

平原灌区农田养分非点源污染研究进展

郝韶楠^{1,2}, 李叙勇^{1*}, 杜新忠^{1,2}, 张汪寿^{1,2}

1. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085; 2. 中国科学院大学, 北京 100049

摘要:平原灌区作为农业规模化生产的基地,在农业乃至经济社会发展中起到了重要作用,但是随着农业的发展,平原灌区农田非点源污染问题日益严重,研究平原灌区农田非点源污染具有重要意义。文章以平原灌区污染物随水文循环迁移过程为基础对平原灌区养分非点源污染研究进行综述。(1)平原灌区农田非点源污染的主要来源是过量的化肥施用,农药和农膜,秸秆等农作物的降解,牲畜粪便,污水灌溉,灌溉引起的盐渍化以及大气的干湿沉降等;产生及影响因素主要有土壤的理化性质,水分的输入方式和人为管理措施等。(2)降雨径流及灌溉排水条件下污染物在多级渠系中的迁移规律和灌区地表水与地下水的交互耦合作用决定了平原灌区农田非点源污染的输送途径与特征。(3)在监测资料比较缺乏时,采用输出系数法进行负荷估算;在监测资料充足情况下,采用针对灌区特殊的水文特征而改进的经典水文模型对平原灌区农田非点源污染的负荷进行估算。(4)新型肥料、配方施肥、合理的耕作措施及生态沟渠的设置有利于平原灌区农田非点源污染的控制,TMDL (Total Maximum Daily Loads) 为平原灌区农田非点源污染控制提供可靠的依据。针对平原灌区非点源污染研究现状,提出了中国开展平原灌区农田非点源污染研究的重点,包括养分污染物在多级沟渠中的迁移,灌区地表与地下水水量水质耦合模型的建立,分级控制单元与TMDL的制定以及多模型结合模拟等,可望在控制农业非点源污染方面起到指导作用。

关键词:平原灌区;农田;非点源

DOI: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2015.07.024

中图分类号: X50

文献标志码: A

文章编号: 1674-5906 (2015) 07-1235-10

引用格式: 郝韶楠, 李叙勇, 杜新忠, 张汪寿. 平原灌区农田养分非点源污染研究进展[J]. 生态环境学报, 2015, 24(7): 1235-1244.

HAO Shaonan, LI Xuyong, DU Xinzhong, ZHANG Wangshou. A review on Non-point Source Nutrient Pollution of Irrigation Plain Areas [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2015, 24(7): 1235-1244.

非点源污染(Non-point source pollution, NPSP)与点源(Point source pollution, PSP)污染相对应,是指溶解态或固体污染物从非特定的地点,在降水和径流冲刷作用下,通过降水、径流、淋溶、壤中流以及地下水回流等过程而汇入受纳水体(如河流、湖泊、水库、海湾等),引起的水体污染。非点源污染的主要形式包括土壤侵蚀、农田化肥、农药的使用、农田污水灌溉、城镇地表径流污染、矿区和建筑工地地表径流污染、林区地表径流污染、大气干沉降与湿沉降(贺缠生等,1998)。随着点源污染逐步受到控制,非点源污染逐渐成为研究的重点,农田非点源成为非点源污染的主要污染源(Carpenter et al., 1998; 崔键等, 2006; 李强坤等, 2010)。

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%。农田的污染物质已经成为水环境污染的主要来源。以东北松花江为

例,松花江流域是我国重要的商品粮生产基地,农业生产和农村生活是最主要的水污染源,对松辽流域水环境污染的影响相当大。我国农药化肥利用率只有30%左右,部分未利用的化肥随着农田退水进入江河,最终导致水体污染。据中国工程院重大咨询项目调查数据显示,2003年第二松花江流域农牧业非点源污染导致的COD排放量已达13万t,占流域排放总负荷的41%,同时农药的使用量已经超过0.46万t,且呈现逐年上升的趋势。《中国重点流域非点源污染负荷估算研究》结果表明,松花江流域非点源污染氮、磷排放主要来自农用化肥和畜禽养殖业,其中来自农用化肥的氮、磷排放占非点源排氮量、排磷量的58%和55%。由此可见,控制灌区农田非点源污染占有十分重要的地位。本文对平原灌区农田养分非点源污染产生的来源、影响因素、输送、负荷估算及控制的相关研究进行总结,以为保护平原灌区农田生态环境提供科学依据。

基金项目: 中国科学院重点部署项目课题(KZZD-EW-10-02); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07203003; 2012ZX07029002)

作者简介: 郝韶楠(1986年生),男,博士研究生,主要从事非点源污染及水污染负荷优化分配。E-mail: shaonan@mail.bnu.edu.cn

*通信作者: 李叙勇(1965年生),男,研究方向为流域水环境。E-mail: xyli@rcees.ac.cn

收稿日期: 2015-04-07

1 平原灌区农田非点源污染的来源、产生及其影响因素

1.1 平原灌区农田非点源污染的来源

平原灌区农田污染物的主要来源是过量的化肥施用, 农药和农膜, 秸秆等农作物的降解, 牲畜粪便, 污水灌溉(陆建红, 2012), 灌溉引起的盐渍化以及大气的干湿沉降等。过量施肥引起的水体富营养化导致水中动物赖以生存的溶解氧降低, 进而影响水中生物; 过量氮素污染水体可以直接引起人体健康疾病, 而过量磷素对健康的影响则是间接的, 它先对水体进行富营养化, 进而对人类健康造成威胁(Correll, 1999); 农药的施用是有毒污染物的主要形式, 有毒污染物, 主要是指重金属, 杀虫剂和有机化合物等, 许多有毒的化合物由于降解系数比较小, 进而在食物链中形成富集效应, 对人类和环境造成影响; 农业垃圾, 例如塑料制品和泡沫等, 会对水体造成危害, 在农地系统中, 用于覆盖地表的农膜则是造成水体污染的主要垃圾形式; 大气的干湿沉降是指大气中的粉尘、烟尘及有毒、有害物质等直接降落到水面或随同降雨或降雪而落到水体表面, 从而造成水环境的非点源污染。

1.2 平原灌区农田污染的产生及其影响因素

农田生态系统中, 降水、地表水、土壤水和地下水的相互交替、转化的过程是最基本的水文过程(沈彦俊等, 2011), 在灌区农田中, 需将灌溉因素考虑进去。对农田水分循环与氮磷产出过程造成影响的主要有土壤的理化性质, 水分的输入方式和人为管理措施等。

1.2.1 土壤性质的影响

氮磷输出负荷不仅受到土壤氮磷元素的含量、含水量、机械组成等影响, 且施肥量超过农田的需肥量时, 化肥的过量施用是非点源污染产生的重要因素。灌区土壤作为基质部分, 在农田水分循环中起到调节和分配水量的作用, 其理化性质与水文循环影响下的平原灌区农田氮磷的输出负荷(程艳等, 2009)存在一定的相互关系。Withers et al.(2002)通过研究发现农田氮流失量与土壤矿物氮浓度之间存在明显的正相关关系。Andraski et al.(2003)研究发现土壤磷元素的含量对于可溶性磷盐的输出是一个非常有效的指示指标, Davis et al.(2005)通过进一步的研究发现不同机械组成的土壤类型具有不同的土壤磷临界值, 但是土壤氮磷值并不是衡量土壤氮磷流失潜力的唯一指标; 欧阳威等通过主成分分析方法在农田区对土壤的速效磷、全磷、全氮、全钾、铜、锌、镉的含量进行分析, 选定全磷和锌作为表层土壤磷流失潜力的指示指标, 选定铜和镉作为亚表层土壤氮磷流失潜力的指示指标

