

# 农业非点源污染研究进展和趋势

李丽华<sup>1,2</sup>, 李强坤<sup>1\*</sup>

(1.黄河水利科学研究院, 河南 郑州 450003; 2.河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098)

**摘要:**根据国内外农业非点源污染研究现状,本文在探讨农业非点源污染内涵及其特征的基础上,简要总结了农业非点源污染负荷的估算模型,列举区域农业非点源污染风险评估的手段和方法,从不同角度归纳了农业非点源污染的控制技术,并提出了近期农业非点源污染急需研究的热点和趋势,以期为进一步的农业非点源污染管理和控制提供参考。

**关键词:**农业非点源污染;研究进展;模型;风险评估;控制措施

中图分类号:X522 文献标志码:A 文章编号:2095-6819(2014)01-0013-10 doi: 10.13254/j.jare.2013.0156

## The Progress and Trends of Agricultural Non-point Source Pollution Research

LI Li-Hua<sup>1,2</sup>, LI Qiang-kun<sup>1\*</sup>

(1.Institute of Yellow River Hydraulic Research, Zhengzhou 450003, China; 2.College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098,China)

**Abstract:** According to the current research on agricultural non-point source pollution at home and abroad, the connotation and feature of agricultural non-point source pollution were explored in this paper, and then the estimating model of pollution load was concluded briefly. Meanwhile, the paper also listed the means and methods of risk assessment of regional agricultural non-point source pollution and summed up the control technologies from different angles. Finally, the recent much-needed research hotspots and trends were put forward in order to provide reference for further management and control of agricultural non-point source pollution.

**Keywords:** agricultural non-point source pollution; research progress; model; risk assessment; control measures

近年来,随着农业投入的增加,农业生产和农业活动引起的非点源污染对环境的影响日益显著。水环境方面,由于点源污染得到逐步控制,非点源污染尤其是农业非点源污染对水体环境质量的影响尤为突出。据2010年国家三部委联合发布的《第一次全国污染源普查公报》,我国农业污染源年排放化学需氧量1324.09万t,总氮270.46万t,总磷28.47万t,分别占全国污染物总排放量的43.7%、57.2%、64.9%,农业源已成为主要污染源。我国河湖水系中,个别水体农业非点源污染负荷已占到总接纳负荷的60%~70%<sup>[1-2]</sup>。为逐步控制和减缓农业非点源污染对水体环境质量

的影响,国家《水利科技发展“十二五”规划》在水利科技重点任务中明确提出:“在农村水环境方面,农田排水技术实现由单一的水量、水位控制调节功能扩展到水质控制、溶质运移、污染防治和水环境保护等功能,减轻面源污染对环境水体危害,促进灌区资源、环境、生态、经济协调可持续发展”;《“十二五”农业与农村科技发展规划》在重点领域与方向提出要“开展农业面源污染防控研究”等等,都凸显了农业非点源污染对环境水体质量影响的重要性和开展农业非点源污染防控技术研究的紧迫性。由此,对农业非点源污染控制和管理等技术体系的相关研究已成为当前改善水体环境、提升农业生态水平的关键课题。

在当前研究基础上,结合现阶段我国农业生产现状,本文在探讨农业非点源污染内涵及其特征的基础上,简要总结了农业非点源污染负荷的估算模型,列举区域农业非点源污染风险评估的手段和方法,从不同角度归纳了农业非点源污染的控制技术,并提出了

收稿日期:2013-09-18

基金项目:国家自然科学基金项目(51379085);黄河水利科学研究院科技发展基金(2012068)

作者简介:李丽华(1990—),女,硕士研究生,研究方向为水文水资源与农业水土环境。E-mail: 982386590@qq.com

\*通信作者:李强坤 E-mail: liqiangk@126.com

近期农业非点源污染急需研究的热点和趋势,以期为进一步的农业非点源污染管理和控制提供参考。

## 1 农业非点源污染的主要特征

按照污染物进入水体的方式,水环境污染可分为点源污染(Point Source Pollution, PSP)和非点源污染(Non-point Source Pollution, NSP)。凡是通过污水管网直接进入外界水体的污染形式属于点源污染,除此之外的一切污染形式均属于非点源污染<sup>[3]</sup>。在各种非点源污染形式中农业非点源污染表现最为普遍,并成为当今世界水质恶化的第一大威胁。结合现阶段我国农业生产现状,农业非点源污染具有以下特征<sup>[4]</sup>:

(1)灌溉(降水)是农业非点源污染形成的充分条件。农业非点源污染形成的物质基础是土壤中积存的养分或施入田间的肥料,其形成和迁移的动力与载体则是农田水分运动;

(2)明显的单元特征。受灌溉渠道和排水沟渠的影响,现阶段我国农业生产具有明显的小单元特征。各单元内由于作物种植结构不同,耕作方式、化肥、农药施用量等有所差异,导致农业非点源污染的产污强度、过程不同;

(3)典型的周期性变化特征。我国主要粮食作物如水稻、小麦、玉米等,从耕种到收割都存在着明显的区域周期性变化特征,降水、灌溉、施肥等都随农作物生长周期而变化,形成的农业非点源污染也呈现周期性的变化特征;

(4)农业非点源污染物迁移路径复杂。农业非点源污染物从田间产出后,在经农级、支级、干级等各级排水沟逐级输送、汇合过程中往往还会汇入其他污染物,如:农村垃圾滤液、养殖污染废水、乡镇(村)办企业工业生活废水等等。农业非点源污染物迁移不仅路径长,而且影响因素复杂。

## 2 农业非点源污染负荷模型

### 2.1 国外研究

国外从 20 世纪 70 年代开始系统地研究农业非点源污染问题,由于农业非点源污染是一种间歇发生、随机性、突发性、不确定性很强的复杂过程,模型化研究一直是非点源污染研究的核心领域。综合 40 余年的相关研究,农业非点源污染模型大致经历了 3 个阶段:经验型模型、确定型模型和随机模型。

(1)经验型模型。20 世纪 60 年代至 70 年代初,人们已经认识到了非点源污染的危害性,但限于对其

形成机理和过程的认识不足,以及监测资料的匮乏,更多的是采用经验模型进行研究<sup>[5]</sup>。经验模型通过建立污染负荷与流域土地利用或径流量之间的经验关系来识别土地利用或流域非点源污染负荷。代表模型有美国农业部农业手册第 282 号颁布的通用土壤流失方程模型(USLE)<sup>[6]</sup>,美国农业部开发的径流曲线方程(SCS)<sup>[7]</sup>和早期的输出系数法(或称单位面积负荷法)等。经验型模型不考虑溶质运移的机制和动力学特征,对数据要求较低,有较强的实用性和准确性;而这类模型的功能较为单一,不能对非点源污染的过程进行动态模拟和估算,使得它的进一步应用受到了较大限制。

