

水文过程中灌区农田非点源氮的归趋研究进展

孔莉莉, 张展羽, 朱 磊

(河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 天然降雨径流是灌区农田非点源氮污染形成的主要动力因素, 研究降雨径流中农田氮素的流失规律及模拟方法对中国灌区非点源氮的综合治理具有重要意义。从农田氮素流失机理、影响因素以及预测方法等几个方面概述了水文过程中灌区农田非点源氮归趋的研究进展, 其中着重分析了水文过程中农田氮素流失预测的“黑箱”法、“解剖”法的优缺点和适用范围; 并在此基础上, 提出了中国开展灌区农田非点源氮污染研究的重点, 包括典型研究单元选择、尺度界定以及不同水文路径中农田氮素流失的耦合模拟等。

关键词: 水文过程; 灌区; 农田; 氮素; 归趋

中图分类号: X504; S143.1; G353.11

文献标志码: A

文章编号: 1001-6791(2010)06-0853-08

灌区是农业生产活动剧烈而又相对集中的粮食生产基地。近年来, 为提高灌区的产出能力, 人们不断加大氮肥施用水平, 却因未能把握适时、适量等最佳施肥管理方法, 导致农田氮肥流失严重, 进而加剧下游水体的富营养化, 灌区非点源氮污染问题凸显严峻。而农田作为灌区的组成单元, 是灌区非点源氮污染防治的关键所在。目前, 国内外对农田氮素流失的过程机制、输出负荷模拟以及防控措施的研究已较为丰富, 并逐步从农田小区尺度扩大到灌区尺度乃至整个流域尺度; 时间尺度上也多选择对场次降雨径流过程(包括人工模拟降雨或天然降雨)、农田灌溉排水过程以及长时间序列的日常常规监测, 然而众多研究指出降雨径流是农田非点源氮输出的主要驱动力与载体, 尤其是强降雨事件引起的农田土壤氮素流失不容忽视。本文以天然降雨条件为论述前提, 详细阐述降雨径流过程中农田氮素水土界面的时空归趋机理以及众多客观因素对氮素流失负荷的协同影响, 并系统总结农田氮素流失量的主要预测方法, 研究将进一步深化认识降雨对农田氮素流失的贡献效应, 为保护中国灌区农田生态环境及防控天然降雨造成的灌区非点源氮污染提供科学依据。

1 水文过程中农田氮素的归趋机理

水文过程通常是指降雨入渗、产流及汇流 3 个阶段, 而氮素归趋主要包括氮的物理运移(可溶态氮与颗粒态氮的溶出、搬运、沉淀机制)和化学、生物降解转化(氮的挥发、硝化、反硝化等机制)等一系列的环境行为^[1]。二者相互关联、共同作用使得氮素在农田小区及灌区尺度上进行着动态分配。单就农田尺度而言, 降雨条件下氮素的空间归趋途径主要有坡面径流、淋溶及地下排水, 同时伴随着氮素的各种生物化学转化过程。

1.1 坡面径流

降雨过程中, 到达地面的雨水首先经历土壤入渗, 当土壤下渗能力小于降雨强度时, 产生坡面径流; 与此同时, 土壤表层氮在雨滴打击及径流冲刷作用下, 不断向坡面径流传递和迁移。氮素向坡面径流传递的机

收稿日期: 2010-01-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50839002); 教育部博士点基金资助项目(200802940006)

作者简介: 孔莉莉(1981-), 女, 山东枣庄人, 博士研究生, 主要从事农业水土工程与水土环境研究。

E-mail: walily611@126.com

通信作者: 张展羽, E-mail: zhanyu@hhu.edu.cn

制主要体现在: 表层土壤氮素的溶出、解吸以及浓度梯度作用下氮素在表层土壤溶液与坡面径流间的对流、扩散^[2]。进入坡面径流的氮素形式也一般有两种, 一是溶解态形式, 直接随水相迁移; 另一种是吸附态形式, 随径流中泥沙相的搬运而流失^[3]。相同的降雨条件下, 对于不同的土地利用方式, 其坡面径流氮的主要输出形态差别较大。研究指出, 旱地坡面径流中颗粒态氮是氮的主要输出形态, 而水田则以溶解态氮输出为主^[4-6]; 此外, 李恒鹏等^[3]还对比分析了暴雨过程中地表径流与壤中流的氮素流失特征, 指出坡面径流是农田氮素流失的主要方式, 占氮素流失总量的 81.66%, 而壤中流流失量仅占 18.34%。

