

基于氮素流失对非点源污染研究的述评

陈志凡¹, 赵 焯²

(1. 河南大学环境与规划学院黄河文明与可持续发展研究中心, 开封 475001;

2. 北京师范大学地理学与遥感科学学院, 北京 100875)

摘 要:从世界范围看,非点源污染已成为水环境污染的主要形式,而农田土壤的氮素流失是非点源污染的重要表现形式。以氮素流失研究作为基点,从研究内容、方法及模拟模型等几方面介绍了国内外非点源污染的研究现状,并分析了其未来的发展趋势。

关键词:非点源污染;氮素流失;模拟模型

中图分类号:X53;S153.61

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2006)04-0049-05

Study Progress on Non-point Source Pollution Based on Loss of Nitrogen

CHEN Zhi fan¹, ZHAO Ye²

(1. Research Center of Yellow River Civilization and Sustainable Development,

College of Environment and Planning, Henan University, Kaifeng 475001, China;

2. School of Geography and Remote Sense, Beijing Normal University, Beijing 100083, China)

Abstract: For the whole world, non-point source pollution has become the major ways of water environmental pollution, while loss of soil nitrogen in fields is important ways of non-point source pollution. Based on loss of nitrogen, the study progress on non-point source pollution is presented, including contents, methods, modeling models and so on, and its development trends are analyzed.

Key words: non-point pollution; loss of nitrogen; modeling model

1 引 言

非点源污染(Nonpoint Source Pollution, NPS)是指溶解性的或固体污染物在大面积降水和径流冲刷、下渗、灌溉以及大气沉降等过程的作用下汇入受纳水体而引起的水体污染(Novotny 和 Olem, 1993)。非点源污染主要表现为氮、磷等植物养分、农药、重金属及盐类等,通过地表径流与下渗过程,不仅加重了湖泊、水库及海湾等水体的富营养化,并且其在土壤中的逐渐积累也构成了对地下水的极大威胁,从而引起众多地表水和地下水中污染物含量超标,导致水质严重恶化。

从世界范围看,非点源污染(Nonpoint Source Pollution)已成为水环境污染的主要方式,也是危害全球环境的一个重要因素。据有关资料统计,美国 60% 的地表水污染是由非点源污染引起的;在奥地利北部地区,据估算进入水环境的非点源氮量远比点源氮量大;荷兰由农业非点源排放的 TN、TP 分别占水环境污染总量的 60% 和 40%~50%;在丹麦 270 条河流中 94% 的氮负荷、52% 的磷负荷来源于农业非点源^[1~3]。而在我国,随着农业非点源排入江、河、湖、库的氮、磷等营养物质的不断增加,近年来水体富营养化程度加快。据统计,国内的 131 个主要湖泊中,已达富营养化程

度的湖泊有 67 个,占 51.2%。从以上非点源污染的案例中可以看出,氮素流失已成为非点源污染的重要形式^[4~6]。因此,本文以氮素流失作为基点来探讨非点源污染的研究进展。

2 研究内容概述

纵观国内外对非点源污染的研究,可以看出当今有关氮素的非点源污染研究主要集中在以下几个方面:氮素的污染特征及其影响因素;氮素流失的影响因素及其相关性分析;氮素的迁移转化规律;氮素的时空分异规律以及非点源污染的管理和控制等。

对氮素污染特征与影响因素的研究主要包括水环境中氮素污染的来源、氮素污染的特征及其影响因素。氮素污染的主要来源是化肥的施用、固氮作物的种植、农业产品的净输入和化石燃料的燃烧等。氮素污染的特征主要是指其可能产生的危害性,如水体中氮过量,会使藻类大量繁殖、富集,出现富营养化现象,大量消耗水中的溶解氧。产生氮素污染的主要影响因素在某种程度上与氮素污染的来源是一致的。