(2)确定型模型。20 世纪 70 年代中后期以来,随着对农业非点源污染物理化学过程研究的深入和对其运移过程的广泛监测,特别是计算机模拟技术的广泛应用,确定型模型逐渐成为非点源污染模型开发的主要方向。早期的代表性模型有美国农业部提出的 GREAMS 和 GLEAMS 模型<sup>[8-9]</sup>,普度大学 Beasley 等提出的 ANSWERS (Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation)模型<sup>[10]</sup>,以及美国农业研究署和明尼苏达州联合开发的 AGNPS (Agricultural Non-point Source Pollution)模型<sup>[11]</sup>。这些模型能够对流域不同节点及出口处的流量和水质进行较为准确的模拟和预测;但是模型对空间变异性考虑不足,还不适用于大型流域及复杂的地貌状况,同时模型所需的大量空间信息也难以获得。随着“3S”技术与农业非点源污染模型的融合,研究过程充分考虑空间变异特征,模型的功能和精度更加完善,处理效率进一步提高<sup>[12]</sup>。一些功能强大的超大型流域模型被开发出来,这些模型不再是单纯的数学运算程序,而是集空间信息处理、数据库技术、数学计算、可视化表达等功能为一体的大型专业软件<sup>[13]</sup>。如美国环保局开发的 BASINS 模型<sup>[14]</sup>,美国农业部开发的 SWAT 模型<sup>[15]</sup>和连续模拟模型——AnnAGNPS 模型<sup>[16]</sup>等。

常见机理模型及应用特征如表 1 所示。

(3)随机模型。近 20 年来,人们认识到在利用模型概化自然系统的过程中进行的一系列简化与假设,加之模型运用时输入信息的缺乏或误差,以及获取的参数值不确定等原因,使得模拟系统无法避免不确定性的产生,因此随机模型逐渐发展起来,并广泛受到重视和应用。代表性的有 Jury 等<sup>[17]</sup>提出的传递函数模型理论,此模型将溶质在土壤孔隙中复杂运移现象作为随机过程处理,不考虑溶质在田间土壤中运移的微

表1 常用农业非点源污染模型

Table 1 Commonly used agricultural non-point source models

模型名称	空间尺度	参数形式	模型用途	模型结构	不足
GREAMS	农田	集总式	预测农田单元径流、侵蚀、来自农业活动的化学物质运移;可以预测单次暴雨事件或长时期的平均效果	SCS 水文模型;Green-Ampt 入渗模型;考虑溅蚀、冲蚀和沉积;考虑氮、磷负荷,简单污染物平衡	不适用于复杂的地貌状况;在外部参数输入方面缺乏降雨过程信息,对侵蚀产沙过程考虑不够
GLEAMS	农田	集总式	评价农业管理措施对农药、营养物质可能的淋洗;田间管理决策对地下水质的影响;田间地表径流和土壤流失动态	SCS 水文模型;USLE;复杂的氮磷循环	能模拟的最大面积只限于小块土地,不能模拟河道内过程
ANSWERS	流域	分布式	预报次降雨条件下的表面净流量和土壤侵蚀量和污染物流失量	考虑降雨初损、入渗和蒸发;考虑溅蚀、冲蚀和沉积;氮、磷的复杂污染平衡	不能模拟融雪过程、杀虫剂、汇流过程;不考虑营养物在输移过程中的转移和损失;属于单事件模型
AGNPS	流域	分布式	适用于集水面积在 200 km <sup>2</sup> 以下的流域;研究污染物对地表水和地下水质的潜在影响;定量估计农业污染负荷;评价不同管理措施的效果;模拟集水区內单降水事件的径流、侵蚀、沉积和化学物质输移	SCS 水文模型;USLE;氮、磷和 COD,不考虑污染物平衡	没有考虑对地下水的模拟
BASINS	流域	分布式	快速分析大量点源和非点源污染物;模拟河流或大尺度流域的水质状况	集合多种模型,包括流域负荷和传输模型、污染物负荷模型、稳态水质模型等	必须借助 Arcview 软件运行,运用成本相对较高,模型所包含的水质评价模型(如 SWAT, PLOAD 等)的不足未得到改进;对数据资料的要求高
SWAT	流域	分布式	预测不同土壤、土地利用和管理措施对流域径流、泥沙负荷、农业化学物质运移等的长期影响;模拟河流内生物和营养物的变化过程。	SCS 水文模型;MUSLE;氮磷负荷,复杂污染物平衡	没有考虑不同子流域之间的地下水流关系;模型所需的参数较多
AnnAGNPS	流域	分布式	AGNPS 改进版之一,能够模拟长时间系列,在资料的预处理、后处理及可视化方面有了很大改善	SCS 水文模型;RUSLE;氮、磷负荷,污染物平衡	模型中所做的假设忽略了系统中的不确定因素

观机制,将溶质的输出表征为输入通量函数,而溶质在土壤中发生的动力学过程由概率密度函数表示。

## 2.2 国内研究

国内的农业非点源污染研究起步较晚,始于 20 世纪 80 年代初的湖泊、水库富营养化调查和河流水质规划。归纳 30 多年来国内非点源污染方面的研究,大致可概括为 3 方面内容:一是经验统计分析研究,如李怀恩<sup>[18-19]</sup>提出的平均浓度法、土地利用关系法和污染负荷-泥沙关系法,陈友媛等<sup>[20]</sup>提出的水文估算法,李强坤等<sup>[21]</sup>提出的基于单元分析的农业非点源污染负荷计算,王伟明等<sup>[22]</sup>将概率配点法(PCM)用于农药非点源污染的不确定性分析和随机模拟;二是机理探讨研究,如李怀恩等<sup>[23]</sup>把流域概化为河网系统,以逆高斯瞬时单位线模型为基础,建立了一套具有机理性质的流域非点源污染数学模型;张建云<sup>[24]</sup>提出的包括降雨径流、土壤侵蚀和畜禽污染等模块的非点源污染模型;张瑜芳等<sup>[25]</sup>提出的排水条件下氮素转化、运移和流失简化计算模型;黄满湘等<sup>[26]</sup>采用田间模拟降雨径流试验研究北京地区农田暴雨径流氮素流失与