1.2 地下排水

壤中流泛指水分在土壤中的垂直下渗和水平侧流, 而水平侧流最终汇入区域内的地表径流。壤中流发生的同时氮素也随之运移, 一般认为, 土壤氮素随下渗水流向深层迁移(超出作物根层)至地下水面的整个归趋过程称为氮素的淋溶; 淋溶作用是个渐进累积的过程, 无雨时期氮素淋溶速率较慢, 但降雨会明显加速氮的淋失^[7]。淋失到地下水中的氮素随地下排水流失, 同样威胁到灌区的地表水环境。美国的研究表明农业区地下排水中的硝氮含量高达 42.9 kg/hm^2 , 已造成地下水水质的严重污染^[8]。此外, 土壤溶液中主要存在的硝氮与氨氮的淋失程度迥异, 因带负电荷的土壤胶体对硝氮的吸附甚微, 故相对于氨氮更易遭受淋洗, 是淋溶和地下排水中的主要形态^[9], 其淋溶的多少除受制于降雨特征因素以外, 还取决于施肥量、土壤渗透性、作物覆盖以及各种农田管理措施等因素。而氨氮迁移的主要机理是扩散, 带正电荷的氨根离子容易被土壤胶体吸附, 通常不易淋溶, 但在特定的条件下也可能存在质流或在土壤剖面中随水流下渗而迁移, 这种现象通常发生在水田中^[10]。

研究表明, 坡面径流与地下排水是水文过程中农田氮素发生物理迁移的主要方式, 也是致使接纳水体污染的主要途径, 因此, 加强降雨条件下的农田氮素流失方式及其过程机理的全面研究是实现灌区农业非点源氮污染源头控制的前提。

2 影响水文过程中农田氮素归趋的主要因素

2.1 降雨特征

降雨事件的雨量、雨强及持续时间等特征因子均对农田氮素的归趋特征影响较大。王建中等^[11]、李鹏等^[12]研究表明, 在单次降雨径流过程中, 降雨动能越大, 雨滴溅蚀能力越强, 吸附态氮和溶解态氮进入坡面流的速度也越快。但也有研究指出由于地表结皮或土壤孔隙堵塞, 会阻止氮素进入地表径流^[13]。吴希媛等^[14]还指出单场降雨径流中硝氮和氨氮的浓度变化表现不均, 通常在降雨产流初期较高, 随降雨持续时间的延长而趋于稳定或减小; 对于不同降雨事件, 降雨强度越大, 历时越长, 氮素的累积流失量就越大。王辉等^[15]研究了不同降雨条件下黄土坡地氮的淋溶特征, 发现降雨量与硝氮的淋溶深度、淋失量均呈正相关性关系, 大约每 4 mm 降雨可使土壤中的硝态氮下渗 1 cm 。

2.2 农田下垫面条件

农田下垫面条件包括土地利用方式、地形地势(坡度坡长)、土壤特性(土壤的质地、结构、雨前土壤水分与养分含量等)以及植被覆盖程度等多个方面。诸多下垫面条件因子与降雨耦合影响着农田土壤氮素的归趋特征。吴希媛^[16]对比了 4 种不同植被覆盖类型的径流总氮和氨氮浓度, 发现在相同雨强下, 两种形态氮的浓度由高到低均为: 人工草地 > 次生林 > 荒草坡 > 竹林地, 并指出这种排序不受雨强大小的影响。Ow i no^[17]研究指出植草区可拦截地表径流中 45% 的硝氮负荷和 47% 的氨氮负荷, 但会增大地下排水中的硝氮浓度^[18]。在相同坡度和降雨强度条件下, 农田作物的覆盖作用也能减缓地表径流量和氮的迁移量, 并且随着覆盖度的增加, 径流中颗粒态氮的含量减少, 然而, 硝氮与氨氮的浓度却明显增大^[19]。Fuller^[20]的研究还指出覆盖度低的休闲地地下排水中的硝氮浓度远低于耕种地。土壤质地、结构及雨前湿润度决定了土壤的透水性能, 进而影响到氮素的各种化学反应机制及其迁移通量。一般来说, 土壤有机质含量越高, 土壤结构就越佳, 抗蚀性就越强, 土壤氮素越不易流失; 土壤粘粒含量降低会加剧土壤氮素的流失。Zhou 等^[21]对透水