氮素流失的影响因素及其相关性分析研究主要有以下

* 收稿日期:2005-07-11

作者简介:陈志凡(1979-),女,硕士,研究方向为环境演变及环境诊断;通讯作者:赵焯(1963-),男,教授,研究方向为土地利用变化及生态环境影响评价。

几方面:一是径流中硝态氮浓度和农业土地利用状况之间的关系^[7,8]。通常情况下,流域内土地的利用结构不同,氮素的排出量也会不同,如土地中农田所占的比例越大,那么氮素的排出量也就越大^[8-10],如 Jordan T. E. 等在 1997 年通过做氮素排出量与农田所占比例的回归模型估算表明:农田氮素排出速率为 $18 \text{ kg N}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,而非农田氮素排出速率仅为 $2.9 \text{ kg N}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$;又如 Fisher 等 1991 年对美国弗吉尼亚州东南部的切萨皮克(Chesapeake)湾氮输入量进行综合估算表明:农田为 $20 \text{ kg N}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,牧草地为 $5.8 \text{ kg N}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,林地地 $1.4 \text{ kg N}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ^[9]。因此,农业土地利用方式在许多养分流失经验模型中被作为一个重要的影响因子考虑^[8]。二是氮素的扩散过程与陆地水流机制之间的关系,即水的流速越快侵蚀越严重,这样可能导致氮素的传输过程加快,同时快速的渗透与地下水的流动也会在一定程度上加快硝酸盐的传输过程^[11]。三是径流河道的大小对氮素传输过程的影响^[12,13];四是硝态氮的淋失率对氮肥施用频率、排水深度或排水间隔的响应^[4];五是气候条件对硝态氮浓度的影响^[9,10]等。

相对来说,关于氮素的迁移转化规律目前研究尚不多,且主要集中于研究氮素在单一区域内的迁移转化规律,尤其是氮素在水体中的迁移转化规律研究较多,其它单一区域中氮素的迁移转化规律研究则较少,如氮素在森林土壤中的转化和淋失等^[5]。同时把流域作为一个整体来研究氮素由一种介质向另一种介质迁移转化的过程也比较少。

氮素的时空分异规律研究主要体现在以下几方面:一是氮素在流域内的空间分异状况;二是不同季节、不同时段氮素的浓度变化;三是预测农业非点源污染的综合空间过程模型^[14](Gowda. P. H., 1996)等。

经过多年的实践与研究,关于氮素非点源污染的管理和控制已取得较大进展,其中以美国的“最佳管理措施(Best Management Practices - BMPs)”最具代表性^[15]。该措施是在了解土壤中氮素迁移转化规律的基础上,提倡运用非生物工程、生物工程措施来削减非点源污染,并且它在部分工程设计标准、效果评价和经济效益分析方面取得了一定进展。如在“最佳管理措施”思想主导下,美国政府和环保部门通过建立全国范围的水质评价、水资源数据库和地理信息系统,为不同规模、不同层次的水资源规划和非点源控制提供了相应的情报和信息;同时还在不同层次、不同性质的部门设立非点源监测管理机构,管理监测非点源污染的起源、变化及形成机制,以便及时削减非点源污染。由于 BMPs 高效、经济且符合生态学原则,因此在非点源污染控制中日益受到重视,并且在全世界范围内得到了广泛应用。如美国马里兰州和美国田纳西流域非点源污染治理项目等就是成功应用 BMPs 的案例^[16]。

3 研究方法与技术

3.1 NPS 模拟模型研究

关于非点源污染的研究方法,主要体现在对其进行实地监测和建立计算机模拟模型两个方面。这两种方法均能够跟踪监测或模拟化学元素流失对环境的影响过程,并对非点源污染控制技术的有效性进行相应评价。但是实地监测往往受限于多个因素,如土壤、地质地貌、气候、作物种类以及耕作制度等。因此,在实施实地监测时必须了解上述因素对氮素迁移转化过程的影响。然而在实际研究过程中,对上述因素的各种状况都进行实地观测显然是不可能的,因此借助于计算机和 GIS 技术来建立流域内氮素迁移转化过程模拟