雨强、作物覆盖、施肥因子的关系,以及侵蚀泥沙的粒径分布特征和对氮的富集作用;马军花等<sup>[27]</sup>将土壤溶质运移理论和土壤微生物化学、植物生理学有机地结合起来,建立了农田土壤氮素运移、转化与吸收的综合数学模型;王建中等<sup>[28]</sup>建立了基于次降雨事件的坡面氮素迁移模型,李强坤等<sup>[29]</sup>提出了多沙河流非点源污染负荷估算模型,李娜等<sup>[30]</sup>应用连续时间随机游动理论模拟了重金属镉在水土环境中的运移;三是对国外模型的吸收、改进和综合应用。如蔡明等<sup>[31]</sup>对 Johnes 输出系数模型的改进,陈欣等<sup>[32]</sup>采用 AGNPS 模型对南方丘陵区小流域磷素进行预测,范丽丽等<sup>[33]</sup>应用 SWAT 模型对三峡库区大宁河流域农业非点源污染负荷进行模拟计算,黄金良等<sup>[34]</sup>采用 GIS 技术和 USLE、SCS-CN 及 AnnAGNPS 模型相结合,对南方中等尺度流域进行农业非点源污染控制区划。

## 3 农业非点源污染风险评估

由于农业非点源污染影响因素复杂,有学者提出:对污染负荷精确量化是十分困难的,且不是污

染控制所必需的,快速准确划定农业非点源污染关键源区(CSAs)并提出相应控制措施才是农业非点源污染研究的重要工作<sup>[35-36]</sup>。目前,区域农业非点源污染风险评估应用较多的是指标体系评价法,其关键技术在于评价指标的选取以及权重赋值的合理性<sup>[37]</sup>。

### 3.1 评价指标的选取

农业非点源污染影响因素复杂,但总体上可将其分为源因子和汇因子 2 类。

(1)源因子:主要反映各土地利用方式下土壤中养分含量、肥料输入及土壤对养分的持留能力等,表明是否具有较高的养分输出潜力,主要包括土壤质地、土壤覆盖、化肥和有机肥的施用量和施用方法、土壤对潜在污染物的固持能力等。

(2)汇因子:指影响养分迁移的因子,决定源因子中的养分输出潜力能否转化为实际的流失<sup>[38]</sup>,主要包括降雨侵蚀因子、土壤可侵蚀性因子、地表径流因子、地形因子、输移距离因子等。

### 3.2 权重的确定

由于各评价指标的内涵不同,结合区域具体情况,有必要判明这些指标的相对重要性即权重。确定指标权重可分为 3 类方法:主观方法、客观方法和综合方法。

(1)主观方法。如专家打分法<sup>[39]</sup>、主观判断法、经验判断法等。专家打分法是目前确定权重最常用的方法。张淑荣等<sup>[40]</sup>基于专家打分法,对农田生态系统非点源污染敏感性分布进行空间评价。由于专家打分法主观性强,每个专家打分结果差异较大,兼之不同区域自然、社会、经济等条件不尽相同,一个区域的打分结果往往并不适合于另外一个区域。同样,主观判断法和经验判断法也是由评价人根据自己的实践经验和主观判断直接给出权重,通常带有研究者的主观性,准确性无法检验。

(2)客观方法。如主成分分析法、因子分析法、灰色系统理论法、熵权计算法等。主成分分析法利用降维的思想,把多指标转化为少数几个综合指标,即主成分,而这几个主成分可以反映原来多个变量的大部分信息<sup>[41]</sup>。因子分析是主成分分析方法的推广和深化,其基本思想是根据相关性大小把变量分组,用较少个数公共因子的线性组合来表达原来观测的每个变量,其缺点是对资料的连续性、线性要求高且工作量大<sup>[42]</sup>。张蕾等<sup>[43]</sup>应用因子分析和聚类分析对石头口门水库水质进行了评价,通过因子分析提取了 3 个主要因子。灰关联分析法可在影响因子信息不足的情况

下,对各序列两两之间进行关联判定,来量化不同层次中多个序列相对某一级别标准序列的关联性,如林绍霞等<sup>[44]</sup>采用灰色关联度法分析不同影响因子引起农业非点源污染程度的差异。

(3)综合方法。随着计算机科学的普及与提高,综合方法得到了应用和推广,如层次分析法、神经网络 BP 法、支持向量基法等。其优点在于可以降低主观经验判断干扰,增加客观属性实际反映,同时又能较好地满足一致性检验的要求。层次分析法是近年来研究较多的方法,它将研究者的思维过程数学化,并通过构造判断矩阵将复杂的系统分析简化为各指标之间成对的比较判断和简单的排序计算;但随着判断矩阵增大,一致性检验的要求难以得到满足<sup>[45]</sup>。李潇瀚等<sup>[46]</sup>针对伊通河流域农业非点源污染风险评估时,采用层次分析法确定影响因子权重。

### 3.3 评价方法

国内外研究中,指标体系评价法典型应用的有:磷指数法、潜力指数法和等标污染负荷法。

#### 3.3.1 磷指数法

磷指数评价法是非点源污染评价的一种主要方法。1993 年, Lemunyon 等<sup>[47]</sup>提出了磷指数(PI)评价法,该法选取土壤侵蚀、地表径流、土壤测试磷(STP)、化学磷肥和有机磷肥的施用量和施用方法等 8 个因子构建评价指标体系,根据每个因子测定值将其划分为 5 个等级,并赋予每个因子相应的权重值,最后通过公式计算得 PI 指数。根据这一指数值进行磷素流失风险分级,强度高和很高的单元就是农业非点源污染的重点控制区<sup>[48]</sup>。磷指数法简单实用,并且注重与 GIS 的结合使结果具有更好的可视性和可操作性<sup>[49]</sup>。国内应用方面,张淑荣等<sup>[50]</sup>在于桥水库流域建立磷指数法。宋月君等<sup>[51]</sup>对我国九大流域农用地非点源磷污染危险性进行了评价。周慧平等<sup>[52]</sup>采用改进的磷指数法在巢湖流域开展非点源磷流失风险评价及关键源区识别。

#### 3.3.2 潜力指数法

潜力指数法 APPI (Agricultural Non-point Source Pollution Potential Index)是 Petersen 等<sup>[53]</sup>在 1991 年建立的一个用于较大区域尺度的非点源污染潜力指数评价系统。2004 年,郭红岩等<sup>[54]</sup>参考美国评价 NPS 发生潜力的方法,针对河网区域建立了一套农业非点源污染发生的潜力指数系统 APPI。APPI 参数设置简洁合理,且易搜集整理,充分考虑了自然因素与人为因素对农业非点源污染的贡献。周徐海等<sup>[55]</sup>采用 APPI

对太湖宜兴市大浦镇 19 个行政村各个区域发生非点源污染的潜力进行了评价。孟丹等<sup>[56]</sup>采用 APPI 对石头口门水库双阳河流域 9 个行政区的农业非点源污染发生潜力进行预测和评价。曹昕鑫等<sup>[57]</sup>利用 APPI 分析了沙颍河流域 46 个行政村的农业非点源污染潜力和污染负荷空间分布。