性较好的砂壤土和不易透水的粘壤土分别进行了淋溶实验研究, 结果表明, 粘壤土中氮素淋失量仅为施氮量的 5.7% ~ 9.6%, 而砂壤土中氮素淋失量可达施氮量的 16.2% ~ 30.4%, 土壤粘粒含量与淋失量呈负相关关系。Michael^[22]的研究也发现, 砂土中硝氮的淋失量远高于黄土。Cho^[23]为调查氮素在土壤剖面上的归趋状况, 构建了一个由覆盖层、粗砂层和细沙层组成的土壤分层系统, 结果显示砂粒与粘粒含量超过 3% 时氮氮吸附稳定, 砂粒占粘粒的比重越大硝氮的冲洗越严重, 并指出粗砂层中砂粒与粘粒含量为 10% 时是去除硝氮与氨氮的最优土壤结构配置。另外, 还有研究指出, 降雨前期土壤含水量越低, 硝氮被淋洗的程度越严重, 土壤剖面中硝氮的浓度峰越深^[24]。以上分析表明, 土地利用方式的不同、土壤特性的差异以及植被覆盖度的高低均对水文过程中农田土壤氮素的流失特征有重要影响, 因此, 防控降雨造成的农业非点源氮污染的同时还应结合实际的客观条件有针对性的重点治理。

2.3 农田管理措施

水文过程中农田氮素的归趋特征还与农田管理措施密切相关。施肥时间、数量、品种及方式是影响农田氮素归趋的一个重要主观因素。Fang^[25]研究指出, 氮素流失量与化肥施用量之间存在正相关关系。Jia 等^[26]也指出, 施肥农田地下径流硝氮浓度是不施肥处理的 5 倍^[9], 可见氮肥的过量施用是造成降雨过程中农田氮素流失的根源^[7]。同时不恰当的施肥时间与不同的施肥方式也会导致氮肥的利用效率降低, 增加地表径流和淋溶损失的风险。在施肥后 1 周内发生 128 mm 降雨所引起的农田氮素流失量几乎占到施肥量的 10% ~ 20%。Zeng 等^[27]分析了 3 种施肥深度 (即表施、地下 10 cm、地下 20 cm) 情境下的径流氮浓度大小, 发现复合肥施用深度为 20 cm 时的径流氮浓度明显低于表施和地下 10 cm 施肥。

此外, 耕作在不同程度上破坏了农田土壤原有的宏观孔隙结构, 改变了降雨侵蚀、入渗强度, 进而容易造成氮素的地表径流和淋溶损失。通常免耕方式能更有效地降低硝态氮的淋溶及径流损失^[28], 但也有研究指出在棉花-大豆-小麦三季轮作农田中传统耕作、少耕和免耕方式对地下排水中硝氮的浓度影响不大^[20]。不同种植方式也与土壤氮的流失关系密切; Han 等^[29]研究表明, 对照传统的双季作物种植, 三季作物种植方式更易引起氨氮流失, 径流中氨氮流失量也远高于双季种植。

Ingrid 等研究还指出, 控制暗管排水能够改变土壤中氮素的动态特征, 从而使得排水出流中氮的输出负荷显著降低^[30]; 同时地表控制排水也可达到减少氮素输出负荷的目的^[31]。

上述成果表明, 合理施肥、适当耕作、积极进行控制排水是提高作物产量, 减少降雨事件中农田氮素流失的重要措施, 因此结合降雨特征开展田间最佳管理方案优选是灌区农田非点源氮污染研究的落脚点。

3 水文过程中农田氮素流失预测的常见方法

3.1 “黑箱”法

早期对降雨事件中农田氮素流失总量的估算通常采用“黑箱”法。所谓的“黑箱”法是指借助于长期对农田小区出口或小流域出口径流过程及径流氮浓度的同步监测数据, 拟合出径流氮输出负荷与水文参数的定量关系。其中径流量与氮素输出负荷之间可呈现指数^[32]、对数^[29]、线性以及非线性^[33]等多种相关关系。然而, 这种单因素统计方程不能很好地反映除降雨因素以外的各种客观因素 (如地形、作物覆盖、雨前土壤水分与养分状况) 对径流氮流失负荷的耦合影响, 多因素统计分析随之出现^[11]; 但由于涉及影响因子较多, 在逐步回归分析率定参数中工作量较大, BP 神经网络模型凭借其较强的自学习能力以及处理非线性问题的友好性被成功引用^[34]。这类方法多用于有大量野外实验监测数据的地区, 其主要功能在于: ① 可提供降雨过程径流氮的输出总量; ② 能从宏观尺度评价不同时期降雨径流造成的氮素流失状况; ③ 充分反映不同客观因素对氮素流失负荷影响的敏感性。但由于忽略氮素迁移的水文路径以及伴随的各种降解转化机制, 不能详细描述降雨径流过程中农田氮素经由不同水文路径输出负荷的动态变化过程; 模型对特定地域的适应性较强, 但区域间的可移植性较差。