模型则更具可行性^[17]。20 世纪 80 年代以来,国内外学者对非点源污染模拟模型进行了大量的研究,许多以农田和水流域为尺度的模拟模型应运而生,它们被广泛用于流域规划、环境影响评价、选择最佳的农业管理模式等方面。如著名的关于农业管理系统中的化学污染物径流负荷和流失模型 CREAMS (Knisel, 1980),GLEAMS (Leonard 等, 1987), NLEAP (Shaffer 等, 1991) 和 LEACHM (Hutson 等, 1992), 以及用于农业非点源管理和政策制定的农业非点源污染模型 AGNPS (Young 等, 1987) 与 SWAT (Srinivasan 和 Arnold, 1994) 均在实际应用过程中取得了良好的效果^[18-19]。

3.1.1 以预测污染物迁移转化规律为中心的 CREAMS 及 GLEAMS 等模型

1980 年,美国农业部为了深入了解化肥和农药在土壤中的迁移规律,在详细调查并分析区域水文特征、土壤性状及环境影响的基础上,创建了能够连续模拟植物营养元素在土壤-水系统中迁移转化规律的 CREAMS (Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems) 模型 (Knisel, 1980), 该模型包括水文、侵蚀和化学物质流失三个子模型。其中,在水文模型中需输入的数据有径流量及土壤的渗透率;侵蚀及泥沙流失模型采用的是运输能力等参数及 USLE 方程;在化学物流失模型中将氮、磷和杀虫剂损失分为溶解态和沉积态两种形式考虑。CREAMS 模型最大的优点是应用时不需要进行现场数据校正,采用现有的参数和一些估测值就可以操作,并且模型的操作费用较低;同时它还能与经济分析相结合,比较分析不同农业生产条件下的土壤流失量、化学物流失量和净收益。因此,CREAMS 模型提供了一整套用于评价不同农业管理措施对控制化学物质流失作用的有效方法。如在实际应用过程中,Williams 等把它与水蚀预测模型 (WEPP) 结合起来,用以评价植被过滤带对土壤侵蚀、营养元素迁移和截留的作用;Cooper 等应用它模拟营养元素在土壤中的迁移规律和变化范围,并取得了较好的效果^[19,20]。

GLEAMS (Groundwater Loading Effects of Agricultural Management Systems) 是一个以田块为尺度、具有连续模拟功能的计算机程序模型 (Leonard 等, 1987; Knisel, 1993), 它是经过良好验证的 CREAMS 模型的修订版,包括水文、侵蚀与沉积及化学物迁移四个部分。该模型在假定一个田块尺度内土地利用状况单一、土壤匀质、降雨均匀及耕作措施单一的基础上,用于评价管理措施对潜在的杀虫剂与养分淋失的影响。如 1995 年 Searing 等依据 GLEAMS 模型,为一个采用地理信息系统鉴定的流域内的关键区域确定了最好的管理措施。

ADAPT (Agricultural Drainage and Pesticide Transport) 模型是一个农业排水系统和农药迁移的计算机模型,它是从水资源的管理系统角度研制开发的一个日幅度农田尺度模拟模型,用来模拟农药、泥沙、养分的流失数量和质量,是 GLEAMS 模型的延伸和扩充。其增强功能主要体现在:在 GLEAMS 运算法则中增加了地下排水、地下灌溉和深层渗流算法;补充了一个改进的、潜在的蒸散方法;根据每天土壤水的含量用于一个修改的 SCS (Soil Conservation Service) 水文曲线指数的径流模型;根据湿润锋的吸力作用包含了 Green 和 Ampt 的渗出模型;雪融化模型;根据经验过程说明了大孔隙流动问题。ADAPT 模型有四个组成部分:水文学、侵蚀、养分和杀虫剂的传输。模型的水力学成分包括:融雪、地表径流、大孔隙流动、土壤水分蒸发蒸腾损失总量、渗透、地下排水、地下灌溉和深层渗流等。ADAPT 模

型所需的气象资料有降雨量、气温、风速、相对湿度和一定持续时间内太阳辐射^[4]。D. M. Davis 等于 2000 年在美国中西部温带半湿润地区即明尼苏达南部地区,运用 ADAPT 模型估计了典型管道灌溉条件下氮肥施用率、管道灌溉间距和灌溉深度对土壤中 NO₃ - N 流失的影响。

