

农业非点源污染预测模型研究进展

王少丽^{1,2}, 王兴奎¹, 许迪²

(1. 清华大学水沙科学教育部重点实验室, 北京 100084; 2. 中国水利水电科学研究院水利研究所, 北京 100044)

摘要: 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, 因此, 模型化研究一直是非点源污染研究领域的一个核心内容。该文回顾了农业非点源污染预测模型的发展, 简要阐述了国外农田尺度和流域规模尺度农业非点源污染模拟模型的功能和研究进展, 对中国非点源污染预测、模型发展及存在问题进行了论述, 提出从农业生产和环境保护的角度去探讨污染物运移特征和定量预测模型, 结合 3S 技术, 并考虑非点源污染的不确定性将是今后非点源污染模型研究的主要内容之一。

关键词: 农业非点源; 污染; 预测模型; 地理信息系统

中图分类号: X592

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2007)5-0265-07

王少丽, 王兴奎, 许迪. 农业非点源污染预测模型研究进展[J]. 农业工程学报, 2007, 23(5): 265-271.

Wang Shaoli, Wang Xingkuai, Xu Di. Advances in the prediction models of agricultural non-point source pollution[J].

Transactions of the CSAE, 2007, 23(5): 265-271. (in Chinese with English abstract)

0 引言

近年来, 随着工业点源污染控制水平的提高, 非点源污染已经成为水环境污染的主要来源。在各种非点源污染引起的水环境污染问题中农业非点源污染最为普遍, 并构成当今世界水质恶化的第一大威胁, 农业非点源污染具有影响因素多、发生的随机性大、危害范围广、污染物排放种类和数量不确定、污染负荷时空差异性显著等特点, 使得农业非点源污染的研究与防治工作比点源污染更为困难。

农业非点源污染是由化肥、农药、畜禽粪便, 以及水土流失经降雨径流、淋溶和农田灌溉回归水进入水体而造成的。影响农业非点源污染的因素众多, 如土壤质地、土地利用类型、施肥种类及方法和时间、耕作方法、降雨强度和降雨量等。采用常规的监测手段定量估算某一时段内非点源污染负荷量, 受客观条件的限制而难以大面积采用, 因此, 模型化研究一直是非点源污染研究领域一个活跃的分支。目前, 利用模型对非点源污染问题进行模拟研究是广泛使用的方法之一, 一方面对非点源污染机理的进一步认识促进了非点源污染模型的快速发展; 另一方面模型的发展又加强了非点源污染机理的进一步认识。利用数学模型可以有效解决非点源污染的随

机性和观测点的不确定性, 可以模拟各类非点源污染的形成、运移、输出等过程, 从而为地表水资源的合理开发和利用提供决策依据, 并使地表水环境保护措施的实施更加科学化和定量化。

1 农业非点源污染预测模型的发展

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。经验性模型不考虑溶质运移的机制或动力学特征, 如早期的非点源污染模型研究始于土地利用对河流水质产生影响的认识, 其方法往往依据因果分析和统计分析来建立统计模型, 并以此建立污染负荷与流域土地利用或径流量之间的统计关系^[1], 这类模型对数据的需求比较低, 表现了较强的实用性和准确性, 但是由于它们难以描述污染物运移的路径与机理, 使得这类模型的进一步应用受到了较大的限制。自 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, 机理模型逐渐成为非点源污染模型开发的主要方向, 即依据达西定律和连续原理建立的对流-弥散方程, 对整个系统及其内部发生的复杂转化运移过程进行定量描述, 评估土地利用的变化及不同的管理技术措施对污染负荷和水质的影响, 通常由降雨径流过程(水文过程)、土壤侵蚀过程和化学物质转化运移 3 个主要过程组成, 其中著名的有综合水文、侵蚀和污染物运移过程的农田尺度模型 CREAMS, GLEAMS, LEACHM, DRAINMOD-N, RZWQM, EPIC 等, 这些模型在美国和加拿大广为应用, 对于指导农业生产, 减少农业活动对水体的污染起着积极的作用。20 世纪 90

收稿日期: 2006-08-15 修订日期: 2007-02-12

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50639040); 水利部“948”计划技术创新与转化项目(CT200404)