3.2 “解剖”法

随着对农田氮素时空归趋机理剖析研究的深入, 大批适用于不同尺度的农业非点源氮污染模型相继涌现。从适用于农田尺度模拟的 ARM、CREAMS、GLEAMS、HPSE、AGNPS 等模型, 到能够模拟较大空间尺度的 ANSWERS、SHE、SWAT、BASINS 等流域模型, 以至近期基于地理信息技术研发的集空间信息处理、数据库技术、数学计算、可视化表达等功能于一体的大型专业软件, 如 MIKE-SHE、DELFT 等^[35], 农业非点源污染模拟的广度与深度都得到了很大的发展。这类模型不同程度地实现了对农田氮素输出的降雨径流、土壤侵蚀以及氮素随地表径流、淋溶及地下排水等主要环节的模拟, 可视之为“解剖”法, 代表着近年来农业非点源污染研究的总体趋势并在世界各地得到广泛应用。但是, 多数模型在对农田降雨径流及土壤侵蚀的处理上采用经验公式, 由于氮素在水土界面的交换机制包括颗粒态氮的沉降与再悬浮、溶解态氮的吸附与解吸以及土壤溶液氮与径流氮的对流扩散等, 如何精确模拟降雨过程中氮在农田土壤相和水相间的动态交换将是农田氮流失模型研究的重点。目前, 氮素在坡面流、壤中流中的动态变化研究已取得了较大进展, 主要包括以下几方面内容。

(1) 氮素坡面流流失模型 氮素随坡面流的流失过程模拟经历了从开展氮素沿坡面纵向一维迁移模拟过渡到耦合土壤剖面垂向迁移的二维模拟; 从单纯考虑坡面流中氮的迁移转化过渡到径流水体与土壤界面间的氮素动态交换等。如 Deng 等^[36] 根据对流扩散理论建立了基于传输速率的氮素迁移模型; Gao^[37] 与 Walter^[38] 借助 Rose 的土壤侵蚀模型推求了基于雨滴溅蚀机理的溶质迁移过程模型, 模型假设表层土壤与径流之间存在一个交换层, 并通过敏感性分析认为化学物迁移到径流中雨滴的过程控制和扩散作用是十分重要的因素。而 Zhang 等^[39] 的研究前提则是假定混合层与下层土壤间没有物质交换。童菊秀等^[40] 针对中国南方侵蚀不甚严重的平坦农田, 运用非完全混合理论, 将土壤混合层和积水径流层看作一个整体, 建立了二层解析模型, 通过积水过程分析明确了雨前田面无积水和有积水两种情境下地表径流中溶质浓度的动态变化特征, 然而仅考虑了溶质的入参与扩散过程, 未对溶质随坡面流流失过程中的其它转化机制进行探究。由于降雨过程自身的复杂性, 多数学者将研究的前提控制在恒定雨强状态下, 这必然会限制模型在天然降雨条件下的推广使用。为此, 王建中^[11] 尝试了对人工模拟变雨强条件下坡面氮素迁移过程的模拟, 取得了良好的模拟效果, 可作为进一步开展天然降雨过程中农田氮素坡面流失研究的重要参考。

(2) 氮素淋溶迁移数学模型 氮素(主要指硝氮)淋溶是农田土壤氮素流失的一个重要环节, 在坡面径流流失与地下排水流失中起着承上启下的作用。20 世纪 60 年代初, 依据达西定律和连续流原理建立的对流-扩散模型(CDE)是模拟土壤中氮素运移转化的经典动力学方程。CDE 模型主要是考虑由对流、扩散引起的氮素运移, 同时也包括在对流扩散中伴随的溶解态氮被吸附与解吸的过程。当前用以描述溶质解吸机制的模型有两类, 即平衡模型和动力学模型。Mansell 等^[41] 改进了仅能描述单组分溶质运移的 CDE 方程, 建立了多组分溶质运移模型, 模型解释了非稳定、非饱和流中的多种离子运移问题, 可以反映出各离子相互间存在的化学反应, 但由于各种反应机制涉及众多学科间相关知识的交叉互用, 模型未能得到很好的应用。对于 CDE 模型的参数更新及率定问题, 学术界还给出了大量的解决方法, 例如, 极大似然估计法、穿透曲线估计法以及后来发展的连续时间的随机游走理论等^[42]。这些研究工作使得 CDE 模型日趋完善。由于 CDE 方程中的土壤含水率变化可用土壤水动力方程来表述, 因此, 将两者耦合应用成为农田土壤氮素淋溶过程研究的切入点, 同时以此为理论基础, 也衍生了大量的土壤水氮联合模型, 美国康乃尔大学研发的 LEACHM 模型, 采用 Richards 方程与 CDE 方程联合求解, 解决氮素在土壤剖面上归趋的一维问题; 由美国盐土实验室开发的 Hydrus-1D 模型也可用于模拟非饱和土壤中一维水分和氮素的运移过程。此外, 较为著名的 DRAINMOD-N 模型已升级到 DRAINMOD-NII 6.0 版, 并被成功应用到美国、瑞典等地。然而, 土壤特性带有明显的空间变异性, 相应的土壤非饱和带的水分和氮素运移也呈现出强烈的空间异质性, 时下, GIS 技术的应用将会为解决农田尺度上氮素淋失的空间变异性带来契机。