3.1.2 用于非点源管理与决策的 AGNPS 及 SWAT 等模型

AGNPS(Agricultural Non - point Source)模型是建立在地表径流模型的基础上,专门为决策者和管理部门研制的一种农业非点源污染模型,它可对小至数公顷的小流域、大至 2 万多 hm² 的大型农业流域进行非点源污染预测。该模型包括水文、侵蚀与沉积、化学物迁移三个部分。它一般用来模拟农业流域中的径流、沉积和养分输移过程,其中,在营养物质中主要考虑的是引起非点源污染的氮元素和磷元素。AGNPS 模型与 CREAMS 模型相比较,主要改进之处在于充分考虑并控制了空间变异对水分、泥沙及养分迁移和输出的影响,这些影响对评价和控制农业非点源污染是至关重要的。AGNPS 模型以网格为基本运行单位,这里的网格是指为了方便在流域内各点进行研究以相同尺寸将流域划分出来的小方格,如图 1 所示:图中显示了一个包含 26 个单元总面积为 308 hm² 的典型小流域,每个单元面积约为 16 hm²,单元中箭头指示的是物质迁移方向。非点源污染物从某一污染源转移至流域出口的过程中,其路线相对稳定并通过若干网格,人们只需分别对各网格进行监测和研究即可了解全流域的非点源污染状况。这相对于以前的口袋法即以流域出口的监测指标来预测全流域的污染状况已经是一个很大的进步。在实际应用中,AGNPS 模型主要被用来区分某一流域中的不同区域在水质问题潜在严重性上的优先次序,查明该流域内促成污染的关键区域,并对不同管理措施的有效性进行评价^[19~21]。目前,该模型已先后在美国的几个州进行了应用,并得到了不断完善。

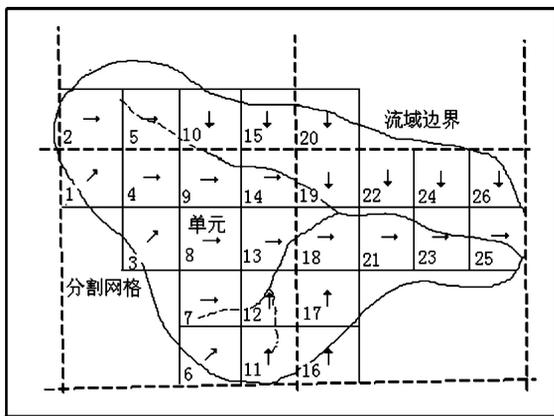


图 1 AGNPS 网格监测法示意图

土壤侵蚀和生产力影响估算模型 EPIC(Erosion Productivity Impact Calculator)(Williams 等,1984)是美国研制的定量评价“气候 - 土壤 - 作物 - 管理”综合连续的系统动力学模型^[22]。该模型能够以天为时间步长,模拟气候变化、径流与蒸散、水蚀与风蚀、养分循环、农药迁移、植物生长、土壤管理、经济效益分析等过程与环节。EPIC 模型已在美国和其他许多国家得到了广泛的应用,如 1995 年 Virginia 等证明了使用 EPIC 模型对农业区 NO₃ - N 进行深入分析的意义,他们评价了 120 个随机挑选的曾经进行过调查的农田,在这些农田中使用 EPIC 模型鉴别农作物管理和与 NO₃ - N 流失相关的土壤特性,并对各种粪便和化肥施用中

的 NO₃ - N 流失变化速率进行了估算^[4]。同时以 EPIC 模型为核心,开发出了土壤与水分评价工具 SWAT、流域土壤与水分资源管理模型 SWRRB 等,广泛应用于水土资源利用规划与管理评价研究中,其社会效益与生态效益十分显著^[22]。