(Ouyang et al., 2012), 土壤流失潜力还与气候、地形和农业活动相关(Sharpley et al., 1996)。土壤磷素输出不仅与磷元素的含量相关, 还与土壤的前期含水量, 有机质等密切相关。Torbert et al.(1999)通过对粘性土壤干(350 g·kg⁻¹)湿(500 g·kg⁻¹)两种状况的对比研究发现, 土壤含水量高的土壤具有较高的流失潜力, 王晓燕(2011)通过研究发现了相似的结论。Bundy et al.(2001)通过研究发现施肥量超过了农田的需肥量, 化肥的过量施用是产生非点源污染的重要源头。

1.2.2 水分输入方式的影响

灌区的水分输入分为自然降雨与人为灌溉, 其中人为灌溉分为漫灌、喷灌等方式。降雨径流中氮磷营养物质的非点源排放被认为是造成水体富营养化的主要原因(Han et al., 2010)。降雨量(Sharpley et al., 2008)、降雨强度是影响农田污染物输出的最主要因素之一, 分为溅蚀和冲蚀两个阶段, 降雨量和降雨强度决定了溅蚀的动能大小和产流的大小且与农田污染物的输出成较好的线性关系, 但是灌区稻田表面水层保护田面不受雨滴打击, 减弱了降雨对土壤表层的溅蚀作用(曹志洪等, 2005)。梁新强等(2005)通过在天然降雨条件下对水稻田氮磷的输出进行研究发现, 降雨径流中总氮、总磷的流失浓度随着降雨量和施肥量的增加而增大; 可溶性氮是天然径流中流失氮的主要形式, 磷流失以颗粒态为主; 降雨和施肥量是影响氮磷素输出的主要因子。一般情况下, 在单位时间内降雨量越大, 农田的氮磷输出就越高。由于河流灌溉和地下水灌溉的引入, 不仅改变了灌区下垫面的自然状态, 也影响了区域的径流、蒸发等水平衡要素的计算及相互间的转化关系(王康, 2012), 与旱作农田降雨径流中的污染物流失情况有所不同(黄满湘等, 2001)。

与降雨径流不同的是灌溉改变了下垫面的性质从而减弱了雨滴的溅蚀作用, 而不同的灌溉方式对氮磷的产生有不同的影响。Spalding et al.(2001)研究发现由漫灌改成喷灌之后, 氮的淋失会大大地减少, 但是产量的减少量并不大。曾阿妍等(2008)通过对内蒙古农业灌区引黄灌溉的2次主要大规模灌溉(夏浇、秋浇)的跟踪监测, 研究了农业灌区的氮磷流失情况。分析了2次灌溉期的各引水渠和排水渠中总氮(TN)、氨氮(NH₄⁺-N)、硝氮(NO₃⁻-N)、总磷(TP)、溶解性无机磷(DIP)、溶解性有机磷(DOP)、颗粒磷(PP)的变化情况。研究表明: 夏浇时, 由于植物吸收、灌水量小等因素, 基本不产生污染。而秋浇期间, 由于灌水量大、土地裸露成为非点源污染产生的主要时期, 杜军等

(2011) 通过河套灌区乌拉特灌域的不同灌期农田氮素迁移研究发现, 秋浇期河套灌区土壤中的硝态氮最易发生淋洗, 且是灌区产生农业面源污染最严重的时期。

灌区对氮磷非点源输出产生重要影响的是对下垫面覆水性质的改变, 农田上覆水减轻了降雨的溅蚀作用, 从而减少了氮磷的输出; 在灌溉水量超过农田需水量及土地裸露的情况下, 易产生非点源污染; 喷灌可以极大的减少非点源污染的产生, 但是对作物产量的影响较小。因此, 在灌区采用“测土施肥”及喷灌等较为先进的灌溉方式可以极大的减少非点源污染的产生。

1.2.3 作物类型的影响

作物对农田氮磷产生的影响主要通过不同的叶面积指数与影响降雨过程, 作物生长时期不同的吸收能力以及不同的根系深度对淋溶进行影响。马东等通过在崂山水库流域建立了种植 5 种代表性作物玉米、大豆、花生、红薯和黄瓜的径流小区在大雨或暴雨产流中溶解态氮磷浓度进行了定位观测, 结果显示, 施肥条件和作物类型是造成氨氮、硝氮等水溶性氮的事件平均浓度 (event mean concentrations, EMCs) 差异的主要原因; 氮磷迁移量与次降雨量、小时最大雨强呈现显著正相关 (马东等, 2012), 但其没有考虑到相同叶面积指数下, 植被分布对污染物输出的影响。Liang et al. (2004) 等通过人工降雨方法对西笱溪 5 种不同的土地利用的氮磷输出进行研究, 在不同的植被条件下, 地表径流的氮磷输出存在显著的差异。张福珠等 (1984) 通过在水稻幼苗期和旺盛生长期等量施氮, 发现前者壤中流氮含量大大高于后者, 这是由于根系不同发育程度及其对肥料的吸收能力不同造成的。“淋失”通常以根底层为边界定义的。Thorup-Kristensen et al. (2003) 等通过研究发现, 当氮素超过土壤的吸附能力并超过根系达到的最深深度时, 营养元素将不再被作物吸收利用而形成淋溶。

作物通过叶面积指数对降雨强度的影响污染物的输出; 不同作物对肥料吸收能力的不同、同一作物不同生长时期对肥料吸收能力的变化及不同作物根系发育的不同进而对灌区农田非点源的输出造成影响。

1.2.4 农田管理措施的影响

不同的农田管理措施对农田污染物的输出有重要的影响。段永惠等 (2005) 通过实地调查与模拟实验相结合的方法, 研究了不同肥料品种、不同施肥强度、不同施肥时间与方式对土壤地表径流 N、P 流失的影响。结果表明, 农田径流 N、P 的流失

量与施肥量有一定的正相关性, 就施肥方式而言, 深施或穴施比表施可显著降低径流中 N、P 的流失量。李强坤等 (2011) 在青铜峡灌区分析了不同灌水量、施肥量和施肥方案下水稻田的田间产污强度。结果表明, 灌水量与田间产污强度呈指数增长关系, 施肥量与田间产污强度呈正相关; 其次, 即使在施肥量相同的情况下, 不同的施肥方案下, 田间产污强度也有较大差别。Munodawafa (2007) 通过研究发现保水保肥措施可以极大的减少地表水体的污染。辛艳等 (2012) 选取大豆作为种植作物, 在天然降雨条件下, 采用顺垄、横垄、免耕、免耕秸秆覆盖等耕作模式进行组合试验, 结果表明: 传统耕作顺垄+平翻模式下, 氮、磷流失浓度最高; 免耕和免耕秸秆覆盖在顺垄布置下与传统平翻耕作相比, 总氮总磷的流失量减少; 与顺垄耕作组合模式相比, 横垄耕作组合有效地减小径流中各种养分的流失浓度, 减少总氮流失 35%, 减少总磷流失 35.4%。Lenzi et al. (1997) 通过比较不同的犁形的翻耕方式发现, 在雨滴的溅蚀作用下, 翻耕方式的土壤迁移量要显著高于耩耕和免耕作用。在旱地的条件下, 李友军等通过研究发现深松覆盖、免耕覆盖能提高土壤蓄水量, 土壤有机质和氮、磷、钾含量明显高于传统耕作, 特别是对上层土壤全氮及碱解氮和深层土壤的有效磷及速效钾的影响更为明显, 并能有效地减少地表产流次数和径流量, 减少土壤养分的流失, 提高水分利用效率和养分的生产效率, 显著提高小麦产量。