作者简介: 王少丽(1963-), 女, 江苏无锡人, 教授级高工, 博士生, 主要从事农田灌排理论与技术、农业水环境保护方面的研究。北京中国水利水电科学研究院水利研究所, 100044。

Email: shaoliw@iwhr.com

年代以来,随着计算机技术的飞速发展和地理信息系统(GIS)技术在流域研究中的广泛应用,GIS技术与非点源污染模型的结合成为该研究领域中的热点问题。一些功能强大的超大型流域模型被开发出来,这些模型集空间信息处理、数据库技术、数学计算、可视化表达等功能于一身,使得非点源污染模型的应用性能和精度都大为提高。其中比较著名的有美国农业部农业研究所开发的AGNPS和美国国家环保局开发的SWAT,BASINS等模型。

随机模型近20年来才逐渐发展起来,并越来越受到重视和广泛应用。国外在这方面的研究较多,而国内应用随机方法建模和预报的研究才刚刚起步^[2]。随机模型以对流-弥散方程为基础,考虑到模型中的参数存在较大的空间变异性和某些变量存在的时间变异性,参数或边界条件处理为随机变量,模型的运行结果将得到输出变量的一个统计分布或范围。其中,Jury提出的传递函数模型具有较完备的理论基础^[3],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观机制,其特点是根据地表加入的浓度输入函数,转化成田间土壤中运移溶质浓度的函数。

2 国外农业非点源污染预测模型研究

2.1 农田尺度模型

农田尺度规模的定义为:单一的土地利用,相对均一的土壤质地,降雨空间分布均匀,简单的管理措施,如保护耕作或梯田。农田尺度模型虽然未考虑气候条件、农田土地利用、土壤质地、水土管理措施等的空间变异性,但对于一定的气候、土地利用和土壤质地条件,它能够准确地描述和评价不同农业管理措施条件对土壤侵蚀和污染物转化运移过程的影响效果,是以GIS为基础研究大尺度规模分布式参数模型建模的基础,所以,至今农田尺度机理模型的发展和应用仍受到众多研究者的重视。以下简要描述较为有代表性的模型。

1) CREAMS (Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems)是由美国农业部于1980年提出的一个连续模拟模型,它首次对非点源污染的水文、侵蚀和污染物运移过程进行了系统的综合,奠定了非点源污染模型发展的里程碑^[4]。模型用于预测农田单元径流、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。径流计算采用径流曲线法(SCS曲线法);土壤剖面的水流运动采用简单的水量平衡方法,土壤含水量超过田间持水量时产生重力水流;土壤侵蚀采用USLE方法;化学物质将氮、磷和杀虫剂损失分为溶解态和沉积态,沉积态中还考虑了富集因子。模型最大的优点是不需要现场

数据校正,而是按现有的参数和一些估计值就可以运用,使模型的运行费用大大降低。

2) GLEAMS (Groundwater Loading Effects of Agricultural Management Systems)为农业管理模型CREAMS的改进^[5]。模型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。模型包括3个子模型:水文、沉积/侵蚀量和化学物质运移。化学物质运移子模型进一步分为农药和营养物。营养物子模型包括主要的氮过程:矿化、氨化、固化、挥发、硝化、反硝化、植物吸收、豆科植物的氮固定、径流和侵蚀的氮损失、根区以下的渗漏损失,以及磷过程:矿化、植物吸收、径流、泥沙和渗漏损失量。

3) DRAINMOD-N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,已经广泛应用于北美和其他地方。模型适用于湿润地区浅地下水位条件,可以研究多年的土壤水动态和氮素的转化运移^[6,7]。模型仅考虑土壤中简单的氮循环,控制过程包括降雨沉淀、氮肥溶解、有机氮的净矿化、反硝化、根系吸收、地表径流损失和地下排水硝态氮损失,未考虑氨挥发和硝化过程。模型的主要输入参数包括气象、土壤、作物、排水系统设计管理和氮素运移参数。最新版本的DRAINMOD-N-II已经拓展为可以描述有机肥料氮的转化和运移。