SWAT(Soil and Water Assessment Tool)是美国农业部(USDA)开发的流域尺度的分布式模型,用于模拟预测长期土地管理措施对于具有多种土壤类型、土地利用和管理条件的大面积复杂流域的径流、泥沙负荷和养分流失的影响^[23],该模型对径流和泥沙负荷的预测能力在美国已得到广泛验证^[24]。如 Yildirim 等 1997 年使用 SWAT 模型对美国 Shelton 东北部具有不同氮肥施用率的各种农业管理措施的变率技术进行了评估,取得了良好效果。

3.2 3S 技术在非点源污染研究中的应用

早在 20 世纪 80 年代,国外在研究建立新的应用型非点源污染模型的同时,就重点加强了 3S 技术在非点源污染定量负荷计算、管理和规划中的应用研究^[1],并且一直是国外非点源污染研究的热点。20 世纪 90 年代之后,随着计算机技术的飞速发展和地理信息系统(GIS)、遥感(RS)、全球定位系统(GPS)“3S”技术的广泛应用,非点源污染模型的研究有了很大进展。利用“3S”技术获取非点源污染监测和模拟所需的参数信息,结合有关模型模拟非点源污染过程,能够及时准确地反馈污染情况,给决策和制定方案带来方便,解决了难以获取所需的大量空间和时间信息的难点。其中比较著名的是美国环保局开发的 BASINS(Better Assessment Science Integrating Point and Nonpoint Sources)模型(Lahlou 等,1998),它是集空间处理技术、数据库技术、数学计算、可视化等多功能于一体的环境分析系统^[25,26];再如上述所提到的 SWAT 模型即是一种基于 GIS 基础之上的分布式流域水文模型,它能够利用遥感和地理信息系统提供的空间信息模拟多种不同的水文物化过程,尤其在非点源污染、水土流失、土地利用和农业管理等研究领域得到广泛应用。现在 SWAT 模型的最新版本 AVSWAT2000 已嵌入到了 ArcView 之中,安装之后成为 ArcView 的一个扩展模块,其界面可视效果良好,且易于操作^[27~30];同时,通过 Arcview - GIS 界面,采用 GLEAMS 模型,可以支持评价农田径流和沉积中杀虫剂的负荷量^[31]。

4 国内非点源污染研究现状

国内非点源污染研究始于 20 世纪 80 年代早期,主要是关于农业非点源和城区径流污染的宏观特征与污染负荷定量计算模型的初步研究。基于接纳水体水质分析,计算汇水区农业非点源污染输出量的经验统计模型在这一时期发展较快并得到广泛应用。在此期间,通用土壤流失方程首次在国内用于非点源污染的危险区域识别研究中。进入 90 年代,国内的非点源污染研究更加活跃。农药、化肥污染的宏观特征、影响因素研究和黑箱经验统计模式继续在农业非点源污染研究中占据重要席位。将农业、城市非点源污染负荷模型与 3S 技术结合、与水质模型对接用于流域水质管理,已成为农业、城市非点源污染研究的新增长点。并且生物污染、大气沉降等非点源污染的研究也有一定进展。该时期的首要成就当推李怀恩等的机理型流域暴雨径流响应模型,它要求参数少、应用范围广,适合国内目前资料短缺的非点源污染研究现状,但其应用、推广有待接受后期检验。