(3) 氮素地下排水流失模型 地下排水出流中氮素流失过程的模拟方法有两类: 一类是半机理性模型, 对暗管排水过程采用土壤水动力方程模拟, 而进入暗管的氮素浓度则根据实测数据假定一个恒定的硝氮浓

度。这类方法简单直观, 易于操作, 但不能真正反应农田氮素地下排水流失过程。另一类则是将氮素在非饱和层的迁移转化过程和饱和含水层的归趋过程并同考虑, 建立二维或三维农田排水氮流失机理模型。其中, 二维饱和-非饱和水流和溶质运移软件 SWMS-2D 可以处理各种边界条件, 应用非常广泛。FEFLOW 是基于三维 Galerkin 有限元的地下水模拟可视化软件包, 能够解决完全瞬时、半瞬时、稳态的饱和-非饱和地下水流动与氮素运移模拟。然而, 完全三维的饱和-非饱和区水氮运移机理模型的模拟精度虽高, 但网格剖分量巨大, 影响计算效率。林琳等提出分别建立非饱和区、饱和区的水流与溶质运移方程, 再将二者耦合求解是解决区域水流和溶质运移问题的理想方案^[43], 并对恒定雨强条件进行了模型验证, 实测值与模拟值吻合度较高, 但这种方法在天然降雨过程中的适用性还需进一步探讨。

上述分析表明, 国内外学者对天然降雨条件下农田氮素的坡面流流失、淋溶流失以及地下排水流失过程模拟进行了大量富有成效的研究, 但在机制性精准预测等方面仍不成熟, 特别是三者间的“无缝链接”模拟更是少见, 因此, 很难反应氮素在农田复杂系统中归趋的真实状况。

4 结论及展望

4.1 机理研究方面

(1) 加强天然降雨条件下农田氮素流失过程的长期定位监测; 重点分析作物整个生长阶段内不同降雨类型下农田氮素流失的变化过程, 明确降雨因素耦合作物水肥管理对氮素流失特征的影响, 是灌区农田非点源氮污染机理研究的目的所在。

(2) 合理选择监测单元, 重点把握监测尺度问题。下垫面条件的差异是影响农田氮素输出机制的主要客观因素, 既使下垫面条件近似, 不同的空间监测尺度其氮素的输出特征也具有较大的不稳定性, 因此, 合理确定灌区内典型的农田监测单元, 同时控制好监测尺度, 利用有限的田间监测资料来充分反映每一个水文过程中农田氮素的流失特征将成为开展灌区农田非点源氮污染机理研究的首要问题。

(3) 着重开展同一水文过程中农田氮素不同流失路径(坡面径流、淋失与地下排水)的同步监测, 查明每一流失路径对农田氮素输出负荷的贡献大小, 是深入理解农田氮素流失机理过程的关键, 也是实现氮素不同流失路径耦合模拟的前提。

4.2 模型研究方面

(1) 提高现有模型模拟时间的灵活性, 使其既能反映瞬时的降雨径流过程, 又能描述区域长期的水文变化过程。模型本身的特性分析应逐步系统化, 如敏感性、确定性等, 为研究者在综合比对相关模型的基础上选择适当的模型提供方便; 这些都将是研究者今后努力的方向。除此, 参数优选问题作为限制现有模型推广应用的瓶颈也应被重点关注。

(2) 在已有的地表水与地下水联合模型的基础上, 融入氮素不同流失路径的迁移转化模块是对农田氮素流失特征模拟深入研究的一个重要导向。二者与 GIS 耦合集成平台的研发, 也将成为解决农田空间变异性, 实现农田氮素流失精准模拟的突破点和热点。

综上所述, 农田氮素归趋机理研究是进行数值模拟的前提与保障, 并为其提供理论支撑; 同时水文条件又是制约农田氮素归趋的主要客观因素, 因此, 研究水文过程中农田氮素归趋特征对指导灌区农田肥料管理以及评价灌区水环境质量具有重要的现实意义。

参考文献:

- [1] 孔莉莉, 张展羽, 夏继红. 灌区非点源氮在排水沟渠中的归趋机理及控制问题[J]. 中国农村水利水电, 2009(7): 48-51. (KONG Li li, ZHANG Zhan-yu, XIA Ji hong. Fate mechanism and control problem of non-point source nitrogen in drainage ditch in irrigation district[J]. China Rural Water and Hydropower, 2009(7): 48-51. (in Chinese))
- [2] 张玉斌, 郑粉莉, 武敏. 土壤侵蚀引起的农业非点源污染研究进展[J]. 水科学进展, 2007, 18(1): 123-132. (ZHANG Yu-bi, ZHENG Fen-li, WU Min. Progress of research on agricultural non-point source pollution caused by soil erosion[J]. Advances in Water Science, 2007, 18(1): 123-132.)

- bin, ZHENG Fei-li, WU M-in. Research progresses in agricultural non-point source pollution caused by soil erosion[J]. *Advances in Water Science*, 2007, 18(1): 123-132. (in Chinese)
- [3] 李恒鹏, 金洋, 李燕, 等. 模拟降雨条件下农田地表径流与壤中流氮素流失比较[J]. *水土保持学报*, 2008, 22(2): 6-9. (LI Heng-peng, JIN Yang, LI Yan, et al. Comparative study of nitrogen losses between surface flow and interflow of farm land under artificial rainfall conditions [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, 22(2): 6-9. (in Chinese))
- [4] TANG Jia-liang, ZHANG Bin, GAO Chao, et al. Hydrological pathway and source area of nutrient losses identified by a multi scale monitoring in an agricultural catchment [J]. *Catena*, 2008, 72: 374-385.
- [5] 王小治, 高人, 钱晓晴, 等. 利用大型径流场研究太湖地区稻季氮素的径流排放[J]. *农业环境科学学报*, 2007, 26(3): 831-835. (WANG Xiao-zhi, GAO Ren, QIAN Xiao-qing, et al. Nitrogen loss via runoff from paddy field using the large catchment area in Taihu region [J]. *Journal of Agricultural Environment Science*, 2007, 26(3): 831-835. (in Chinese))
- [6] 梁新强, 田光明, 李华, 等. 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*, 2005, 19(1): 59-63. (LIANG Xin-qiang, TIAN Guang-ming, LI Hua, et al. Study on characteristic of nitrogen and phosphorus loss from rice field by natural rainfall runoff [J]. *Journal of soil and water conservation*, 2005, 19(1): 59-63. (in Chinese))
- [7] LIANG Xin-qiang, LI Hua, XU Lei, et al. Influence of N fertilization rates, rainfall and temperature on nitrate leaching from a rainfed winter wheat field in Taihu watershed [J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2010. [doi:10.1016/j.pce.2010.03.017]
- [8] GOSWAMID, KALITA P K, COOKE R A C, et al. Nitrate-N loadings through subsurface environment to agricultural drainage ditches in two flat Midwest (USA) watersheds [J]. *Agricultural Water Management*, 2009, 96: 1021-1030.
- [9] JIA Hai-yan, LEI A-li, LEI Jun-shan, et al. Effects of hydrological processes on nitrogen loss in purple soil [J]. *Agricultural Water Management*, 2007, 89: 89-97.
- [10] GALLOWAY J N. Nitrogen mobilization in Asia [J]. *Nutrient cycling in Agroecosystems*, 2000, 57: 1-12.
- [11] 王建中, 刘凌, 宋兰兰. 坡地氮磷流失过程模拟[J]. *水科学进展*, 2009, 20(4): 531-536. (WANG Jian-zhong, LIU Ling, SONG Lan-lan. Simulation of nitrogen and phosphorus loss in sloping field [J]. *Advances in Water Science*, 2009, 20(4): 531-536. (in Chinese))
- [12] 李鹏, 李占斌, 郑良勇. 黄土坡面径流侵蚀产沙动力过程模拟与研究[J]. *水科学进展*, 2006, 17(4): 444-449. (LI Peng, LI Zhan-bin, ZHENG Liang-yong. Hydrodynamic process of soil erosion and sediment yield by runoff on loess slope [J]. *Advances in Water Science*, 2006, 17(4): 444-449. (in Chinese))
- [13] LEITW, PAN Y H, LIU H, et al. A runoff-ponding method and models for the transient infiltration capability process of sloped soil surface under rainfall and erosion impacts [J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 319: 216-226.
- [14] 吴希媛, 张丽萍, 张妙仙, 等. 不同雨强下坡地氮流失特征[J]. *生态学报*, 2007, 27(11): 4576-4582. (WU Xi-yuan, ZHANG Li-ping, ZHANG Miao-xian, et al. Research on characteristics of nitrogen loss in sloping land under different rainfall intensities [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(11): 4576-4582. (in Chinese))
- [15] 王辉, 王全九, 邵明安. 降水条件下黄土坡地氮素淋溶特征的研究[J]. *水土保持学报*, 2005, 19(5): 61-64. (WANG Hui, WANG Quan-jiu, SHAO Ming-an, et al. Characteristics of nitrogen leaching from sloping land on loess plateau under rainfall conditions [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(5): 61-64. (in Chinese))
- [16] 吴希媛, 张丽萍, 倪含斌, 等. 青山湖流域不同地表覆盖降雨径流中氮磷流失过程研究[J]. *水土保持学报*, 2008, 22(1): 56-59. (WU Xi-yuan, ZHANG Li-ping, NI Han-bin, et al. Research on characteristics of nitrogen and phosphorus loss under different coverage in Qingshan lake valley [J]. *Journal of soil and water conservation*, 2008, 22(1): 56-59. (in Chinese))
- [17] OWINO JO, OWIDO S F O, CHEMELIM C. Nutrients in runoff from a clay loam soil protected by narrow grass strips [J]. *Soil & Tillage Research*, 2006, 88: 116-122.
- [18] RABIN R, PRASANTA K K, MITA K P. Nutrient transport through a vegetative filter strip with subsurface drainage [J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, 90: 1868-1876.
- [19] GRMAY G, SINGH B R, NYSSSEN J, et al. Runoff and sediment associated nutrient losses under different land uses in Tigray Northern Ethiopia [J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 376: 70-80.
- [20] FULLER K D, GORDON B R, GRIMMETT M, et al. Seasonal and crop rotational effects of manure management on nitrate-nitrogen leaching in Nova Scotia [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2010, 137: 267-275.
- [21] ZHOU Jian-bin, XI Jin-gen, CHEN Zhu-jun, et al. Leaching and transformation of nitrogen fertilizers in soil after application of N