4) 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^[8],由LEACHN、LEACHP和LEACHC3部分组成。LEACHN用于氮和磷的转化和运移模拟;LEACHP用于农药运移和降解模拟;LEACHC用于无机化学离子运动的模拟,如Ca、Mg、Na、氯化物、硫酸盐、钾等。LEACHM要求的土壤参数包括土壤物理特性、容重、土壤颗粒分布、土壤持水特性;也要求有机肥或化学肥料中的氮含量和磷酸盐含量、日最大和最小温度、降雨量和蒸腾量。模型以天为时间步长,一个作物生长季节,也可应用于多年的模拟。

5) 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,可以模拟地下水位的变化和暗管排水条件,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^[9]。土壤水运动按小时计算,包括土壤水再分配、化学元素的运移、入渗和径流、农药淋洗、热运动、实际蒸发和蒸腾量、植物氮吸收、积雪的运动动态。模型将植物残体分为快和慢两种降解形式,将土壤有机物质分为快、中、慢3个降解池,模型也研究3类微生物:异养生物、自养生物和厌氧性生物。各降解池之间的转化

是复杂的, 模型结果对这些降解池的动态非常敏感。

6) EPIC(Erosion/Productivity Impact Calculator)最初被发展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、农药运动和它们的组合管理决策对土壤流失、水质和作物产量的影响^[10]。模型的物理成分包括水文、天气模拟、侵蚀/沉积、营养物质的循环、农药运移、植物生长、土壤温度、耕作和植物环境的调控。模型的最新版本可以评价化肥和有机肥料应用产生的营养物质损失, 气候变化对作物产量和土壤侵蚀的影响, 农药的淋洗和通过径流的损失。

此外, 还有 NLEAP, MANNER, SOIL-SOILN 等模型^[11-13], 这些模型主要用于模拟氮素动态。NLEAP能够迅速地评价农业措施变化产生的硝态氮淋洗量和对地下水的潜在威胁; MANNER 是一个决策支持系统, 能够快速评价有机肥中可利用的氮和损失量; SOIL-SOILN 是土壤水热运动模型 SOIL 和氮动态模拟模型的集成, 用于模拟土壤中的碳、氮动态。

以上所述模型的复杂程度及模拟的侧重点有其相似性, 又各有不同。CREAMS 模型作为一些非点源污染模型发展的基础, 其改进模型目前应用较为广泛, 如上所述的 GLEAMS 与 EPIC 模型均由 CREAMS 模型进化发展而来, GLEAMS 模型在 CREAMS 模型的基础上, 叠加了农药垂直通量模拟程序, 污染物更多地考虑了地下水中的农药负荷, 其主要特点是模拟不同管理措施对地下水中农药负荷的影响, 管理措施包括种植日期、作物类型、灌溉制度、耕作措施、肥料种类; 而 EPIC 模型侧重于预测管理决策对土壤侵蚀、水质和作物产量的效果, 评价土壤侵蚀对作物生产力的影响。GLEAMS 和 EPIC 模型只能隐含地模拟地下排水量, 即将根区以下的渗漏量与排水量进行对比, 目前这两个模型已经被很多研究者成功的应用于实际中。DRAINMOD-N 模型主要用于氮转化运移的模拟, 侧重于研究排水系统设计与管理对作物生长、各水文要素及氮动态的影响, 以及土壤水分胁迫对作物产量的影响, 水文模块采用简单的水平衡原理, 模型应用简单, 要求的输入参数较少, 已被广泛应用于各种气候、土壤和作物条件下的地表和地下排水及硝态氮损失预测, 模型适应于浅地下水埋深条件, 不能模拟土壤侵蚀及磷运移动态。RZWQM 模型主要特点是模拟不同农业管理措施对水质和作物产量的影响, 模型考虑了宏孔隙流和地下暗管排水, 但模型的物理过程、作物生长过程、营养物过程等都较为复杂, 所需参数较多, 一些参数如土壤有机物质快、中、慢降解池难于获得, 因此提高了模型率定的难度, 该模型也未考虑土壤侵蚀因素。LEACHM 模型在模拟土壤水和磷动态方面与 RZWQM 模型较为相似, 但在不同管理措施