施肥方式、农田翻耕方式可以极大的影响非点源污染的输出, 因此, 采用因地制宜的农田管理措施对非点源污染的控制有极重要的意义。

2 平原灌区农田非点源污染的输送途径与特征

灌区水循环作为灌区农业非点源污染物的传输介质与载体, 对灌区水循环机理的研究对灌区非点源污染的研究具有重要的意义。平原灌区非点源污染既具有非点源污染的一般特征, 也有灌区输出的一般特征。平原特征主要指地貌特征, 平原特征导致灌区在分级分类控制单元的划分上存在一定的难度。灌区特征主要指人为排灌和相互交错的多级渠系。在平原灌区水循环系统中, 灌溉使得下垫面性质由裸地变为水田, 减弱了雨滴的溅蚀作用; 其次由于多年的连续灌溉, 造成地下水位较低, 地表水与地下水交互作用明显, 地表的污染物容易通过土壤渗漏到地下水, 从而对地下水造成污染; 再次通过地表水和地下水多水源灌溉的农田退水从农田通过多级渠系返回到河道中, 对河流造成污染, 其中多级渠系对污染物的削减作用是灌区非点

源污染的重点研究方向之一。因此农田在降雨径流及灌溉排水条件下污染物在多级渠系中的迁移规律和灌区地表水与地下水的交互耦合作用,平原灌区分级分类控制单元的划分与 TMDL 的制定成为平原灌区非点源污染中考虑的关键问题。

平原灌区农田污染物的迁移主要依附于水循环(如图 1)过程,研究灌区农田的水循环特征是灌区的农业非点源污染研究的基础,灌溉活动和天然水循环过程交织在一起,并相互影响(Ramireddygari et al., 2000; 秦大庸等, 2003)。灌区水循环运动影响着灌区营养物的运动主要通过 4 种形式:(1)农田地表径流(黄满湘等, 2001),主要指农田退水(张爱平等, 2008)以及降雨产流过程;(2)壤中流(陈玲等, 2012),主要指渗漏(包括田块面状垂直渗漏(罗良国等, 2000; 王云慧等, 2010; 祝惠等, 2010)、沟渠线状垂直渗漏以及田块到沟渠的水平渗漏(黄漪平等, 2001));(3)沟渠的运移(李强坤等, 2011);(4)地下水回流等方式进入受纳水体造成污染。本文主要对农田地表径流、沟渠的运移以及地下水回流这 3 个主要过程进行综述。

王康(2012)以内蒙古河套灌区为例,系统的总结了灌区水均衡计算理论与方法,灌区地下水资源量分析方法,灌区地下水模拟方法,并在水文循环的基础上对面源污染迁移、转化汇集机理及模拟方法,灌区水环境进行了研究。马军花等(2004)对冬小麦优化施肥与传统灌溉、优化施肥与优化灌溉两小区的土壤水分和氮素运移动态以及干物质产量进行模拟,并对两小区 165 cm 处硝态氮的模拟计算结果进行了对比。岳卫峰等(2004)根据义

长灌域土地利用的主要特点,建立了以土壤水为中心的非农区/农区水域水均衡模型,该模型可根据历年实测的引排水量等资料,对义长灌域的非农区、农区、水域以及农区与非农区、农区与水域之间的水分迁移转化进行分析,徐峰平等(2011)利用相似方法对绿洲的水均衡进行了相关研究。郝芳华等(2008)通过 HYDRUS 模型模拟了河套灌区不同灌溉时期(作物生长期和秋浇期)葵花根层(0~40 cm)土壤水的动态规律,结果表明,灌区葵花土壤的水含量在生长期呈下降趋势;在秋浇期呈上升趋势,土壤水渗漏动态与灌溉或降雨关系密切,生育期、秋浇期土壤水渗漏量分别与相应时期的灌水量显著相关。张万顺等(2005)根据水量平衡原理和营养物质质量守恒定律,考虑作物生长过程中农田水循环和氮、磷循环特征,建立农田灌溉退水水量水质模型,应用该模型对引江济汉工程东荆河灌区农田各水期灌溉退水的氮、磷浓度进行估算,建立了适用于研究农田灌溉退水问题的模型。

2.1 农田地表径流

地表径流作为农田非点源污染物迁移的重要形式,罗春燕(2008)通过研究发现,河道水总磷浓度大小顺序为畜禽养殖场>集约化农田>大田,沟渠水总磷浓度和沟渠底泥水溶性磷浓度与河道水总磷浓度一致,河道水总氮存量、沟渠 0~5 cm 底泥和 0~20 cm 土层土壤矿质氮存量与非汛期的差异均不大,而沟渠水总氮存量是非汛期的 1.7 倍。张继宗(2006)通过研究发现硝态氮和铵态氮是农田氮素流失的主要形态,在总氮中占 67%,硝态氮在总氮中所占比重远大于铵态氮,大 21%。农田耕层土壤(0~30 cm)氮素含量直接影响农田氮素流失

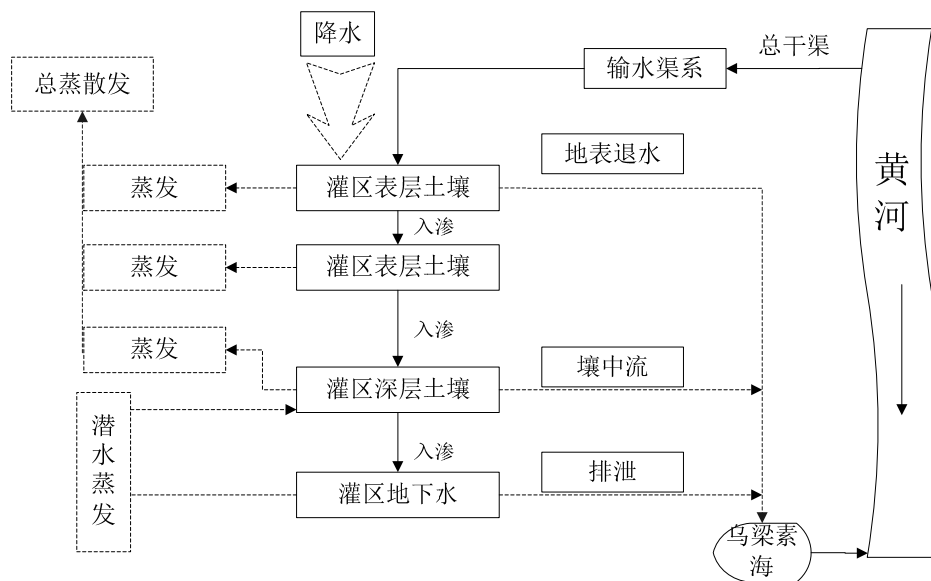


图 1 河套地区路面水循环路径 (郝芳华等, 2008)

Fig. 1 The groundwater cycle path in the Inner Mongolia agriculture irrigation area