- with irrigation: A soil column method [J]. *Pedosphere*, 2006, 16(2): 245-252.
- [22] MICHAEL R, ENRICO T, UWE F, et al. Impact of selected agricultural management options on the reduction of nitrogen loads in three representative meso scale catchments in Central Germany [J]. *Science of the Total Environment*, 2009, 407: 3459-3472.
- [23] CHO K W, SONG K G, CHO J W, et al. Removal of nitrogen by a layered soil infiltration system during intermittent storm events [J]. *Chemosphere*, 2009, 76: 690-696.
- [24] YU Shen, EHRENFELD J G. The effects of changes in soil moisture on nitrogen cycling in acid wetland types of the New Jersey Pinebarrens (USA) [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2009, 41: 2394-2405.
- [25] FANG Quan-xiao, YU Qiang, WANG En-li, et al. Soil nitrate accumulation, leaching and crop nitrogen use as influenced by fertilization and irrigation in an intensive wheat maize double cropping system in the North China Plain [J]. *Plant Soil*, 2006, 284: 335-350.
- [26] 王姗姗, 梁涛. 区域尺度农田氮磷非点源污染与模型应用分析 [J]. *地球信息科学*, 2005, 7(4): 107-112. (WANG Shanna, LIANG Tao. Analysis of agricultural non-point pollution and models application [J]. *Geoinformations science*, 2005, 7(4): 107-112. (in Chinese))
- [27] ZENG Shu-cai, SU Zhi-yao, CHEN Bei-guang, et al. Nitrogen and phosphorus runoff losses from orchard soils in South China as affected by fertilization depths and rates [J]. *Pedosphere*, 2008, 18(1): 45-53.
- [28] MKHABELA M S, MADANIA, GORDON R, et al. Gaseous and leaching nitrogen losses from no tillage and conventional tillage systems following surface application of cattle manure [J]. *Soil & Tillage Research*, 2008, 98: 187-199.
- [29] HAN J G, LIZ B, LIP, et al. Nitrogen and phosphorous concentrations in runoff from a purple soil in an agricultural watershed [J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 97: 757-762.
- [30] NGRID W, NGMAR M. Effects of controlled drainage on N and P losses and N dynamics in a sandy sand with spring crops [J]. *Agricultural Water Management*, 2007, 87: 229-240.
- [31] KRISHNA P W, MARK B D, RICHARD A C, et al. Nitrogen balance in and export from agricultural fields associated with controlled drainage systems and denitrifying bioreactors [J]. *Ecological Engineering*, 2010. [doi:10.1016/j.ecoleng.2010.04.024]
- [32] 张荣保, 姚琪, 计勇, 等. 太湖地区典型小流域非点源污染物流失规律: 以宜兴梅林小流域为例 [J]. *长江流域资源与环境*, 2005, 14(1): 94-98. (ZHANG Rong-bao, YAO Qi, JI Yong, et al. A study on law of non-point source pollution losses in a typical small watershed of Taihu basin—a case study at Meilin watershed in Yixing city of Jiangsu province. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2005, 14(1): 94-98. (in Chinese))
- [33] 蒋锐, 朱波, 唐家良, 等. 紫色丘陵区典型小流域暴雨径流氮磷迁移过程与通量 [J]. *水利学报*, 2009, 40(6): 659-665. (JIANG Rui, ZHU Bo, TANG Jialiang, et al. Transportation processes and loss fluxes of nitrogen and phosphorous through storm runoff in a typical small watershed in the hilly area of purple soil [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2009, 40(6): 659-665. (in Chinese))
- [34] KIM M Y, GILLEY J E. Artificial Neural Network estimation of soil erosion and nutrient concentrations in runoff from land application areas [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2008, 64: 268-275.
- [35] 严登华, 何岩, 王浩, 等. 生态水文过程对水环境影响研究述评 [J]. *水科学进展*, 2005, 16(5): 747-752. (YAN Denghua, HE Yan, WANG Hao, et al. Review of effect of the eco-hydrological process on water environment [J]. *Advances in Water Science*, 2005, 16(5): 747-752. (in Chinese))
- [36] DENG Z Q, LIMA J L M P, SINGH V P. Transport rate-based model for overland flow and solute transport: parameter estimation and process simulation [J]. *Journal of Hydrology*, 2005, 315: 220-235.
- [37] GAO B, WALTER M T, STEENHUIS T S, et al. Rainfall induced chemical transport from soil to runoff: Theory and experiments [J]. *Journal of Hydrology*, 2004, 295: 291-304.
- [38] WALTER M T, GAO B, PARIANGE J Y. Modeling soil solute release into runoff with infiltration [J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 347: 430-437.
- [39] ZHANG X C, NORTON D, NEARING M A. Chemical transfer from soil solution to surface runoff [J]. *Water Resource Research*, 1997, 33(4): 809-815.
- [40] 董菊秀, 杨金忠, 暴入超. 非饱和土中溶质地表径流迁移模型及解析模拟 [J]. *水科学进展*, 2009, 20(1): 10-17. (TONG Juxiu, YANG Jinzhong, BAO Ru-chao. Model for chemicals transfer to surface runoff in unsaturated soil and its analytical model