的影响效果方面不如 RZWQM 模型, LEACHM 模型使用简单的经验方程描述作物生长, 不能预测作物产量。

由于土壤的空间变异性和观测数据质量等因素的影响, 观测的土壤和溶质运移参数与实际情况可能有较大的出入, 因此, 应用模型进行预测评价前, 首要任务是采用实测数据对模型参数进行充分的率定。氮磷等溶质运移动态与土壤水运动密切相关, 所以, 土壤水运动的预测精度直接影响溶质的动态特征, 关键的土壤参数有土壤水特征曲线、土壤有效孔隙率、土壤饱和含水率等, 如果需要模拟地下排水量, 准确确定侧向土壤饱和导水率则是关键。大多数模型描述溶质动态的参数较难获得, 目前多采用文献中提供的经验参数通过模型率定来确定, 由于参数的不确定性, 不同的用户可能对同一模型的性能得出不同的评价。一些研究者对不同的模型进行对比研究表明^[14,15], 由于参数的不确定性, 尤其是难以直接获取的参数, 对于相同的田间实测数据和模型来说, 不同的用户在模型参数率定过程中确定的参数差异可能很大, 对模型的性能评价也不同, 其中主观性起了较大的作用。因此, 模型用户不仅对模型的功能结构应有较全面的了解, 还应尽可能的得到较为齐全的、精度较高的观测数据, 在无法获得田间有关的溶质转化运移参数时, 应较为客观的对参数的取值进行分析和判断。

2.2 流域尺度模型

随着计算机技术的快速发展和 3S 技术在流域研究中的广泛应用, 以 ArcView(GIS) 为平台面向事件的分布式参数流域模型被开发出来, 模型将流域内的土地利用、水文、土壤等离散化为相对一致的网格来解决空间的变异性, 增加了资料预处理、后处理和可视化等功能, 使得非点源污染模型更逼近环境过程的真实性。其中比较著名的有美国农业部农业研究所开发的 AGNPS 及其改进版 AnnAGNPS, 美国国家环保局开发的 SWAT, BASINS 模型等, 其中 BASINS 模型集成了 SWAT, HSPF, PLOAD, QUAL2E 等模型。

1) AGNPS (Agricultural Nonpoint Pollution Source) 模型用于研究点源和非点源污染物对地表水和地下水质的潜在影响, 适用于集水面积在 200 km^2 以下的流域^[16], 定量估计来自农业区域的污染负荷, 评价不同管理措施的效果。模型可以模拟集水区单降水事件的径流、侵蚀、沉积和化学物质输移。其后模型作了许多改进, 改进版之一 AnnAGNPS 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。径流计算采用 SCS 曲线法; 侵蚀速率和侵蚀量的计算采用了改进的土壤侵蚀计算方法(RUSLE); 化学物质运移计算模式中假设氮、磷等养分溶于地表径流后便不

再有所消耗,模型认为污染物在土壤中的含量是恒定的,所以相对其他的流域模型来说,模型所需参数较少,每一网格需要 21 个参数,有些参数可通过专业数据库查取,有些可通过模型提供的参数表获得。

2) SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 为流域尺度模型,可以预测不同的土壤、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^[17],包括产流、坡面汇流和河道汇流,既可应用于以农业为主的集水区,也可帮助水资源管理者评价水质、营养物和杀虫剂等非点源污染和相应的管理措施。模型也模拟河流内的生物和营养物的变化过程,包括藻类的生长、死亡和沉积,水中的溶解氧,通气和光合作用,水温变化等。径流计算采用 SCS 曲线法;侵蚀速率和侵蚀量的计算采用了改进的土壤侵蚀计算方法 (RUSLE)。地下水的处理方式仍然是一维的、概念性的,没有考虑到不同子流域之间的地下水流动关系。模型可以模拟 5 种形态的氮和磷,包括矿质态和有机态氮磷,但模型所需的参数较多。