### 3.3.3 等标污染负荷法

等标污染负荷法<sup>[58]</sup>反映污染源本身的潜在污染水平,利用等标污染指数、等标污染负荷以及污染负荷比 3 个特征指数来确定主要污染物、重点污染和总污染负荷。叶飞等<sup>[59]</sup>对江苏省 13 个市的农业非点源污染源采用等标污染负荷的评价方法进行了评价。高新昊等<sup>[60]</sup>采用“等标污染法”计算了 2007 年山东省化肥、畜禽粪便、生活排污 3 种污染源中总氮、总磷 2 种污染物的流失量,以及全省 17 个地市 3 种污染源中 2 种污染物的等标污染负荷与等标污染指数。孟晓路等<sup>[61]</sup>应用等标污染负荷法对太子河流域的众多污染源进行评价,筛选出了重点风险源。

## 4 农业非点源污染控制措施

随着点源污染的控制水平提高,非点源污染的治理已成为全球环境问题能否得到有效解决的关键,不同研究者从不同的角度出发提出了多种农业非点源污染控制措施。

### 4.1 最佳管理实践(BMPs)

控制措施中最有影响的是 20 世纪 70 年代由美国环保局(USEPA)提出的最佳管理实践(Best Management Practices, BMPs)。BMPs 可分为管理措施和工程措施。管理措施分为养管理、耕作管理和景观管理 3 个层次,工程措施包括湿地、植被缓冲区和水陆交错带等新兴的生态工程措施。方志发等<sup>[62]</sup>将 BMPs 应用于千岛湖流域,针对性地提出各类非点源污染控制的最好管理措施。冯永忠等<sup>[63]</sup>在最好管理措施基本原理的基础上,构建宁夏黄河灌区农业非点源污染防控方案,为宁夏黄河灌区农业非点源污染防治提供理论依据。

### 4.2 控制阶段划分

苑韶峰等<sup>[64]</sup>将众多的防治方法分为:“源”防治和“汇”防治 2 类。“源”防治方法主要是从污染物源头控制和减少污染物流失,具体措施包括调整种植结构、调控施肥技术、养殖业控制等。刘孝利等<sup>[65]</sup>利用 SWAT 模型对东北典型黑土区农业小流域进行研究,证明施肥空间调整和田间管理优化可有效地降低产流、产沙

和 N、P 养分的流失。“汇”方法则着重于对污染物的去除和削减。研究较多的方法有:应用沟渠湿地去除、水生植物去除、生物技术等。姜翠玲等<sup>[66]</sup>论述了湿地生态系统作为农田与水体之间的一个过渡地带,对地表径流中氮磷营养物质的降解作用。罗纨等<sup>[67]</sup>提出控制排水措施对减少农业非点源污染具有重要意义,将深度为 1 m 的排水农沟控制到 60 cm 时,生长期内农沟地下排水量减少了 50% 左右。

李强坤等<sup>[68]</sup>认为非点源污染控制总体可划分为源头减量、过程控制及末端处理 3 个阶段,其控制成本也依次逐阶段递增,源头是非点源污染控制的关键和重点。戴照福等<sup>[69]</sup>根据广东省自身情况提出了应对土壤磷素流失的控制措施,包括合理施肥、实施最佳管理措施、修筑人工湿地和缓冲带、充分利用多水塘系统。杨林章等<sup>[70]</sup>、薛利红等<sup>[71]</sup>总结提炼了农村面源污染治理的“4R”理论,即源头减量(Reduce)、过程阻断(Retain)、养分再利用(Reuse)和生态修复(Restore),四者之间相辅相成,构成一完整的技术体系链。“4R”控制技术体系是以污染物削减为根本,从污染物的源头减量入手,根据治理区域的污染汇聚特征进行过程阻断,通过对养分的循环再利用减少污染物的入水体量,并对水体进行生态修复,从而实现水质改善的目的。“4R”控制技术体系可以实现污染控制在时间和空间上的全覆盖,使整个系统的污染控制效果更好。

### 4.3 技术方法划分

郭鸿鹏等<sup>[72]</sup>将农业非点源防治技术分为单一技术、集成技术和综合技术 3 类。其中单一技术包括科学施肥技术、缓冲带防治技术、生态农业技术、保护性耕作技术、科学灌溉技术等。段亮等<sup>[73]</sup>通过对太湖流域旱地磷素进行研究得出结论地表管理和施肥方式能有效地降低磷流失量,其中地表覆膜、秸秆覆盖、肥料条件及穴施分别可降低 90.5%、86.5%、80.2%、80.5% 的磷流失。集成技术包括与 3S 技术的集成、与决策支持系统的集成和与示踪技术的集成。综合技术包括最好管理实践和立体化消减体系。集成技术和综合技术是未来农业非点源污染控制措施研究的重点。

## 5 进一步研究的趋势和热点

结合国内外农业非点源污染的研究进展,总结近期和未来的研究重点有以下几个方面:

### 5.1 进一步深入研究农业非点源污染模型

近年来,农业非点源污染模型主要从两方面发

展,一是实现 3S 技术与农业非点源污染模型多层次、多通道结合,针对模型空间数据量大、参数复杂的特点,借助在时效性和宏观性方面具有明显优势的 RS 和在空间数据管理、分析和可视化方面独一无二的 GIS 技术对模型进行处理<sup>[74]</sup>;二是强化农业非点源污染不确定性模型的研究。非点源污染模拟过程中模型结构、模型参数、输入数据和验证数据 4 个方面的不确定性相互作用和影响,最终导致模拟结果存在显著的不确定性。对非点源模型进行系统的不确定性分析,能有效支撑非点源污染的研究和管理工作,对于制定合理的污染防治措施具有重要意义<sup>[75]</sup>。

### 5.2 拓宽农业非点源污染研究对象的广度

目前,农业非点源污染的研究主要以 N、P 的迁移转化、污染负荷估算、径流污染特征等研究为主,而对有毒类污染物(杀虫剂)、生物累积类污染物(有毒有机物、重金属)的研究还较少涉及。农业生产活动中农药的大量使用,以及工业化和城市化进程的不断加快,导致我国农田土壤化肥、重金属等污染不断加剧,因此,农业非点源污染物的研究不应局限于 N、P 污染物,研究对象广度的逐步拓展也是未来研究的发展趋势。

### 5.3 农业非点源污染对地下水的影响研究

地下水系统作为水环境的一部分,其污染与农业非点源污染有着密切的关系,而现阶段农业非点源污染的研究更多地着重于地表径流中养分的流失规律、影响因素以及控制技术研究,对于地下径流中非点源污染物的输出规律研究较少。因此,农业非点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。

### 5.4 进一步研究风险评估方法,建立评价指标体系和预警系统

目前,国际上尚无成熟和标准化的风险评估理论体系可用于指导实践,各类方法都在不断探索中。层次分析法、模糊综合评价法、投影寻踪评价法与农业非点源污染风险评估的结合,传统方法的改进,各种权重确定方法、评价方法之间的综合运用都是未来研究的热点。在农业非点源污染风险评估的基础上,可进一步建立农业非点源污染的数据库、评价指标体系和预警系统,为决策者进行判断和宏观管理提供支撑。