- ing [J]. *Advances in Water Science*, 2009, 20(1): 10-17. (in Chinese)
- [41] MANSELL M G, HUSSEY S W. An investigation of flows and losses with in the alluvial sands of ephemeral rivers in Zimbabwe [J]. *Journal of Hydrology*, 2005, 314: 192-203.
- [42] 熊云武, 黄冠华, 黄权中. 非均质土柱中溶质迁移的连续时间随机游走模拟 [J]. *水科学进展*, 2006, 17(6): 797-802. (XIONG Yun-wu, HUANG Guan-hua, HUANG Quan-zhong. Modeling solute transport in heterogeneous soil column using continuous time random walk [J]. *Advances in Water Science*, 2006, 17(6): 797-802. (in Chinese))
- [43] 林琳, 杨金忠, 史良胜, 等. 区域饱和-非饱和多孔介质的溶质运移简化模型 [J]. *水利学报*, 2007, 38(3): 342-348. (LIN Lin, YANG Jin-zhong, SHI Liang-sheng et al. Simplified model of solute transport in regional saturated-unsaturated porous media [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, 38(3): 342-348. (in Chinese))

Review of the trends in the study of non-point source nitrogen in hydrological processes on farm land over irrigation district

KONG Li-li ZHANG Zhan-yu ZHU Lei

(*College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China*)

Abstract The major driving force for non-point source nutrient losses from irrigated farm land comes from the natural rainfall-runoff process in the watershed. Study of the regularity in nutrient losses and the relevant modeling methodologies is thus important for the comprehensive pollution control of non-point source nitrogen in China's irrigation districts. This paper reviews the trends and progresses in the study of non-point source nitrogen in hydrological processes on farm lands, with emphasis on the aspects of the mechanism of nutrient losses and the influence factors, as well as the prediction methods. The scope and application of both black-box model and mechanism-dissection model are analyzed in detail. The advantage and disadvantage of the two models are also underlined. Based on the study, a priority list of promising research areas on the subject is proposed, including the selection of representative research units, the scale issues, and the coupling of farm land nutrient losses from different hydrologic flow pathways.

Key words hydrologic processes; irrigation district; farm land; nitrogen; trend

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 50839002).