国内对非点源污染的模型研究主要体现在两个方面:一是对国外非点源污染模型的研究与应用。如:陈国湖^[32]提

出了用遥感技术和 GIS 为 AGNPS 模型输入基本参数的方法;赵刚等^[33]将 AGNPS 模型与 GIS 技术相结合,在云南省捞鱼河小流域试验区模拟评价了几种常用的侵蚀控制措施的效果。结果表明,AGNPS 模型可以为制定流域侵蚀控制规划提供有价值的参考;王飞儿等^[34]应用 AnnAGNPS 模型对千岛湖流域农业非点源污染物输出总量及时空分布进行了预测分析,验证了该模型在该流域的适用性。李军等^[35]人研究和探讨了组建黄土高原 EPIC 模型逐日气象要素、土壤剖面理化性状和作物生长参数数据库的方法,为 EPIC 模型在我国黄土高原地区的应用奠定了基础;黄清华等^[36]在集成地理信息系统(GIS)和遥感(RS)技术的 SWAT(Soil and Water Assessment Tool)分布式水文模型改进的基础上,对黑河干流山区流域出山径流进行了模拟分析;张思聪^[37]应用 LEACHM(Leaching Estimation And Chemistry Model)模型对唐山田间土壤水分和溶质运移进行了模拟。二是研究建立了关于氮素迁移转化的数学模型。如:刘翔^[38]利用室内实验建立了表土层和下包气带中 NH_4^+ 迁移转化的数学模型,并采用数值法求解;Vassilis^[39]和王超^[40]利用立柱试验装置,建立了氮的迁移和转化数学模型,模型中考虑了 NH_4^+ 和 NO_3^- 的转化,求解方法也采用了数值法;张春辉^[41]在嘉峪关市建立了包气带 NH_4^+ 和 NO_3^- 迁移转化数学模型,并采用隐式差分法进行求解。

国内非点源污染的控制与管理措施除了一些水土保持方法和尹澄清的“多水塘系统”外,其它成就并不多。由点源、非点源造成的湖、河富营养化一直是国内 70 年代以来水环境研究的重点,为此,水体富营养化的主要营养物来源、过程、影响因素及水体的生态修复技术在国内研究较多。但水体的酸化过程、影响因素、酸化敏感性评价与酸化模型研究大部分为介绍和引荐别国经验,成就较小;且水体的酸化治理技术在国内几乎还是空白。90 年代以来,我国依据 BMPs 原则因地制宜地开展了一系列关于非点源污染控制的研究,如 1999 年广东省生态环境与土壤研究所承担“珠海非点源污染及其控制研究”项目达到预期的研究目标;2000 年春季科技部与云南省昆明市政府联合启动了“滇池典型流域面源污染治理示范工程”;2003 年科技部支持的武汉市“汉阳地区城市水体的面源污染控制技术与工程示范”取得良好进展。以上成果为我国非点源污染的控制和管理提供了借鉴。

5 发展趋势及展望

由于非点源污染的复杂性,因而目前的研究内容和方法均具有一定的局限性。以氮素为例,就其研究内容而言,氮素的迁移转化规律研究虽然较多,但多是研究其在水体中的迁移转化规律或单一区域内的迁移转化规律,而关于氮素在

参考文献:

- [1] 杨爱玲,朱颜明. 地表水环境非点源污染研究[J]. 环境科学进展,1999,7(5):60-67.
- [2] 任磊,黄廷林. 水环境非点源污染的模型模拟[J]. 西安建筑科技大学学报,2002,34(1):9-13.
- [3] 郑一,王学军. 非点源污染研究的进展与展望[J]. 水科学进展,2002,13(1):105-110.
- [4] D M Davis, P H Gowda, D J Mulla, et al. Modeling nitrate nitrogen leaching in response to nitrogen fertilizer rate and tile drain depth or spacing for Southern Minnesota[J]. J. Environ. Qual., 2000,29:1568-1581.
- [5] L Paavolainen, A Smolander, A J Lindroos, et al. Nitrogen transformations and losses in forest soil subjected to sprinkling infiltration[J]. J. Environ. Qual., 2000,29:1069-1074.
- [6] Malcolm E Sumner. Handbook of Soil Science[M]. New York: CRC Press,2000.
- [7] K E Schilling, R D Libra. The relationship of nitrate concentration in streams to row crop land use in Iowa[J]. J. Environ. Qual., 2000,29:1846-1851.
- [8] T E Jordan, D L Correll, D E Weller. Relating nutrient discharges from watersheds to land use and streamflow variability[J]. Water Resources Research, 1997,33(11):2579-2590.