### 5.5 加强污染防治技术研究

以基因工程为主导的生物技术,包括生物杂交、生物遗传,培养高产、抗病、固氮的作物以减少化肥和农药的使用,构建能够降解杀虫剂、除草剂、多环芳烃

化合物等高效基因工程菌,是解决农业非点源污染的强有力的手段。沟渠湿地去除技术、总量控制也是未来农业非点源污染控制研究的热点<sup>[76]</sup>。同时,借鉴发达国家在 BMPs 应用上的经验,结合具体区域特征和污染状况,从流域生态和谐角度确定 BMPs 中包含的具体工程措施和管理措施,以建立流域土地、水域最优开发和管理模式。

### 参考文献:

- [1] 仓衡谨,许炼峰,李志安,等.农业非点源污染控制中的最佳管理措施及其发展趋势[J].生态科学,2005,24(2):173-177.  
CANG Heng-jin, XU Lian-feng, LI Zhi-an, et al. Using best management practices to control agricultural non-point source pollution [J]. *Ecologic Science*, 2005, 24(2): 173-177. (in Chinese)
- [2] 朱万斌,王海滨,林长松,等.中国生态农业与面源污染减排[J].中国农学通报,2007,23(10):184-187.  
ZHU Wan-bin, WANG Hai-bin, LIN Chang-song, et al. Chinese ecological agriculture can contribute a lot in the reduction of non-point pollution in China [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2007, 23(10): 184-187. (in Chinese)
- [3] 张维理,徐爱国,冀宏杰,等.中国农业面源污染形势估计及控制对策Ⅲ.中国农业面源污染控制中存在问题分析[J].中国农业科学,2004,37(7):1026-1033.  
ZHANG Wei-li, XU Ai-guo, JI Hong-jie, et al. Estimation of agricultural non-point source pollution in China and the alleviating strategies III. A review of policies and practices for agricultural non-point source pollution control in China [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(7): 1026-1033. (in Chinese)
- [4] 李强坤,李怀恩.农业非点源污染数学模型及控制措施研究:以青铜峡灌区为例[M].北京:中国环境科学出版社,2010:84-85.  
LI Qiang-kun, LI Huai-en. The research on mathematical model and control measures of agricultural non-point source pollution: qingtongxia irrigation district as an example [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2010: 84-85. (in Chinese)
- [5] Yoram J L, Anthony S D. Continuous simulation of non-point pollution [J]. *Journal WPCF*, 1978, 50(10): 2348-2361.
- [6] 陈永宝,黄传伟,陈志伟,等. USLE 在我国的应用和发展[J].中国水土保持,2003(10):11-13.  
CHEN Yong-bao, HUANG Chuan-wei, CHEN Zhi-wei, et al. Application and development of USLE in China [J]. *Soil and Water Conservation In China*, 2003(10): 11-13. (in Chinese)
- [7] U S Department of Agriculture. Soil conservation service. hydrology [M]. Washington D C: In National Engineering Handbook, 1972:5-6.

- [8] Knisel W G. CREAMS: A field scale model for chemicals, runoff, and erosion from agricultural management systems[R]. ARS, USDA, 1980.
- [9] Leonard R A, Knisel W G, Still D A. GLEAMS: Groundwater loading effects of agricultural management systems[J]. *Transactions of the ASABE*, 1987, 30(5): 1403-1418.
- [10] Beasley D B, Huggins L F, Monke E J. ANSWERS: A model for watershed planning[J]. *Transactions of the ASABE*, 1980, 23(4): 938-944.
- [11] 孙金华, 朱乾德, 颜志俊, 等. AGNPS 系列模型研究与应用综述[J]. 水科学进展, 2009, 20(6): 876-884.  
SUN Jin-hua, ZHU Qian-de, YAN Zhi-jun, et al. A review of research and application of AGNPS model[J]. *Advances in Water Science*, 2009, 20(6): 876-884. (in Chinese)
- [12] 陈勇, 冯永忠, 杨改河. 农业非点源污染研究进展[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2010, 38(8): 173-181.  
CHEN Yong, FENG Yong-zhong, YANG Gai-he. Study advances on agriculture non-point source pollution[J]. *Journal of Northwest A & F University: Natural Science Edition*, 2010, 38(8): 173-181. (in Chinese)
- [13] Hession W Cully, Shanholtz V O. A geographic information system for targeting nonpoint-source agricultural pollution[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1988, 43(3): 264-266.
- [14] Ray C Whittemore. The BASINS model[J]. *Water Environment & Technology*, 1998, 10(12): 57-61.
- [15] Spruill C A, Workman S R, Taraba J L. Simulation of daily and monthly stream discharge from small watersheds using the SWAT model[J]. *Journal of Electronic Packaging*, 2000, 43(6): 1431-1439.
- [16] 张玉斌, 郑粉莉. AGNPS 模型及其应用[J]. 水土保持研究, 2004, 11(4): 124-127.  
ZHANG Yu-bin, ZHENG Fen-li. AGNPS model and its application[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2004, 11(4): 124-127. (in Chinese)
- [17] William A Jury, Robert E White, Garrison Sposito. A transfer function model of solute transport through soil, 1. fundamental concepts[J]. *Water Resources Research*, 1986, 22(2): 243-247.
- [18] 李怀恩. 估算非点源污染负荷的平均浓度法及其应用[J]. 环境科学学报, 2000, 20(4): 397-400.  
LI Huai-en. Mean concentration method for estimation of nonpoint source load and its application[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2000, 20(4): 397-400. (in Chinese)
- [19] 李怀恩, 蔡明. 非点源营养负荷-泥沙关系的建立及其应用[J]. 地理科学, 2003, 23(4): 460-463.  
LI Huai-en, CAI Ming. Relationship between nonpoint source nutrient load and sediment and its application[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2003, 23(4): 460-463. (in Chinese)
- [20] 陈友媛, 惠二青, 金春姬, 等. 非点源污染负荷的水文估算方法[J]. 环境科学研究, 2002, 16(1): 10-13.  
CHEN You-yuan, HUI Er-qing, JIN Chun-ji, et al. A hydrological method for estimation of non-point source pollution loads and its application[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2002, 16(1): 10-13. (in Chinese)
- [21] 李强坤, 李怀恩, 孙娟, 等. 基于单元分析的青铜峡灌区农业非点源污染负荷估算[J]. 生态与农村环境学报, 2007, 23(4): 15-18.  
LI Qiang-kun, LI Huai-en, SUN Juan, et al. Unit-analysis-based assessment of agricultural non-point source pollution in qingtongxia irrigation area [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2007, 23(4): 15-18. (in Chinese)
- [22] 王伟明, 郑一, Arturo Keller. 概率配点法在流域非点源污染不确定性分析中的应用[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(9): 1750-1756.  
WANG Wei-ming, ZHENG Yi, Keller Arturo. Application of probabilistic collocation method in the uncertainty analysis for watershed non-point source pollution modeling[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(9): 1750-1756. (in Chinese)
- [23] 李怀恩, 沈晋. 非点源污染数学模型[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1996: 22-68.  
LI Huai-en, SHEN Jin. The mathematical model of agricultural non-point source pollution [M]. Xian: Northwest Polytechnical University Press, 1996: 22-68. (in Chinese)
- [24] 张建云. 非点源污染数学模型研究[J]. 水科学进展, 2002, 13(5): 547-551.  
ZHANG Jian-yun. A study on the non-point source pollution model[J]. *Advances In Water Science*, 2002, 13(5): 547-551. (in Chinese)
- [25] 张瑜芳, 张蔚榛, 沈荣开, 等. 排水农田中氮素转化运移和流失[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1997: 29-43.  
ZHANG Yu-fang, ZHANG Wei-zhen, SHEN Rong-kai, et al. The migration, transformation and erosion of nitrogen in the drainage farmland [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1997: 29-43. (in Chinese)
- [26] 黄满湘, 章申, 张国梁, 等. 北京地区农田氮素养分随地表径流流失机理[J]. 地理学报, 2003, 58(1): 147-154.  
HUANG Man-xiang, ZHANG Shen, ZHANG Guo-liang, et al. Losses of nitrogen nutrient in overland flow from farmland in Beijing under simulated rainfall conditions[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(1): 147-154. (in Chinese)
- [27] 马军花, 任理, 龚元石, 等. 冬小麦生长条件下土壤氮素运移动态的数值模拟[J]. 水利学报, 2004(3): 103-110.