的强度,也直接影响着农田旁沟渠表层底泥(0~5 cm)的氮素含量,在其它影响因素相同的前提下,农田耕层土壤(0~30 cm)全氮含量越高,农田氮素流失的强度就越高,产生高水溶性总氮浓度的次数就越多,农田耕层土壤(0~30 cm)速效氮含量越高,农田旁沟渠表层底泥(0~5 cm)速效氮含量就越高;而在磷的输出中以结合态为主要形态(许其功等,2007)。陈会等(2012)对前郭灌区模拟了灌区面源污染水质水量过程,分析了灌区农田面源污染形成机制,得出稻田地表退水主要影响水稻抽穗前的面源污染入河过程,而渗流排水则在抽穗后灌区排水水质中起主要作用。结果表明水稻灌区中地表排水和稻田渗漏排水对面源污染过程起主要作用。

2.2 沟渠运移

农田排水沟渠作为平原灌区农业的重要特征且其作为面源污染物尤其是营养性污染物汇入下游水体的通道(Needeman et al., 2007),沟渠的环境效应与生态功能也逐渐引起了人们的重视(陆海明等,2010;陆琦等,2007;张燕等,2012)。人工沟渠的修建加强了流域纵向水文的连通性,使整个流域对水文时间的响应更加的迅速,同时人工沟渠对污染物的输出负荷也一定的削弱作用(郗敏等,2005)。张喻芳等(1997)进行了排水条件下氮肥运移、转化规律的研究,在水流、氮素理论和数值模拟研究的基础上指出了排水条件下氮肥运移、转化规律。李强坤等(2010)通过对自由排水和控制排水进行对比发现,污染负荷的减少是排水量减少和污染物浓度降低共同作用的结果,其中排水量减少起主要作用,污染物浓度降低是次要因素。李强坤等(2010)提出农业非点源污染物在排水沟渠中的迁移转化是农业非点源污染控制和管理的环节。在简要分析农田排水沟渠生态结构和生态特征的基础上,归纳总结了排水沟渠中水生植物、微生物和基质底泥各组分的生态功能以及各组分同氮磷污染物间的相互作用机理。翟丽华等(2008)通过研究发现,沟渠系统中不同断面对氮、磷的截留转化作用相似。姜翠玲等(2005)通过对有机质和总氮在沟渠湿地底泥中的垂直和水平分布的研究表明,40 cm以下深度的芦苇(*Phragmites communis*)和茭草(*Zizania latifolia*)湿地底泥对有机质和总氮有显著的持留和累积作用;茭白对氮的吸收能力高,试验表明,利用茭白取代野生植物,既能取得很好的净化效果,又可被农民主动回收,解决植物的二次污染问题。席北斗等(2007)通过研究阐明pH对沟渠沉积物氮、磷截留效应的影响有助于掌握氮、磷在农田排水沟渠中的

迁移转化机理,从而对控制农业面源污染具有重要的意义。

2.3 平原灌区农田淋溶及地下水回流

张思聪等(1999)应用LEACHM模型对唐山的农业地区灌溉施肥条件下氮素在土壤中转化迁移进行了分析。郝芳华(2010)利用土柱法对灌区氮磷元素的迁移进行了模拟发现灌溉导致土壤中总磷向深层的显著迁移和流失。Riley et al.(2001)通过研究不同的施肥量和灌溉时间对淋溶的影响发现,多于农田需肥量的施肥和施肥后的灌溉,可造成氮磷的大量淋失。冯兆忠等(2005)通过对河套灌区浅层地下水氮浓度和地下水埋深的季节变化规律调查发现,河套灌区浅层地下水主要来源于农田下渗的土壤水。灌区农田土壤硝态氮淋溶损失比较严重,因此应采取节水灌溉、平衡施肥、使用缓释肥以及套种等科学的水肥管理措施加以控制。刘宏斌等(2006)对4种不同深度的地下水研究发现,饮用水深度最深(120~200 m),硝态氮污染相对最轻,超标率和严重超标率分别仅为13.8%和6.9%;而浅层地下水深度最浅(3~6 m),硝态氮污染最为严重,超标率和严重超标率分别高达80.5%和66.2%。由此可见地下水的埋藏越浅,淋失越容易。王铁军等(2006)在山东半岛中部通过实地调查和渗水、硝化、吸附、弥散等室内外试验,建立了莱西地区包气带水流-溶质运移模型,通过模拟发现漫灌是造成莱西地区地下水硝酸盐污染的一个主要原因。张倩等(2010)通过对现有污染物迁移的估算法方法的对比,提出了一种从农田面源污染的源和汇两方面,在调查计算施肥量、污水回灌量、径流流失量、作物吸收量等氮负荷的基础上,利用差减法估算农田面源污染对地下水污染负荷的影响的方法;同时定性地讨论了降雨量对地下水面源污染的影响。郝芳华等(2013)定量研究了区域土壤水和地下水的变化规律,揭示了灌区水平衡要素间的相互转换关系,指出灌区内的水循环过程为灌溉(降雨)-下渗-潜水蒸发,以灌溉水的垂向灌溉入渗和潜水蒸发蒸腾消耗为主。潜水蒸发量占灌区水分消耗的90%以上,灌溉水和降雨的渗漏仅能补充潜水消耗的一部分。灌区排水地表和地下排水,地表退水量和地下排水量分配比例差别较大。灌区多年平均灌溉水与降雨入渗补给不能满足灌区地下水的总消耗,灌区地下水埋深呈逐年下降趋势,而地下水的回流量仅占很少的比例。但是Bouraoui et al.(2008)通过SWAT来确定控制营养物质流失的主要过程和途径,结果表明,地下水是流域中总硝态氮负荷的主要贡献者。通过比较两者的研究区域发现,两者的地下水文情况不尽相同,

郝芳华等 (2013) 的研究区域是地势西高东低, 含水层颗粒细, 潜水径流不畅, 地下水无水平排泄出路的灌区, Bouraoui et al. (2008) 的研究区域是在丰富的地下水条件下, 据此在基于地下水回流量的污染物定量估算过程中, 研究区域水文地质条件是需要进行考虑的重要因素。

3 平原灌区农田氮磷输出负荷的监测与估算

非点源污染负荷估算主要通过两步来完成:

一, 农田氮磷输出负荷监测; 二, 负荷估算。非点源污染监测方案是非点源污染研究和控制的基础 (吴喜军等, 2013), 张丽等 (2013) 针对目前水质常规监测频率较低, 易造成低估了流域非点源污染物输出负荷低估的情况, 利用流域次降雨过程的连续水质水量同步监测资料, 研究分析次降雨过程与流域非点源磷素输出负荷之间的因果关系, 并建立次降雨总量与磷素输出负荷的定量相关关系; 单元特征是平原灌区非点源污染的一个重要特征 (赖斯芸等, 2004), 李强坤等 (2011) 根据目前多数灌区的灌排模式, 选择具有封闭排水域并受其他点源、非点源污染相对较少的干级排水沟控制区域作为研究单元。在对特定灌区进行监测时, 需要依据实际情况, 绘制水系简图, 划分沟渠等级, 确定汇水边界, 进而划分控制单元, 为下一步污染负荷的估算提供基础。