土壤中以及其从土壤向水体的迁移转化过程研究则较少;在描述流域尺度内农业生产对水质的影响方面定性研究较多,但缺乏定量研究,为此硝态氮平均流失量的精确估计有待实现;同时很少有研究将田间氮素含量估算、管道灌溉流域中 NO_3^- 流失量和地表水中 NO_3^- 的负载量联系起来,尤其是在跨越多样化农田流域中氮素的输入和流失量的测算上,研究几乎为零。在研究方法上,目前国内外的非点源污染模型中研究型居多,应用型较少。同时,运用 GIS 开展非点源污染研究、专家系统及非点源污染模型软件的开发应用研究尚处于起步阶段。

就目前的研究现状来看,未来研究的重点主要集中于以下几方面:

(1) 土壤中氮素的非点源污染研究将会倍受重视。氮素的非点源污染在水环境中占有相当大的比重,其监测、管理和控制难度大而复杂。由于大量的氮素由土壤进入水环境,不仅使水体水质功能降低,对水生生物产生危害,还会通过食物链、饮水等对人体产生短期和长期的影响,因此,氮素污染危害的广泛性、控制的复杂性将使其研究越来越受到重视。

(2) 氮素的迁移转化研究更趋深入。受目前非点源污染物迁移转化研究的深度影响,国内外考虑污染物迁移转化的非点源污染模型的预测能力普遍偏低,在传输途径上进行的非点源污染控制效果也不是很理想。为给建模、控制提供更加坚实的理论基础,非点源污染物的迁移转化机理研究将会更加深入。

(3) 生物技术将在氮素的流域非点源污染控制和治理中发挥重要作用。如利用生物杂交、生物遗传技术培育高产、抗病、固氮作物,减少化肥施用;培养具有特殊降解、吸收能力的植物、细菌,吸收大气沉降氮素、过滤地表径流、净化污水;利用生物操纵技术进行水体富营养化、酸化的生态修复等^[1]。

(4) 集成化非点源污染模型软件将成为未来非点源污染模型研究的主流。GPS 技术是非点源污染数据野外采集和信息化的基础;利用遥感技术可以容易地获得流域非点源污染各影响因子的空间分异规律,确定出一定流域范围和主要非点源污染因子,并根据一定非点源污染定量模型对遥感数据处理结果进行定量分析,宏观上把握预测结论;GIS 具有强大的数据处理和空间分析功能,可以利用 GIS 将流域的非点源污染数据和环境特征数据库与各种非点源污染预测模型相关联,采用模型预测法对流域的非点源污染进行预测分析。因此,探讨非点源污染发生和发展的规律,研究不同气候水文条件下的非点源污染模型,而后统一集成开发为由专家系统控制、3S 技术支撑的非点源污染模型软件将成为未来非点源污染模型和计算机软件研究开发的主流。