- MA Jun-hua, REN Li, GONG Yuan-shi, et al. Numerical simulation of nitrogen transport during the growth of winter wheat[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004(3): 103-110. (in Chinese)
- [28] 王建中, 刘凌, 燕文明. 坡面氮素流失模型的建立与应用[J]. 水电能源科学, 2008, 26(6): 45-47, 53.  
WANG Jian-zhong, LIU Ling, YAN Wen-ming. Establishment and application of hillslope nitrogen loss model[J]. *Water Resources and Power*, 2008, 26(6): 45-47, 53. (in Chinese)
- [29] 李强坤, 李怀恩, 胡亚伟, 等. 黄河干流潼关断面非点源污染负荷估算[J]. 水科学进展, 2008, 19(4): 460-466.  
LI Qiang-kun, LI Huai-en, HU Ya-wei, et al. Estimation of non-point source pollution loading on Tongguan section of the Yellow River[J]. *Advances in Water Science*, 2008, 19(4): 460-466. (in Chinese)
- [30] 李娜, 任理, 商建英. 应用连续时间随机游动理论模拟重金属镉在水土环境中的运移[J]. 水利学报, 2012, 43(8): 906-913, 925.  
LI Na, REN Li, SHANG Jian-ying. Application of continuous time random walk theory to simulate cadmium transport in the soil-water environment[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2012, 43(8): 906-913, 925. (in Chinese)
- [31] 蔡明, 李怀恩, 庄咏涛, 等. 改进的输出系数法在流域非点源污染负荷估算中的应用[J]. 水利学报, 2004, 35(7): 41-46.  
CAI Ming, LI Huai-en, ZHUANG Yong-tao, et al. Application of modified export coefficient method in polluting load estimation of non-point source pollution[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004, 35(7): 41-46. (in Chinese)
- [32] 陈欣, 郭新波. 采用 AGNPS 模型预测小流域磷素流失的分析[J]. 农业工程学报, 2000, 16(5): 44-47.  
CHEN Xin, GUO Xin-bo. Prediction of phosphorus losses for micro-Watershed ecosystem by AGNPS model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2000, 16(5): 44-47. (in Chinese)
- [33] 范丽丽, 沈珍瑶, 刘瑞民, 等. 基于 SWAT 模型的大宁河流域非点源污染空间特性研究[J]. 水土保持通报, 2008, 28(4): 133-137.  
FAN Li-li, SHEN Zhen-yao, LIU Rui-min, et al. Spatial distribution of non-point source pollution in daninghe watershed based on SWAT model[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2008, 28(4): 133-137. (in Chinese)
- [34] 黄金良, 洪华生, 张璐平. 基于 GIS 和模型的流域非点源污染控制区划[J]. 环境科学研究, 2006, 19(4): 119-124.  
HUANG Jin-liang, HONG Hua-sheng, ZHANG Luo-ping. Control divisions of agricultural non-point source pollution at watershed scale based on GIS and models[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2006, 19(4): 119-124. (in Chinese)
- [35] 雷能忠, 黄大鹏. 基于 GIS 的农业面源污染风险评估[J]. 中国农学通报, 2007, 23(12): 381-385.  
LEI Neng-zhong, HUANG Da-peng. Research on risk assessment of agricultural non-point source pollution with GIS[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2007, 23(12): 381-385. (in Chinese)
- [36] Tim U S, Mostaghimi S, Shanholtz V O. Identification of critical non-point pollution source areas using geographic information systems and water quality modeling[J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 1992, 28(5): 877-887.
- [37] 王光谦, 左海凤, 魏加华, 等. 南水北调中线工程水源区老鹳河流域农业非点源污染关键源区识别[J]. 地学前缘, 2010, 17(6): 13-20.  
WANG Guang-qian, ZUO Hai-feng, WEI Jia-hua, et al. Identifying critical source areas for agricultural non-point source pollution in Laoguanhe watershed of middle route of the south-to-north water diversion Project[J]. *Earth Science Frontiers*, 2010, 17(6): 13-20. (in Chinese)
- [38] 周慧平, 高超, 朱晓东. 关键源区识别: 农业非点源污染控制方法[J]. 生态学报, 2005, 25(12): 3368-3374.  
ZHOU Hui-ping, GAO Chao, ZHU Xiao-dong. Identification of critical source areas: an efficient way for agricultural non-point source pollution control[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(12): 3368-3374. (in Chinese)
- [39] Cecchi G, Munafò, Baiocoff, et al. Estimating river pollution from diffuse sources in the Viterbo province using the potential non-point pollution index[J]. *Ann Ist Super Sanita*, 2007, 43(3): 295-301.
- [40] 张淑荣, 陈利顶, 傅伯杰. 农业区非点源污染敏感性评价的一种方法[J]. 水土保持学报, 2001, 15(2): 56-59.  
ZHANG Shu-rong, CHEN Li-ding, FU Bo-jie. Approach for agricultural non-point source pollution sensibility assessment[J]. *Journal of Soil Water Conservation*, 2001, 15(2): 56-59. (in Chinese)
- [41] 陈凯, 黄蕾, 方强. 遗传神经网络在累积性环境风险评价中的应用[J]. 环境监控与预警, 2012, 4(2): 1-6.  
CHEN Kai, HUANG Lei, FANG Qiang. Application of accumulative environmental risks assessment based on genetic neural network model[J]. *Environmental Monitoring and Forewarning*, 2012, 4(2): 1-6. (in Chinese)
- [42] 杨威, 卢文喜, 李平, 等. 因子分析法在伊通河水质评价中的应用[J]. 水土保持研究, 2007, 14(1): 113-115.  
YANG Wei, LU Wen-xi, LI Ping, et al. Application of factor analysis method to the water quality evaluation of Yitong river[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2007, 14(1): 113-115. (in Chinese)
- [43] 张蕾, 卢文喜, 安永磊, 等. 基于多元统计分析的石头口门水库汇水流域水质综合评价[J]. 中国环境监测, 2012, 28(2): 119-123.  
ZHANG Lei, LU Wen-xi, AN Yong-lei, et al. Multivariate statistical