农业非点源污染负荷估算主要分为 3 类: 描述农业非点源污染预测的模型可大致分为 3 大类: 经验性模型、确定性 (机理) 模型和随机模型。按照模拟尺度的不同又可分为农田尺度模型 (CREAMS, GLEAMS, DRAINMOD-N, LEACHM, RZWQM, EPIC 等) 和流域尺度模型 (AGNPS, SWAT, BASINS 等) (王少丽等, 2007)。在平原灌区中, 对灌区污染负荷进行模型估算的研究并不多。CREAMS (Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems) 是由美国农业部提出的一个连续模拟模型, 它采用简单的水量平衡算法, 对非点源的水文、侵蚀和非点源污染物的迁移过程进行了综合 (Knisel, 1980), 王媛等 (2012) 通过应用美国通用土壤流失量方程 (USLE) 和美国农业非点源管理与化学径流模型 (CREAMS), 结合典型流域单元试验农田连续监测, 估算了吉林省西部地区盐碱地改水田新增非点源污染物 TN、TP 和总盐量年输出负荷。研究表明: 吉林省西部新增水田非点源污染物输出总负荷: 氮素 $4\,029.561\text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$ ($26.337\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$), 磷素 $1\,407.982\,5\text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$ ($9.242\,5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$), 总盐分 $851\,537.871\text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$ ($5\,565.607\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)。GLEAMS (Groundwater Loading Effects of Agricultural Management Systems) 为农业管理模型

CREAMS 的改进, 用于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, 以及田间地表径流和土壤流失动态。DRAINMOD-N 模型用于研究农田非饱和区一维垂向土壤水氮运移, 及饱和区二维垂向和侧向的土壤水氮运移。李强坤等 (2011) 应用 DRAINMOD 模型对黄河上游青铜峡灌区的 2008 年 5—9 月输出污染负荷进行估算, 估算结果为盐分 470 099 t、总磷 98.17 t、总氮 3 593 t、硝态氮 2 122 t、氨态氮 426 t。通过示例验证, 表明所建模型具有较好的模拟效果, 可进一步推广应用。LEACHM (Leaching Estimation and Chemistry Model) 用于研究农田非饱和区域水和溶质的运动、传输、植物吸收和化学反应。丁森 (2010) 将描述非饱和带水分与氮素运移的 LEACHM 模型与地下水模拟模型 MODFLOW 相结合, 建立了灌区水分与氮素在非饱和带与饱和带运移的联合模拟模型, 实现水分与氮素在非饱和带和饱和带运动的联合模拟。RZWQM (Root Zone Water Quality Model) 用于模拟农田土壤-作物-大气系统中主要的物理、化学和生物过程, 可以模拟地下水位、暗管排水以及作物系统管理措施对土壤水、营养物质和农药运移的影响效果。林雪松 (2009) 通过并用 RZWQM 模型对灌区单种玉米的生长和灌溉制度进行了模拟与评价, 得出节水灌溉的实施对减少河套灌区的硝态氮淋失和地下水污染具有积极的改善作用, 特别是由于秋浇水量的减少, 地下水位降低对农田硝态氮淋失引起的地下水污染具有非常明显的减轻作用。EPIC 用于评价土壤侵蚀对农业生产力的影响, 并且预测田间土壤水、营养物质、农药运移和他们的组合管理决策对土壤流失、水质和作物产量的影响。随着新技术的引进和监测手段的进步进一步健全, 将会有力的推动农田非点源模型的发展。李军等 (2004) 详细介绍了 EPIC 模型中描述农田降水、径流、渗透、蒸散、吸收和胁迫等水分运移和利用过程的主要数学方程, 可供农田水分动态管理与定量评价研究借鉴。

流域尺度经验模型结构明确, 非点源负荷的计算多依赖于小流域实验参数和经验参数; 与模型相比, 参数较少, 适用于农业非点源研究初期以及资料缺乏地区, 具有较强的实用性与准确性, 研究尺度和数据方面的限制较少 (黄国如等, 2011), 被广泛的应用于非点源污染负荷的估算, 但是经验模型没有考虑到污染物运移的路径与机理, 因此他们的进一步应用受到了较大的限制。杨淑静等 (2009) 应用增加灌溉因子的 Johnes 输出系数法对灌区的农业氮、磷流失进行估算。经计算, 改进模型计算得到的 2006 年宁夏灌区 TN 负荷为 19 395.33 t, TP

为 958.30 t。与传统模型计算结果相比,改进模型 TN 负荷的相对误差减小了 5%, TP 减小了 13%。李强坤等(2007)采用负荷贡献率的方法对青铜峡灌区的非点源污染负荷进行估算,并对估算结果与平均浓度法进行比较;其用类似方法对灌区年氮素流失总氮、硝氮和铵氮流失 3 种形态进行了估算(李强坤等,2008)。但是此方法没有考虑到在输移距离上的污染物的衰减过程。Ramireddygar et al. (2000)通过研究确定了污染负荷输出的损失系数,对输出系数法进行了改进,获得了较好的效果。

流域尺度机理模型往往结构复杂,参数众多,流域非点源污染模型的不确定性是单一模型模拟污染负荷面临的重大问题。按照驱动作用力分析,降雨径流与农田排水共同驱动水田氮素流失,降雨径流是磷流失主要驱动力,田间排水是总盐分流失主要驱动力。郑捷等(2011)针对平原型灌区人工自然复合的水文循环特点,基于 SWAT 模型构建了山前平原灌区分布式水文模型。考虑平原灌区灌溉渠道、排水沟和河道等人工干扰,在沟渠河网的提取方法、子流域与水文响应单元的划分以及作物耗水量计算模块等方面对 SWAT 模型进行了改进。以汾河灌区为例,对模型进行验证,证明改进后的 SWAT 模型适用于汾河灌区的水量平衡模拟。Dechmi et al. (2012)通过改进的 SWAT 模型对灌区进行了水量与水质的模拟取得了较好的结果。SWAT 模型可以对农业管理措施、翻耕、灌溉、施肥、杀虫剂和除草措施进行模拟,但是 SWAT 模型是基于 DEM 的水文模型,在平原灌区从 DEM 进行子流域的划分并不实际,需要进行人工辅助进行。

在平原灌区非点源污染的监测与估算过程中,选择哪种监测与估算方法是非常重要的,在监测数据较少的情况,采用输出系数法是比较合适的办法;在监测资料满足的模型的机理与数据需求的情况下,针对灌区特殊的水文特征对经典的模型进行改进并对灌区的非点源污染负荷进行估算。

4 平原灌区非点源污染控制措施与技术

从清洁生产技术的角度来讲,新型肥料的使用有助于农田产污的减少(廖义善等,2011);病虫害的防止采用新型低残留易降解农药或者农业防治技术、生物防治方法、化学防治方法、物理防治方法、有害生物综合治理技术以减轻传统农药对受纳水体的危害;通过配方施肥技术、增施有机肥、农田培肥等方式以及根据不同植物不同生长季的养分需求量进行对应施肥。

从耕作措施上来说,耕作越深越有利于土壤固肥作用的发挥从而导致稻田田面水中养分浓度降

低且翻耕土壤中微生物环境利于硝化反应进而使土壤吸收更多的氮素只有不易被土壤吸附的 NO_3^- -N 才得以迅速向田面水中释放(冯国禄等,2011);从灌溉方式上来讲,喷灌比沟灌、淹灌大大降低了径流的产生,由此降低农业非点源污染物的输出;从作物类型上来讲,实行适当的作物套种、轮作等;控制排水,增加水力停留时间,可以减少氮磷流失。