- [9] D B Jaynes, J L Harfield, D W Meek. Water quality in Walnut Creek watershed: herbicides and nitrate in surface waters [J]. *J. Environ. Qual.*, 1999, 28:45 - 59.
- [10] Dept. of Geography, York Univ. Toronto, Canada. Factors affecting the export of nitrate - nitrogen from drainage basins in Southern Ontario [J]. *Water Research*, 1978, 12:1045 - 1057.
- [11] Thomas E Jordan, David L Correll, et al. Weller. effects of agriculture on discharges of nutrients from coastal plain watersheds of Chesapeake Bay [J]. *J. Environ. Qual.*, 1997, 26:836 - 848.
- [12] R B Alexander, R A Smith, G E Schwarz. Effect of Stream channel size on the delivery of nitrogen to the Gulf of Mexico [J]. *Nature*, 2000, 403(17):758 - 761.
- [13] D B Jaynes, T S Colvin, D L Karlen, et al. Nitrate loss in subsurface drainage as affected by nitrogen fertilizer rate [J]. *J. Environ. Qual.*, 2001, 30:1305 - 1314.
- [14] Gowda. P H. An integrated spatial process model to predict agricultural nonpoint source pollution [D]. Columbus: Department of Food, Agricultural and Biological Engineering, The Ohio State Univ., 1996.
- [15] William F Ritter, Dr. Adel Shirmohammadi. *Agricultural Nonpoint Source Pollution* [M]. Boca Raton, FL: CRC Press, 2001.
- [16] 郑涛, 穆环珍, 黄衍初, 等. 非点源污染控制研究进展 [J]. *环境保护*, 2005, (2): 31 - 34.
- [17] 刘宝元, 谢云, 张科利. *土壤侵蚀预报模型* [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2001.
- [18] 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.
- [19] 庄咏涛, 李怀恩. 农业非点源污染模型浅析 [J]. *西北水资源与水工程*, 2001, 12(4): 12 - 16.
- [20] 王珂, 许红卫, 王人潮, 等. 应用污染模型和地理信息系统评价和管理农业非点源污染 [J]. *环境污染与防治*, 1997, 19(6): 30 - 40.
- [21] R A Young, C A Onstad, D D Bosch, et al. A nonpoint - source pollution model for evaluating agricultural watersheds [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, March - April, 1989.
- [22] Williams J R. The EPIC model [R]. Temple: USDA - ARS, grassland, soil and water research laboratory, 1997.
- [23] Texas, Grassland, Soil and Water Research Laboratory, Agricultural Research Service [EB/OL]. 2001, <http://www.brc.tamus.edu/swat/swat2000.doc>, html.
- [24] A mold J G, Srinivasan R, Muttiah R S, et al Continental scale simulation of the hydrologic balance [J]. *Journal of American Water Resource Association*, 1999, 35(5): 1037 - 1051.
- [25] Whittemore R C. The BASINS model [J]. *Water Environmental Technology*, 1998, 10(12): 57 - 61.
- [26] D L Corwin, K Loague. GIS 支持下的非点源污染模型 [J]. *水土保持科技情报*, 1999, (1): 14 - 16.
- [27] Manguerra H B, Engel B A. Hydrologic Parameterization of Watersheds for Runoff Prediction Using SWAT [J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 1998, 34(5): 1149 - 1162.
- [28] Rosenberg N J, Epstein D L, Wang D, et al. Possible impacts of global warming on the hydrology of the Ogallala Aquifer region [J]. *Journal of Climate*, 1999, 12:677 - 692.
- [29] Saleh A, Arnold J G, Cassman P W, et al. Application of SWAT for the upper North Bosque watershed [J]. *Transactions of the ASAE*, 2000, 43(5): 1077 - 1087.
- [30] Fohrer N, Haverkamp S, Eckhardt K, et al. Hydrologic response to land use changes on the catchment scale [J]. *Phys Chem Earth(B)*, 2001, 26(7 - 8): 577 - 582.
- [31] H B Manguerra, W Tate, M Lahlou. Arcview - GL EAMS integration for pesticide source loading estimation [Z]. This 1998 ASAE Annual International Meeting in Orlando, Florida No. 982227.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] 王飞儿, 吕唤春, 陈英旭, 等. 基于 AnnAGNPS 模型的千岛湖流域氮、磷输出总量预测 [J]. *农业工程学报*, 2003, 19(6): 281 - 284.
- [35] 李军, 邵明安, 张兴昌. 黄土高原地区 EPIC 模型数据库组建 [J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2004, 32(8): 21 - 26.
- [36] 黄清华, 张万昌. SWAT 分布式水文模型在黑河干流山区流域的改进及应用 [J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2004, 28(2): 22 - 26.
- [37] 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.
- [38] 刘翔, 刘兆明, 朱琨. 氮对地下水的污染预测模型 [J]. *环境科学*, 1991, 12(6): 8 - 11.
- [39] Vassilis Z A. Simulation of water and nitrogen dynamics in soils during wastewater applications by using a finite - element model [J]. *Water Resources Management*, 1993, 7: 237 - 251.
- [40] 王超. 氮类污染物在土壤中迁移转化规律试验研究 [J]. *水科学研究*, 1997, 8(2): 176 - 182.
- [41] 张春辉, 裴元生. 氮氮在大厚度包气带土层中迁移转化的数学模拟 [J]. *甘肃环境研究与监测*, 2001, 14(1): 3 - 6.