预测成熟 miRNA 可能的 6 个组合是同一家族。

**关键词:**miRNA;EPSPS(5-烯醇丙酮酰莽草酸-3-磷酸合成酶);基因序列;草甘膦;克隆

**中图分类号:**S482.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2016)09-0024-04

草甘膦是一类具有特异性,且能有效抑制叶绿体酶、5-烯醇丙酮酰莽草酸-3-磷酸合成酶(EPSPS)的除草剂<sup>[1-2]</sup>。对 EPSPS 作用的草甘膦能阻断莽草酸酯途径,通过竞争性抑制磷酸烯醇式丙酮酸(PEP)与 EPSPS 结合,形成稳定的三元络合物,从而阻断 PEP 与 3-磷酸莽草酸(S3P)反应生成 EPSPS,最终阻止芳香族氨基酸的生物合成,抑制芳香族氨基酸的生成,导致植物死亡<sup>[3-4]</sup>。

microRNA(miRNA)是指真核生物中长度约为 21~25 nt 的小型内源的非编码单链 RNA 家族。microRNA 是 Lee 等于 1993 年在线虫中首次发现的。此后,大量的 microRNA 在植物和动物中被发现和克隆<sup>[5]</sup>,到目前为止,植物中发现的 microRNA 分子已逾 200 种<sup>[6]</sup>。microRNA 是近年来非编码 RNA 研究的热点。它们在组织发育和细胞分化的特定阶段表达,可以在转录后水平对许多基因的表达起着重要的调控作用

用<sup>[7]</sup>。miRNA 通过 2 种途径发挥其作用:(1)miRNA 与靶 mRNA 序列不完全互补,它主要通过靶 mRNA 的不完全互补配对进而阻抑 mRNA 的翻译过程,这种途径对 mRNA 的稳定性无任何影响,属于翻译水平基因调节;(2)miRNA 与靶 mRNA 序列完全互补,它可以通过与小干扰 RNA(small interfering RNA, siRNA)类似的途径与靶 mRNA 完全互补配对进而降解靶 mRNA,属于转录后水平基因调节<sup>[8]</sup>。

在各类小分子 RNA 中,miRNA 具有最广泛的基因调节功能<sup>[9]</sup>,内含子 miRNA 具有反向调节其宿主基因的功能<sup>[10-11]</sup>,可能有以下几种情况:(1)当宿主基因是内含子 miRNA 的靶基因时,内含子 miRNA 直接下调宿主基因的表达,抑制其功能的发挥,这是直接作用。譬如,内含子 miR-204 被预测可直接靶向其宿主基因 *TRPM3*<sup>[12]</sup>。(2)内含子 miRNA 还可以通过下调促进宿主基因功能的靶基因,从而拮抗宿主基因的功能。目前还未见有这方面的试验证据,但不能否定这种情况存在的可能性。文献报道内含子 miR-25 的可能靶基因是 *FHL2* 基因,而 *FHL2* 蛋白则通过与宿主基因编码的蛋白 MCM7 相互作用从而促进其功能<sup>[13]</sup>。因此,我们推测内含子 miR-25 有可能有反向调节宿主基因 *FHL2* 的功能,当然这还有待今后进一步试验证实。拟南芥中的 miR160 通过负调控生长素响应因子(auxin response factors)ARF10 和 ARF16 的表达而控制根冠细胞的形成<sup>[14]</sup>。玉米中的 *GL15*

收稿日期:2016-03-29

基金项目:国家转基因生物新品种培育重大专项(编号:2013ZX08004-001)。

作者简介:陶波(1963—),男,黑龙江哈尔滨人,博士,教授,博士生导师,研究方向为新型农药开发。E-mail:botaol@163.com。

通信作者:邱丽娟,博士,研究员,博士生导师,研究方向为大豆基因资源发掘。E-mail:qulijuan@caas.cn。

[21]钟卫鸿,曹剑峰,薛浚,等.氮和磷对铜山源水库优势藻生长的影响试验研究[J].环境污染与防,2003,25(1):20-22.

[22]Morel C, Tunney H, Plenet D, et al. Transfer of phosphorus ions between soil and solution: perspective in soil testing[J]. Journal of Environment Quality, 2000, 29(1): 50-59.

[23]Stephen A M, Johnna L K. Lake and reservoir management[J]. Water Environment Research, 1998, 70(4): 767-775.

[24]苑韶峰,吕军,俞劲炎.氮、磷的农业非点源污染防治方法[J].水土保持学报,2004,18(1):122-125.

[25]甘小泽.农业面源污染的立体化削减[J].农业环境与发展, 2005(5):34-37.

[26]Birgand F, Skaggs R W, Chescheir G M, et al. Nitrogen removal in

streams of agricultural catchments—a literature review[J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2007, 37(5): 381-487.

[27]Chen D, Lu J, Huang H, et al. Stream nitrogen sources apportionment and pollution control scheme development in an agricultural watershed in eastern China[J]. Environmental Management, 2013, 52(2): 450-466.

[28]Zhu G, Wang S, Wang W, et al. Hotspots of anaerobic ammonium oxidation at land-freshwater interfaces[J]. Nature Geoscience, 2013, 6(2): 103-107.

[29]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.