从生态工程技术的角度来讲,设置生态沟渠(Moore et al., 2011),提高沟渠的吸收降解速率;及时的沟渠清淤;增加排灌水的调解措施,改变沟渠水的水力特征;增加人工湿地(何元庆等,2012),提高非点源污染物的吸收与降解;毛战坡等(2004)通过研究发现,鲍家塘子流域中农田-渠道-水塘系统影响非点源污染物的产生、运移过程,同时多水塘系统截留降雨径流,减少流域非点源污染物的输出。

现行研究中非点源控制的最具影响的是美国国家环保局提出的最佳管理实践(Best Management Practices, BMPs),将其定义为“任何能够减少或预防水资源污染的方法、措施或操作程序,包括工程、非工程措施的操作维护程序”(李强坤,2010)。非工程性的 BMPs 主要以源头控制为基本策略,强调政策部门和公众的作用,政府根据法律规定制定各种行政法规和管理制度。通过污染源管理,农业用地管理,城市土地规划管理等措施控制或减少污染源。工程型 BMPs 以径流过程中的污染控制为主要途径,通过延长径流时间、减缓流速、向地下渗透、物理沉淀过滤和生物净化等技术去除污染物。

TMDL (Total Maximum Daily Loads) 作为非工程措施里的政策管理措施,为实施非点源污染总量控制提供了可靠的依据(USEPA, 1999),污染控制单元划分是 TMDL 实施的前提,平原灌区自然地理特征中的突出特点是地势平坦,汇水单元界限不明显,主要以田块为单元进行污染物的输出,马月华(2009)通过对赣抚平原灌区水环境容量研究,初步按照各个沟渠对应的流域控制面积对其灌区进行了控制单元的划分,但是相关的研究并不多,且控制单元划分是 TMDL 管理的基本问题,因此,平原灌区农田尺度的污染物输出和平原灌区污染控制流域分级分类控制单元的划分是研究中的关键问题。

5 展望

(1) 污染物在多级沟渠中的运移

沟渠作为连接“源”与“汇”的重要通道,多级沟渠的水文功能与生态效应逐渐得到重视,而多级沟渠对污染物的削减作用需要进一步的研究。

(2) 灌区地表与地下水水量水质耦合模型的建立

现有的模型并不完全适用于灌区的水文与污染物的传输特征,灌区水循环的研究作为非点源污染研究的基础,径流和泥沙的输出是污染物迁移的载体,具有举足轻重的作用,需要加强灌区水循环的研究,对模型进行改进以适合灌区的特点与需求。并且结合地下水模型模拟的少之又少,需要进一步的研究以填补该方面的空白。

(3) 分级控制单元划分与 TMDL 的制定

沟渠具有分级控制的功能,在污染物的削减指标制定的过程中,分级控制单元的划分显得尤为重要,但是相关研究并不多,在中国特殊的耕作制度下,建立适合中国平原灌区的 TMDL 削减标准是一项迫在眉睫的任务。

(4) 多模型结合模拟

王慧亮等(2011)通过多模型的组合研究发现,多模型在降低模型确定性方面有重要的作用。多模型结合的方法可成为灌区污染负荷估算的发展方向之一。

参考文献:

- ANDRASKI T W, BUNDY L G. 2003. Relationships between phosphorus levels in soil and in runoff from corn production systems [J]. *Journal of Environmental Quality*, 32(1): 310-316.
- BOURAOU F, GRIZZETTI B. 2008. An integrated modelling framework to estimate the fate of nutrients: Application to the Loire (France) [J]. *Ecological Modelling*, 212(3-4): 450-459.
- BUNDY L G, ANDRASKI T W, POWELL J M. 2001. Management practice effects on phosphorus losses in runoff in corn production systems [J]. *Journal of Environmental Quality*, 30(5): 1822-1828.
- CARPENTER S R, CARACO N F, CORRELL D L, et al. 1998. Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen [J]. *Ecological Applications*, 8(3): 559-568.
- CORRELL D L. 1999. Phosphorus: A rate limiting nutrient in surface waters [J]. *Poultry Science*, 78(5): 674-682.
- DAVIS R L, ZHANG H L, SCHRODER J L, et al. 2005. Soil characteristics and phosphorus level effect on phosphorus loss in runoff [J]. *Journal of Environmental Quality*, 34(5): 1640-1650.
- DECHMI F, BURGUETE J, SKHIRI A. 2012. SWAT application in intensive irrigation systems: Model modification, calibration and validation [J]. *Journal of Hydrology*, 470(23): 227-238.
- HAN J G, LI Z B, LI P, et al. 2010. Nitrogen and phosphorus concentrations in runoff from a purple soil in an agricultural watershed [J]. *Agricultural Water Management*, 97(5): 757-762.
- KNISEL W G. 1980. CREAMS: A field-scale model for chemicals, runoff and erosion from agricultural management systems [R]. USDA Conservation Research Report, No: 26.
- LENZI M A, DILUZIO M. 1997. Surface runoff, soil erosion and water quality modelling in the Alpone watershed using AGNPS integrated with a Geographic Information System [J]. *European Journal of Agronomy*, 6(1-2): 1-14.
- LIANG T, WANG H, KUNG H T, et al. 2004. Agriculture land-use effects on nutrient losses in West Tiaoxi watershed, China [J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 40(6): 1499-1510.
- MOORE M T, DENTON D L, COOPER C M, et al. 2011. Use of Vegetated Agricultural Drainage Ditches to Decrease Pesticide Transport from Tomato and Alfalfa Fields in California, USA [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 30(5): 1044-1049.
- MUNODAWAFA A. 2007. Assessing nutrient losses with soil erosion under different tillage systems and their implications on water quality [J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 32(15-18): 1135-1140.
- NEEDEMANN B A, KLEINMAN P J A, STROCK J S, et al. 2007. Improved management of agricultural drainage ditches for water quality protection: An overview [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 62(4): 171-178.
- OUYANG W, HUANG H B, HAO F H, et al. 2012. Evaluating spatial interaction of soil property with non-point source pollution at watershed scale: The phosphorus indicator in Northeast China [J]. *Science of the Total Environment*, 432(16): 412-421.
- RAMIREDDYGARI S R, SOPHOCLEOUS M A, KOELLIKER J K, et al. 2000. Development and application of a comprehensive simulation model to evaluate impacts of watershed structures and irrigation water use on streamflow and groundwater: the case of Wet Walnut Creek Watershed, Kansas, USA [J]. *Journal of Hydrology*, 236(3-4): 223-246.
- RILEY W J, ORTIZ-MONASTERIO I, MATSON P A. 2001. Nitrogen leaching and soil nitrate, nitrite, and ammonium levels under irrigated wheat in Northern Mexico [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 61(3): 223-236.
- SHARPLEY A N, KLEINMAN P J A, HEATHWAITE A L, et al. 2008. Phosphorus loss from an agricultural watershed as a function of storm size [J]. *Journal of Environmental Quality*, 37(2): 362-368.
- SHARPLEY A, DANIEL T C, SIMS J T, et al. 1996. Determining environmentally sound soil phosphorus levels [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 51(2): 160-166.
- SPALDING R F, WATTS D G, SCHEPERS J S, et al. 2001. Controlling nitrate leaching in irrigated agriculture [J]. *Journal of Environmental Quality*, 30(4): 1184-1194.
- THORUP-KRISTENSEN K, MAGID J, JENSEN L S. 2003. Catch crops and green manures as biological tools in nitrogen management in temperate zones [J]. *Advances in Agronomy*, 79(79): 227-302.
- TORBERT H A, POTTER K N, HOFFMAN D W, et al. 1999. Surface residue and soil moisture affect fertilizer loss in simulated runoff on a heavy clay soil [J]. *Agronomy Journal*, 91(4): 606-612.
- USEPA. 1999. Protocol for developing nutrient tmdls[S]. Washington.
- WITHERS P J A, LORD E I. 2002. Agricultural nutrient inputs to rivers and groundwaters in the UK: policy, environmental management and research needs[J]. *Science of the Total Environment*, 282-283(2): 9-24.
- 曹志洪, 林先贵, 杨林章, 等. 2005. 论“稻田圈”在保护城乡生态环境中的功能 I. 稻田土壤磷素径流迁移流失的特征[J]. *土壤学报*, 42(5): 97-102.
- 曾阿妍, 郝芳华, 张嘉勋, 等. 2008. 内蒙古农业灌区夏、秋浇的氮磷流失变化[J]. *环境科学学报*, 28(5): 838-844.
- 陈会, 王康, 周祖昊. 2012. 基于排水过程分析的水稻灌区农田面源污染模拟[J]. *农业工程学报*, 28(6): 112-119.
- 陈玲, 刘德富, 宋林旭, 等. 2012. 香溪河流域坡耕地人工降雨条件下土壤氮素流失特征[J]. *生态与农村环境学报*, 28(6): 616-621.
- 程艳, 毛战坡, 彭文启, 等. 2009. 农业流域营养盐流失的关键因素及其防治途径[J]. *环境科学与技术*, 32(1): 198-204.
- 崔健, 马友华, 赵艳萍, 等. 2006. 农业面源污染的特性及防治对策[J]. *中国农学通报*, 22(1): 335-340.
- 丁森. 2010. 位山灌区农田氮淋溶过程与地下水污染研究[D]. 北京: 清华大学: 94.
- 杜军, 杨培岭, 李云开, 等. 2011. 不同灌期对农田氮素迁移及面源污染产生的影响[J]. *农业工程学报*, 27(1): 66-74.