3) BASINS (Better Assessment Science Integrating Point and Nonpoint Sources) 是一个流域尺度的、多目标的环境分析模型^[18],能够快速评价和分析大量点源和非点源污染物、河流或整个流域的水质状况。模型集合了环境数据、分析工具和各种模拟模型开发水环境保护的方法,包括流域负荷和传输模型 (HSPF, SWAT), 污染物负荷模型 (PLOAD), 稳态水质模型 (QUAL2E)。其中 HSPF 是一个模拟多种常规和有毒有机污染物质的流域水文和水质模型^[19],它模拟长时间透水、不透水土地和河流内的水文及相关的水质变化。PLOAD 用于计算流域的污染物负荷量,主要分析年平均的非点源污染负荷,用户可以指定任意的污染物,在计算流域总负荷时,可以使用减少非点源负荷和点源负荷的最佳管理措施^[20]。QUAL2E 是一个应用较为广泛的一维河流水质模型,适用于模拟混合良好的枝状河流,可以研究污染负荷的量、发生地点和河流的水质,同时模拟 BOD、DO、温度、有机氮、铵氮、硝氮、有机磷、溶解性磷等 15 种水质参数^[21]。

AGNPS 和 SWAT 模型在国外已经得到了广泛的研究和应用,在模型的校准、参数的灵敏度分析、划分网格大小的影响等方面都有深入的研究,应用中也取得了较好的效果,如应用 AGNPS 模型研究不同农业管理措施对防治农业非点源污染的作用与效果、不同的水土保持方法对减少土壤潜在侵蚀的作用、土地利用和耕作措施对农业非点源污染的影响等,但模型没有考虑对地下水的模拟。SWAT 模型在水资源管理、流域规划、气候变化的水文效应,以及非点源污染方面的应用研究都是

比较成功的,相对而言,SWAT 模型对短期(月)的径流、侵蚀量、化学物质流失等的模拟精度较差,但可以较好的预测长期(年)的各水文要素,由于未考虑不同子流域之间的地下水流交换,在地下水补给丰富的流域,地下水营养物负荷的预测精度也将受到影响。BASINS 模型以 Arcview 软件为平台,成功地结合了不同的过程模块,为模型与模型之间的数据调用、联合工作提供了很好的平台,大大增强了系统的模拟能力,提高了模型效率。由于 BASINS 模型必须借助 Arcview 软件运行,其运用成本相对较高,模型所包含的水质评价模型(如 SWAT, PLOAD 等)的不足并未得到改进,在缺少资料的国家,还需要人为做大量复杂而繁重的数据收集、链接和在线更新工作等等。

流域尺度模型在中国的应用刚刚起步,其中 AGNPS 和 SWAT 模型已经被一些研究者多次应用。AGNPS 模型已经成功的应用于中国南方的一些小流域,结果显示该模型在这些地区的农业非点源负荷估算及评价中的应用潜力^[22-24]。SWAT 模型在中国的研究热点主要集中在水文、产流产沙和水土保持等方面^[25-27],在非点源化学物质污染中的研究和应用鲜有报道。受到基础数据等因素的限制,BASINS 模型在国内的应用尚未见报道,模型中集合的 HSPF 和 PLOAD 模型在国内的应用尚不多见,而一维河流水质模型 QUAL2E 已经得到多次应用。基于 RS 和 GIS 空间数据信息的流域尺度模型,为中国非点源污染管理与控制提供了有效的技术支持,由于模型具有严格的数据要求,而中国基础数据的普遍匮乏势必使其在中国流域管理中的推广和应用受到限制,因此如何利用遥感和 GIS 技术获取模型的运行参数,建立研究区的基础地理信息库,应作为流域尺度模型在国内应用研究的一个方向。

3 国内农业非点源污染预测及模型研究

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。研究方法上,更多地借鉴了国外的经验,在不断的探索中逐渐形成了一些有特色的理论和方法。在化学物质通过地表侵蚀和地表径流运移方面,刘枫等首次将通用土壤流失方程用于中国非点源污染的危险区域识别^[28];施为光以四川清平水库为例,用水文学方法找出典型水文年河水中地下径流成分,然后分割出壤中流和地面径流,再根据实测的水质水量资料计算流域非点源污染负荷^[29];张水龙等以典型农业小流域为例,借助于模型,分析了辽西易旱区农业非点源污染形成的规律,着重分析了降雨—地表径流—土壤三者之间的相互作用^[30];黄俊等通过对滇池流域典型区域多年暴雨径流、