- techniques for the evaluation of water quality of Shitoukoumen reservoir catchment[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2012, 28(2): 119-123. (in Chinese)
- [44] 林绍霞, 林昌虎, 何腾兵, 等. 灰色关联度法在农业非点源污染土壤影响因子分析中的应用[J]. 水土保持通报, 2010, 30(4): 171-174.  
LIN Shao-xia, LIN Chang-hu, HE Teng-bing, et al. Application of grey relation grade in the analysis of soil factors influencing agricultural non-point source pollution [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2010, 30(4): 171-174. (in Chinese)
- [45] 陈飞星, 张增杰. 生态农业评价综述[J]. 中国生态农业学报, 2001, 9(4): 104-106.  
CHEN Fei-xing, ZHANG Zeng-jie. Review on eco-agricultural assessment[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2001, 9(4): 104-106. (in Chinese)
- [46] 李潇瀚, 王 瑞, 卞建民, 等. 基于 GIS 的伊通河流域农业非点源污染风险评估[J]. 中国水土保持, 2012(1): 33-35.  
LI Xiao-han, WANG Rui, BIAN Jian-min, et al. GIS-based risk assessment of agricultural non-point source pollution of Yitong river basin[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2012(1): 33-35. (in Chinese)
- [47] Lemunyon J L, Gilbert R G. The concept and need for a phosphorus assessment-tool[J]. *Journal of Production Agriculture*, 1993, 6(4): 483-486.
- [48] 高 超, 张桃林. 农业非点源磷污染对水体富营养化的影响及对策[J]. 湖泊科学, 1999, 11(4): 369-375.  
GAO Chao, ZHANG Tao-lin. Contribution of agricultural phosphorus losses to eutrophication of waters and its controlling strategies[J]. *Journal of Lake Science*, 1999, 11(4): 369-375. (in Chinese)
- [49] 李 娜, 郭怀成. 农业非点源磷流失潜在风险评价——磷指数法研究进展[J]. 地理科学进展, 2010, 29(11): 1360-1367.  
LI Na, GUO Huai-cheng. Review of risk assessment of phosphorus loss potential from agricultural non-point source: Phosphorus index [J]. *Progress in Geography*, 2010, 29(11): 1360-1367. (in Chinese)
- [50] 张淑荣, 陈利顶, 傅伯杰, 等. 农业区非点源污染潜在危险性评价——以于桥水库流域磷流失为例[J]. 第四纪研究, 2003, 23(3): 262-269.  
ZHANG Shu-rong, CHEN Li-ding, FU Bo-jie, et al. The risk assessment of nonpoint pollution of phosphorus from agricultural lands: A case study of yuqiao reservoir watershed[J]. *Quaternary Sciences*, 2003, 23(3): 262-269. (in Chinese)
- [51] 宋月君, 吴胜军, 杨 洁, 等. 基于 GIS 技术的农用地非点源磷污染危险性评价[J]. 测绘科学, 2009, 34(3): 164-166.  
SONG Yue-jun, WU Sheng-jun, YANG Jie, et al. The risk appraisal to the non-point source phosphorus pollution of agricultural land based on the GIS technology[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2009, 34(3): 164-166. (in Chinese)
- [52] 周慧平, 高 超. 巢湖流域非点源磷流失关键源区识别[J]. 环境科学, 2008, 29(10): 2696-2702.  
ZHOU Hui-ping, GAO Chao. Identifying critical source areas for non-point phosphorus loss in Chaohu watershed[J]. *Environmental Science*, 2008, 29(10): 2696-2702. (in Chinese)
- [53] 李振炜, 于兴修, 姚孝友, 等. 农业非点源污染关键源区识别方法研究进展[J]. 生态学杂志, 2011, 30(12): 2907-2914.  
LI Zhen-wei, YU Xing-xiu, YAO Xiao-you, et al. Identification approaches of critical source area of agricultural non-point source pollution: A review[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(12): 2907-2914. (in Chinese)
- [54] Guo H Y, Wang X R, Zhu J G. Quantification and index of non-point source pollution in Taihu Lake region with GIS[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2004, 26(2-3): 147-156.
- [55] 周徐海, 王 宁, 郭红岩, 等. 农业非点源污染潜力指数系统 (APPI) 在太湖典型区域的应用[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(4): 1029-1034.  
ZHOU Xu-hai, WANG Ning, GUO Hong-yan, et al. Preliminary application of agricultural non-point source pollution potential index in typical area of Taihu lake[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(4): 1029-1034. (in Chinese)
- [56] 孟 丹, 王 宁, 刘振峰. 石头口门水库双阳河流域农业非点源污染发生潜力评价[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(4): 1421-1426.  
MENG Dan, WANG Ning, LIU Zhen-feng. Evaluation on agricultural non-point source pollution potential in shuangyang river catchment of Shitoukoumen reservoir[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(4): 1421-1426. (in Chinese)
- [57] 曹昕鑫, 刘丛丛, 陈 航, 等. 基于农业非点源污染潜力指数系统的沙颍河流域非点源污染潜力评价和特征分析[J]. 生态与农村环境学报, 2013, 29(2): 170-175.  
CAO Xin-xin, LIU Cong-cong, CHEN Hang, et al. Characterization and evaluation of agricultural non-point source pollution potential in Shaying river catchment based on APPI[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2013, 29(2): 170-175. (in Chinese)
- [58] 赵 倩, 马 建, 问青春, 等. 浑河上游大苏河乡农业非点源污染负荷及现状评价[J]. 生态与农村环境学报, 2010, 26(2): 126-131.  
ZHAO Qian, MA Jian, WEN Qing-chun, et al. Load and status quo of agricultural non-point source pollution in dasuhe township on the upper streams of Hun river[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2010, 26(2): 126-131. (in Chinese)
- [59] 叶 飞, 卞新民, 胡大伟, 等. 江苏省农业非点源污染地区差异评价与控制对策[J]. 水资源保护, 2006, 22(6): 86-88.  
YE Fei, BIAN Xin-min, HU Da-wei, et al. Regional difference and countermeasures of agricultural non-point source pollution in Jiangsu Province [J]. *Water Resources Protection*, 2006, 22(6): 86-88. (in Chinese)
- [60] 高新昊, 江丽华, 李晓林, 等. “等标污染法”在山东省水环境农业非点源污染源评价中的应用[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(5): 1066-1070.  
GAO Xin-hao, JIANG Li-hua, LI Xiao-lin, et al. Using equivalent