- 段永惠, 张乃明, 张玉娟. 2005. 施肥对农田氮磷污染物径流输出的影响研究[J]. 土壤, 37(1): 48-51.
- 冯国祿, 杨仁斌. 2011. 耕作模式和滞水时间对稻田中氮磷动态变化的影响研究[J]. 农业环境科学学报, 30(5): 917-924.
- 冯兆忠, 王效科, 冯宗炜. 2005. 河套灌区地下水氮污染状况[J]. 农村生态环境, 21(4): 74-76.
- 郝芳华, 欧阳威, 岳勇, 等. 2008. 内蒙古农业灌区水循环特征及对土壤水运移影响的分析[J]. 环境科学学报, 28(5): 825-831.
- 郝芳华, 孙铭泽, 张璇, 等. 2013. 河套灌区土壤水和地下水动态变化及水平衡研究[J]. 环境科学学报, 33(3): 771-779.
- 郝芳华. 2010. 北方平原农业非点源污染研究[M]. 北京: 科学出版社.
- 何元庆, 魏建兵, 胡远安, 等. 2012. 珠三角典型稻田生态沟渠型人工湿地的非点源污染削减功能[J]. 生态学杂志, 31(2): 394-398.
- 贺缠生, 傅伯杰, 陈利顶. 1998. 非点源污染的管理及控制[J]. 环境科学, 19(5): 88-92.
- 黄国如, 姚锡良, 胡海英. 2011. 农业非点源污染负荷核算方法研究[J]. 水电能源科学, 29(11): 28-32.
- 黄满湘, 章申, 唐以剑, 等. 2001. 模拟降雨条件下农田径流中氮的流失过程[J]. 土壤与环境, 10(1): 6-10.
- 黄漪平, 范成新, 濮培民. 2001. 太湖水环境及其污染控制[M]. 北京: 科学出版社.
- 姜翠玲, 范晓秋, 章亦兵. 2005. 非点源污染物在沟渠湿地中的累积和植物吸收净化[J]. 应用生态学报, 16(7): 1351-1354.
- 赖斯芸, 杜鹏飞, 陈吉宁. 2004. 基于单元分析的非点源污染调查评估方法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 44(9): 1184-1187.
- 李军, 邵明安, 张兴昌. 2004. EPIC模型中农田水分运移与利用的数学模拟[J]. 干旱地区农业研究, 22(2): 72-75.
- 李强坤. 2010. 青铜峡灌区农业非点源污染负荷及控制措施研究[D]. 西安: 西安理工大学: 140.
- 李强坤, 陈伟伟, 孙娟, 等. 2010. 青铜峡灌区氮磷运移特征试验研究[J]. 环境科学, 31(9): 2048-2055.
- 李强坤, 胡亚伟, 李怀恩. 2011. 农业非点源污染物在排水沟渠中的模拟与应用[J]. 环境科学, 32(5): 1273-1278.
- 李强坤, 胡亚伟, 孙娟, 等. 2011. 不同水肥条件下农业非点源田间产污强度[J]. 农业工程学报, 27(2): 96-102.
- 李强坤, 胡亚伟, 孙娟, 等. 2010. 控制排水条件下农业非点源污染物流失特征[J]. 农业工程学报, 26(14): 182-187.
- 李强坤, 胡亚伟, 孙娟. 2010. 农业非点源污染物在排水沟渠中的迁移转化研究进展[J]. 中国生态农业学报, 18(1): 210-214.
- 李强坤, 胡亚伟, 孙娟, 等. 2011. 基于“源”、“汇”过程的农业非点源污染模型构建及应用[J]. 中国生态农业学报, 19(6): 1424-1430.
- 李强坤, 李怀恩, 胡亚伟, 等. 2007. 基于单元分析的青铜峡灌区农业非点源污染估算[J]. 生态与农村环境学报, 23(4): 33-36.
- 李强坤, 李怀恩, 胡亚伟, 等. 2008. 青铜峡灌区氮素流失试验研究[J]. 农业环境科学学报, 27(2): 683-686.
- 梁新强, 田光明, 李华, 等. 2005. 天然降雨条件下水稻田氮磷径流流失特征研究[J]. 水土保持学报, 19(1): 59-63.
- 廖义善, 卓慕宁, 李定强, 等. 2011. 施肥及作物生长对田间非点源产污的影响[J]. 生态环境学报, 20(5): 886-891.
- 林雪松. 2009. 河套灌区节水灌溉前后水土环境变化及农田水肥效率模拟[D]. 内蒙古: 内蒙古农业大学: 80.
- 刘宏斌, 李志宏, 张云贵, 等. 2006. 北京平原农区地下水硝态氮污染状况及其影响因素研究[J]. 土壤学报, 43(3): 405-413.
- 陆海明, 孙金华, 邹鹰, 等. 2010. 农田排水沟渠的环境效应与生态功能综述[J]. 水科学进展, 21(5): 719-725.
- 陆建红. 2012. 基于生态友好的北运河闸坝调度与清污轮灌模式研究[D]. 北京: 中国农业科学院: 130.
- 陆琦, 马克明, 倪红伟. 2007. 湿地农田渠系的生态环境影响研究综述[J]. 生态学报, 27(5): 2118-2125.
- 罗春燕. 2008. 我国东南水网平原地区不同土地利用方式氮磷流失特征[D]. 北京: 中国农业科学院: 146.
- 罗良国, 闻大中, 沈善敏. 2000. 北方稻田生态系统养分渗漏规律研究[J]. 中国农业科学, 33(2): 68-74.
- 马东, 杜志勇, 吴娟, 等. 2012. 强降雨下农田径流中溶解态氮磷的输出特征——以崂山水库流域为例[J]. 中国环境科学, 32(7): 1228-1233.
- 马军花, 任理, 龚元石, 等. 2004. 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, 36(3): 103-110.
- 马月华. 2009. 赣抚平原灌区水环境容量研究[D]. 扬州: 扬州大学: 84.
- 毛战坡, 彭文启, 尹澄清, 等. 2004. 非点源污染物在多水塘系统中的流失特征研究[J]. 农业环境科学学报, 23(3): 530-535.
- 秦大庸, 于福亮, 裴源生. 2003. 宁夏引黄灌区耗水量及水均衡模拟[J]. 资源科学, 25(6): 19-24.
- 沈彦俊, 刘昌明. 2011. 华北平原典型井灌区农田水循环过程研究回顾[J]. 中国生态农业学报, 19(5): 1004-1010.
- 王慧亮, 李叙勇, 解莹. 2011. 多模型方法在非点源污染负荷中的应用展望[J]. 水科学进展, 22(5): 727-732.
- 王康. 2012. 灌区水均衡演算与农田面源污染模拟[M]. 北京: 科学出版社.
- 王少丽, 王兴奎, 许迪. 2007. 农业非点源污染预测模型研究进展[J]. 农业工程学报, 23(5): 265-271.
- 王铁军, 郑西来, 崔俊芳. 2006. 莱西地区施肥对地下水硝酸盐污染的过程[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 36(2): 307-312.
- 王晓燕. 2011. 非点源污染过程机理与控制管理—以北京密云水库流域为例[M]. 北京: 科学出版社.
- 王媛, 张刚, 朱显梅, 等. 2012. 吉林省西部新增灌区水田非点源污染负荷估算[J]. 环境科学与管理, 37(4): 35-39.
- 王云慧, 张璇, 欧阳威, 等. 2010. 夏灌对内蒙古河套灌区土壤中磷元素迁移的影响[J]. 农业工程学报, 26(4): 93-99.
- 吴喜军, 李怀恩, 李家科, 等. 2013. 基于非点源污染的水质监测方案研究[J]. 环境科学, 34(6): 2146-2150.
- 郝敏, 吕宪国, 姜明. 2005. 人工沟渠对流域水文格局的影响研究[J]. 湿地科学, 3(4): 310-314.
- 席北斗, 徐红灯, 翟丽华, 等. 2007. pH对沟渠沉积物截留农田排水沟渠中氮、磷的影响研究[J]. 环境污染与防治, 29(7): 490-494.
- 辛艳, 王瑄, 邱野, 等. 2012. 坡耕地不同耕作模式下土壤养分流失特征研究[J]. 沈阳农业大学学报, 43(3): 346-350.
- 徐锋平, 周宏飞, 刘延涛. 2011. 绿洲灌区的水均衡模型及其应用[J]. 中国农村水利水电, 16(11): 153-155.
- 许其功, 刘鸿亮, 沈珍瑶, 等. 2007. 三峡库区典型小流域氮磷流失特征[J]. 环境科学学报, 27(2): 326-331.
- 杨淑静, 张爱平, 杨正礼, 等. 2009. 宁夏灌区农业非点源污染负荷估算方法初探[J]. 中国农业科学, 42(11): 3947-3955.
- 岳卫峰, 杨金忠, 高鸿永, 等. 2004. 内蒙河套灌区义长灌区水均衡分析[J]. 灌溉排水学报, 23(6): 25-28.
- 翟丽华, 刘鸿亮, 席北斗, 等. 2008. 沟渠系统氮、磷输出特征研究[J]. 环境科学研究, 21(2): 35-39.
- 张爱平, 杨世琦, 张庆忠, 等. 2008. 宁夏灌区农田退水污染形成原因及防治对策[J]. 中国生态农业学报, 16(4): 1037-1042.
- 张福珠, 熊先哲, 戴同顺, 等. 1984. 应用 $-(15)N$ 研究土壤-植物系统中氮素淋失动态[J]. 环境科学, 7(1): 21-24.
- 张继宗. 2006. 太湖水网地区不同类型农田氮磷流失特征[D]. 北京: 中国农业科学院: 130.
- 张丽, 邹鹰, 陆海明, 等. 2013. 流域非点源磷素输出负荷估算方法研究[J]. 水文, 33(6): 11-15.
- 张倩, 苏保林, 罗运祥. 2010. 农田面源氮素垂向运移负荷估算方法综述[J]. 南水北调与水利科技, 8(3): 35-38.
- 张思聪, 吕贤弼, 黄永刚. 1999. 灌溉施肥条件下氮素在土壤中迁移转化的研究[J]. 水利水电技术, 30(5): 6-8.