化学物质构成等实测资料的统计及相关分析, 阐明了暴雨径流与氮、磷及固态污染物输移的时空分布特征^[31]; 黄满湘等采用田间模拟降雨径流试验研究了北京地区农田暴雨径流氮素流失与雨强、作物、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^[32]。在土壤中化学物质的转化和淋失研究方面, 冯绍元将土壤溶质运移理论和土壤微生物化学、植物生理学相结合, 建立了一维饱和非饱和土壤-水-作物系统中氮素转化、运移与吸收的综合数学模型^[33]; 张瑜芳等进行了排水条件下氮肥运移、转化规律的研究, 在水流和氮素运移理论和数值模拟研究基础上提出了排水条件下氮素转化、运移和流失的简化计算方法^[34]; 张思聪等应用 LEACHM 模型对唐山农业地区灌溉施肥条件下氮素在土壤中的转化运移进行了分析^[35]; 马军花等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及干物质产量进行了模拟, 并对两小区 165cm 处硝态氮淋失量的模拟计算结果进行了对比^[36]。此外, 一些研究学者通过田间试验, 建立了作物产量与施肥等影响因子的经验关系模型^[37-39]。

由于受到所采取的量化尺度的影响, 迄今为止, 较多的研究和模拟预测仍是在点或小区尺度上进行的一维垂直方向上水和无机氮肥的运移描述和预测模型, 并侧重于耕作层化肥运移规律和氮肥利用率的研究; 在肥料流失方面, 侧重于通过地表径流和土壤侵蚀的流失, 对氮素淋失到地下水后, 如何通过地下排水系统排入地表水体, 从而对农业环境产生污染的过程鲜有定量的描述。

4 农业非点源污染预测模型研究发展趋势

农业非点源污染转化运移过程涉及空气、水、土壤等多介质、多相物质中的转化和运移机理, 与自然环境因素、农业管理措施和工程技术措施等均有很大的关系, 是一个多层次、多目标、实时性与时间性日趋灵敏的多因素相互影响的复杂系统。虽然在氮、磷等的运移机理和控制措施方面已经做了大量的室内和田间试验, 但由于影响因素众多, 不同的研究针对某一特定地区, 并侧重于一个或几个影响因素, 很难全面反应田间的实际情况。此外, 国内在氮磷等污染物对地下水水质影响模拟计算方面的研究尚欠缺, 由于局部地下水流是溶质运移到地表的主要传输途径, 对于浅地下水埋深地区的溶质运移而言, 排水可以减小地下水系统的溶质负荷, 并且可能大大影响土壤系统的溶质平衡, 土壤水的滞留时间也与排水系统的布局有很大关系, 因此, 必须考虑流向排水系统的水量和溶质负荷。

影响氮磷等非点源污染转化运移因素和过程的复杂性使得不同农业管理措施对环境影响的评价既费时又耗资, 而计算机模型的发展以高效和低廉的方式为评价不同田间农业措施条件下的水土效应提供了机会, 作为大尺度规模分布式参数模型建模的基础, 农田尺度机理模型仍是今后非点源污染预测模型研究的一个方向, 结合田间氮磷等转化运移和控制技术的试验研究, 以农业生产活动、土壤、作物、地表水、地下水以及灌排工程为一体来研究非点源转化运移流失预测评价模型显得尤为重要, 研究应从以往侧重于农业生产发展的单目标研究转换为农业生产和减少对农业环境污染相结合的角度探讨污染物运移机理、特征、定量评价和控制措施。近年来, 从传统农业到有机农业的转换已经被作为一个减少氮流失的可行方式, 有机农业的发展, 也将使氮模拟模型从无机肥料氮的模拟预测向有机或无机肥料氮模拟预测方向拓展。随着 3S 技术的发展和运用, 将 3S 技术与非点源污染预测模型相结合是今后该研究领域中的热点研究问题之一, 特别是流域或灌区大范围尺度下的土地利用、土壤质地、灌排措施、农业措施等空间变异性对氮磷等非点源污染物转化运移的综合效果评价, 以及如何通过遥感影像精确提取水土环境数字化信息, 以便提高基础数据的精确度。由于非点源污染过程十分复杂, 人们对它的理解仍然十分有限, 模拟中存在多种误差, 使得非点源污染预测模型具有很大的不确定性, 不确定性分析是近年来在数学模型研究中十分活跃的一个领域, 已经形成较为完善的方法体系, 它也将成为非点源污染预测模型未来令人感兴趣的研究方向之一。