- standard pollution method to evaluate impacts of agricultural non-point pollution resources on water environment in Shandong Province [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18 (5): 1066-1070. (in Chinese)
- [61] 孟晓路, 陈海山. 等标污染负荷法在太子河流域风险源识别中的应用[J]. 农业科技与装备, 2012(4): 40-44.  
MENG Xiao-lu, CHEN Hai-shan. Application of equal standard pollution loading method in the identification of risk source of Taizi river basin[J]. *Agricultural Science & Technology and Equipment*, 2012(4): 40-44. (in Chinese)
- [62] 方志发, 王飞儿, 周根娣. BMPs 在千岛湖流域农业非点源污染控制中的应用[J]. 农业环境与发展, 2009, 26(1): 69-72.  
FANG Zhi-fa, WANG Fei-er, ZHOU Gen-di. The application of best management practices on the agricultural non-point source pollution control in the Qiandao lake [J]. *Agro-Environment & Development*, 2009, 26(1): 69-72. (in Chinese)
- [63] 冯永忠, 谢晓军, 杨引禄, 等. 基于 BMPs 的宁夏黄河灌区农业非点源污染控制方案[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2011, 39(7): 171-176.  
FENG Yong-zhong, XIE Xiao-jun, YANG Yin-lu, et al. Project for controlling non-point source pollution in Ningxia Yellow River irrigation region based on Best Management Practices[J]. *Journal of Northwest A & F University: Natural Science Edition*, 2011, 39(7): 171-176. (in Chinese)
- [64] 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.  
YUAN Shao-feng, LÜ Jun, YU Jing-yan. Methods of prevention and cure to ANPSP caused by nitrogen and phosphorous[J]. *Journal of Soil Water Conservation*, 2004, 18(1): 122-125. (in Chinese)
- [65] 刘孝利, 陈求稳, 曾昭霞, 等. 典型黑土区非点源污染控制途径研究[J]. 中国水土保持, 2009(5): 31-33.  
LIU Xiao-li, CHEN Qiu-wen, ZENG Zhao-xia, et al. Control ways of non-point pollution of typical Chernozem[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2009(5): 31-33. (in Chinese)
- [66] 姜翠玲, 崔广柏. 湿地对农业非点源污染的去除效应[J]. 农业环境保护, 2002, 21(5): 471-473, 476.  
JIANG Cui-ling, CUI Guang-bo. Effectiveness of wetlands in removal of non-point pollutants from agricultural source[J]. *Agro-environmental Protection*, 2002, 21(5): 471-473, 476. (in Chinese)
- [67] 罗纨, 贾忠华, 方树星, 等. 灌区稻田控制排水对排水量及盐分影响的试验研究[J]. 水利学报, 2006, 37(5): 608-618.  
LUO Wan, JIA Zhong-hua, FANG Shu-xing, et al. Effect of drainage control on salt and water balance in rice field[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2006, 37(5): 608-618. (in Chinese)
- [68] 李强坤, 李怀恩. 黄河流域非点源污染研究初步框架[J]. 人民黄河, 2010, 32(12): 131-132, 135.  
LI Qiang-kun, LI Huai-en. Non-point source pollution preliminary framework in Yellow river basin[J]. *Yellow River*, 2010, 32(12): 131-132, 135. (in Chinese)
- [69] 戴照福, 王继增, 程炯. 广东省土壤磷素流失和控制对策[J]. 水土保持通报, 2007, 27(5): 155-158.  
DAI Zhao-fu, WANG Ji-zeng, CHENG Jiong. Soil phosphorus loss and its control measures in guangdong province[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2007, 27(5): 155-158. (in Chinese)
- [70] 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.  
YANG Lin-zhang, SHI Wei-ming, XUE Li-hong, et al. Reduce-reuse-restore technology for the controlling the agricultural non-point source pollution in countryside in China: General countermeasures and technologies[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(1): 1-8. (in Chinese)
- [71] 薛利红, 杨林章, 施卫明, 等. 农村面源污染治理的“4R”理论与工程实践: 源头减量技术[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(5): 881-888.  
XUE Li-hong, YANG Lin-zhang, SHI Wei-ming, et al. Reduce-reuse-restore technology for controlling the agricultural non-point pollution in countryside in China: Source reduction technology[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(5): 881-888. (in Chinese)
- [72] 郭鸿鹏, 朱静雅, 杨印生. 农业非点源污染防治技术的研究现状及进展[J]. 农业工程学报, 2008, 24(4): 290-295.  
GUO Hong-peng, ZHU Jing-ya, YANG Yin-sheng. Research status and development of technologies for controlling agricultural non-point source pollution[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24(4): 290-295. (in Chinese)
- [73] 段亮, 段增强, 常江. 地表管理与施肥方式对太湖流域旱地氮素流失的影响[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(3): 1672-2043.  
DUAN Liang, DUAN Zeng-qiang, CHANG Jiang. Effect of surface management and fertilization mode on nitrogen runoff from upland in Taihu lake region[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(3): 1672-2043. (in Chinese)
- [74] 高龙华, 张行南. RS 和 GIS 支持下农业非点源污染模型研究评述[J]. 中国水土保持, 2005(11): 36-39.  
GAO Long-hua, ZHANG Xing-nan. Study and comment on agricultural non-point pollution model with the support of RS and GIS[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2005(11): 36-39. (in Chinese)
- [75] 廖谦, 沈珍瑶. 农业非点源污染模拟不确定性研究进展[J]. 生态学杂志, 2011, 30(7): 1542-1550.  
LIAO Qian, SHEN Zhen-yao. Uncertainties in agricultural non-point source pollution simulation: Research progress[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(7): 1542-1550. (in Chinese)
- [76] 刘纪辉, 赖格英. 农业非点源污染研究进展[J]. 水资源与水工程学报, 2007, 18(1): 29-32.  
LIU Ji-hui, LAI Ge-ying. Research progress of the agricultural non-point source pollution[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2007, 18(1): 29-32. (in Chinese)