- 张万顺, 乔飞, 彭虹, 等. 2005. 农田灌溉退水水量水质平衡模型研究[J]. 节水灌溉, (5): 15-16, 19.
- 张燕, 阎百兴, 刘秀奇, 等. 2012. 农田排水沟渠系统对磷面源污染的控制[J]. 土壤通报, 43(3): 745-750.
- 张喻芳, 张蔚榛, 沈荣开. 1997. 排水农田中氮素在土壤中迁移转化的研究[M]. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 郑捷, 李光永, 韩振中, 等. 2011. 改进的SWAT模型在平原灌区的应用[J]. 水利学报, 42(01): 88-97.
- 祝惠, 阎百兴. 2010. 三江平原稻田磷输出及迁移过程研究[J]. 湿地科学, 8(3): 266-272.

A review on Non-point Source Nutrient Pollution of Irrigation Plain Areas

HAO Shaonan^{1,2}, LI Xuyong^{1*}, DU Xinzong^{1,2}, ZHANG Wangshou^{1,2}

1. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environment Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100875 China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Plain irrigation areas as the basis of agricultural large-scale production played an important role in agricultural, economic and social development. However, the seriousness of non-point source pollution in plain irrigation areas is increasing with the development of agriculture, and the research of this problem has important significance. This paper reviews the research of the plain irrigation non-point source pollution based on the process of pollution transport with water cycling: (1) The main sources of non-point source pollution are fertilizer, pesticide and agricultural films, waste material dropped by farm animals, soil salinization and atmospheric deposition (dry and wet); the occurrence of plain irrigated farmland non-point sources pollution was affected by the physical and chemical properties of soil, water input pattern and artificial management measures. (2) The rainfall-runoff, pollution migration in multi-level irrigation and drainage system and the coupling interaction between ground water and surface water were the main characteristics of plain irrigated farmland non-point source pollution transport mechanism. (3) In order to estimate the load of plain irrigated farmland non-point source pollution, export coefficient model was used when there is a data shortage, whereas improved classical hydrological model was used when the data is adequate. And (4) the usage of preferred fertilizer compositions for special plant, reasonable soil and water conservation farming measures and ecology ditches were beneficial to the control of non-point source pollution in plain irrigated area. TMDL (Total Maximum Daily Load) plan can provide reliable basis for non-point source control in plain irrigated area. This paper has analyzed the problems that exist in the plain irrigated farmland non-point pollution at present, put forward suggestions for research priorities on this basis, including nutrient pollutants migration in the multi-stage ditches, irrigation water quantity and quality of surface and groundwater coupled model, hierarchical control unit and TMDL plan development and so on, which will be helpful for making a decision on sustainable agricultural development.

Key words: plain irrigation areas; field; non-point source pollution