[参 考 文 献]

- [1] 胡雪涛, 陈吉宁, 张天柱. 非点源污染模型研究[J]. 环境科学, 2002, 23(3): 124-128.
- [2] 王艳芳. 土壤氮素转化与运移理论的研究进展[J]. 宁夏农学院学报, 2004, 25(1): 53-56.
- [3] 任理, 马军花. 考虑土壤中硝态氮转化作用的传递函数模型[J]. 水利学报, 2001, (5): 39-45.
- [4] Knisel W G. CREAMS: a field scale model of chemicals, runoff and erosion from agricultural management svstem [R]. Report No. 26. ARS, USDA, 1980.
- [5] Knisel W G, Davis F M, Leonard R A, et al. GLEAMS version 2. 10. USDA - ARS, Coastal plain [R]. Experiment Station. Southeast Watershed Research Laboratory. Tifton, Georgia, 1993.
- [6] Skaggs R W. DRAINMOD reference report [R]. Interim technical release, Biological and Agricultural Engineering Department, North Carolina State University, Raleigh NC, 1989.
- [7] Breve M A, Skaggs R W, Parsons J E, et al. DRAINMOD-N, a nitrogen model for artificially drained soils [J].

- Transactions of the ASAE, 1997, 40(4): 1067– 1075.
- [8] Hutson J L, Wagenet R J. LEACHM: leaching estimation and chemistry model: a process based model of water and solute movement transformations, plant uptake and chemical reactions in the unsaturated zone [R]. SCAS Research Series No. 92– 3. New York: Cornell University, Ithaca, NY, 1992.
- [9] Ahuja L R, DeCoursey D G, Barnes B B, et al. Characteristics of macropore transport studied with the ARS root zone water quality model[J]. Transactions of the ASAE, 1993, 36: 369– 380.
- [10] Chung S W, Gassman P W, Kramer L A, et al. Validation of EPIC for two watersheds in southwest Iowa[J]. Journal of Environmental Quality, 1999, 28: 971– 979.
- [11] Shaffer M J, Halvorson A D, Pierce F J. Nitrate leaching and economic analysis package (NLEAP): Model description and application[A]. Follett R. F., Keeney D R, Cruse R M. Managing nitrogen for groundwater quality and farm profitability[C]. Madison, WI: Soil Science Society of America, 1991: 285– 322.
- [12] Chambers B J, Lord E I, Nicholson F A, et al. Predicting nitrogen availability and losses following application of organic manures to arable land: MANNER[J]. Soil Use and Management, 1999, 15: 137– 143.
- [13] Johnsson H, Bergstrom L, Jansson P E, et al. Simulated nitrogen dynamics and losses in a layered agricultural soil[J]. Agric Ecosyst Environ, 1987, 18: 333– 356.
- [14] Vanclooster M, Boesten J J T I, Trevisan M, et al. A European test of pesticide-leaching models: methodology and major recommendations [J]. Agricultural Water Management, 2000, 4: 1– 19.
- [15] Tiktak A. Application of pesticide leaching models to the Vredepeel dataset II pesticide fate [J]. Agricultural Water Management, 2000, 4: 119– 134.
- [16] Young R A. AGNPS: A non-point source pollution model for evaluating agricultural watersheds[J]. J Soil and Water Conservation, 1989, 44(2): 168– 173.
- [17] Neitsch S L, Arnold J G, Kiniry J R, et al. Soil and water assessment tool user's manual: Version 2000[R]. Temple, Texas: Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station, 2001.
- [18] Lahlou M, Shoemaker L, Paquette M, et al. Better assessment science integrating point and non-point sources, BASINS Version 1.0 User's Manual[R]. EPA 823-R-96-001. U. S. Environmental Protection Agency, Office of Water, Washington, DC, 1996.
- [19] Bicknell B R, Imhoff J C, Kittle J L, et al. Hydrological simulation program FORTRAN user's manual for release 11 [EB/OL]. <http://www.epa.gov/waterscience/basins/bsnsdocs.html>, 1996.
- [20] USEPA. PLOAD Version 3.0– An Arc/View GIS tool to calculate non-point sources pollution in watershed and storm water project, User's manual[EB/OL]. http://www.epa.gov/waterscience/basins/b3docs/PLOAD_v3.pdf, 2001.
- [21] 张智, 李灿, 曾晓岚, 等. QUAL2E 模型在长江重庆段水质模拟中的应用研究[J]. 环境科学与技术, 2006, 29(1): 1– 3.
- [22] 陈国湖. 农业非点源污染模型 AGNPS 及 GIS 的应用[J]. 人民长江, 1998, 29(4): 20– 22.
- [23] 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.
- [24] 赵刚, 张天柱, 陈吉宁. 用 AGNPS 模型对农田侵蚀控制方案的模拟[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2002, 42(5): 705– 707.
- [25] 王中根, 刘昌明, 黄友波. SWAT 模型的原理、结构及应用研究[J]. 地理科学进展, 2003, 22(1): 79– 86.
- [26] 张雪松, 郝芳华, 杨志峰. 基于 SWAT 模型的中尺度流域产流产沙模拟研究[J]. 水土保持研究, 2003, 10(4): 38– 42.
- [27] 陈军峰, 陈秀万. SWAT 模型的水量平衡及其在梭磨河流域的应用[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2004, 40(20): 256– 270.
- [28] 刘枫, 王华东. 流域非点源污染的量化识别方法及其在桥水库流域的应用[J]. 地理学报, 1988, 43(3): 329– 339.
- [29] 施为光. 四川省清平水库流域非点源污染负荷计算[J]. 重庆环境科学, 2000, 22(2): 33– 36.
- [30] 张水龙, 庄季屏. 辽西易旱区典型小流域农业非点源污染形成的规律[J]. 水土保持学报, 2001, 15(3): 81– 84.
- [31] 黄俊, 张旭, 彭炯, 等. 暴雨径流污染负荷的时空分布与输移特性研究[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(2): 255– 258.
- [32] 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.
- [33] 冯绍元. 排水条件下饱和和非饱和土壤中氮素运移与转化规律的研究[D]. 武汉: 武汉水利水电大学, 1993.
- [34] 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.
- [35] 张思聪, 吕贤弼, 黄永刚. 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, 1999, 30(5): 6– 8.
- [36] 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.
- [37] 孟军, 任喜英, 葛家麒. 有机肥对玉米生产效应的研究[J]. 东北农业大学学报, 1999, 30(3): 235– 239.
- [38] 王栓全, 刘冬梅, 张成娥, 等. 陕北新修梯田地膜小麦优化施肥栽培模式研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2001, 29(6): 18– 21.
- [39] 丁丽. 毕节市小麦微机优化配方施肥数学模型初探[J]. 贵州农业科学, 2004, 32(2): 16– 17.

Advances in the prediction models of agricultural non-point source pollution

Wang Shaoli^{1,2}, Wang Xingkui¹, Xu Di²

(1. *Key Laboratory of Water and Sediment Science of Ministry of Education, Tsinghua University, Beijing 100084, China;*

2. *China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044, China*)

Abstract: Agricultural non-point source pollution is a kind of complex process with the characteristics of intermittent, random, sudden and uncertain emergence. Thus, the modeling study is an important content in the field of non-point source pollution at all times. This paper reviews the development of the prediction model of agricultural non-point source pollution, briefly illustrates the function and research advances of foreign agricultural non-point source models at the field scale and watershed scale, discusses the prediction, model development and available problems of non-point source pollution in China. It is proposed that the study of pollutant transport and prediction model should be based on the point of view of integrated agricultural production and water environmental protection. And one of main contents of non-point source pollution is to consider the uncertain characteristics of non-point source pollution and to combine 3S techniques with non-point source model.

Key words: agricultural non-point source; pollution; prediction model; GIS