

非点源污染预测模型研究进展

薛金凤¹, 夏 军^{2,3}, 马彦涛⁴

- (1. 武汉大学化学与分子科学学院应用化学系, 湖北 武汉 430072; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;
3. 武汉大学水利水电学院, 湖北 武汉 430072; 4. 武汉大学资源与环境科学学院环境工程系, 湖北 武汉 430072)

摘要: 污染物在径流形成过程中的迁移和转化是很复杂的, 为了有效地防止和控制降雨径流污染, 必须对这个复杂过程进行分析、模拟和预测。详细介绍了近年来国外和国内非点源污染模型的研究进展。可以看出, GIS 与非点源污染模型的结合及在模型中引入模糊理论、不确定性分析、风险管理是今后的发展趋势, 而我国在非点源污染方面的研究还比较落后, 有待进一步的发展。

关 键 词: 非点源污染; 预测模型; 地理信息系统; 模糊理论; 不确定性; 风险管理

中图分类号: X 52; X 592; S 157.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-6791(2002)05-649-08

目前, 非点源污染如农田养分和农药的流失、城区径流污染、水土流失等加剧了各类水体的污染、加剧了湖泊和水库的富营养化, 是不容忽视的。非点源污染来源于发生扩散的陆地区域, 污染物质在地表或地下水中迅速分散后形成的。具有发生随机、来源和排放点不固定、污染负荷的时间和空间变化幅度大、监测、控制和处理困难而且复杂等特点。正因为如此, 预测和模拟非点源污染具有一定的难度。20 世纪 70 年代以来, 国外研究、发展了许多非点源污染模型, 80 年代以来国内也开展了一些研究。

1 国外的非点源污染模型

最早的非点源污染模型是集总模型如 CREAMS (Chemicals Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems) 模型, 主要用于研究土地管理对水、泥沙、营养物和杀虫剂的影响, 其中预测径流使用的是 SCS 法(美国农业部土壤保持局曲线), 产沙子模型采用经验公式 USLE(通用水土流失方程), 预测污染物负荷采用的是概念模型。CREAMS-WT 模型是 CREAMS 模型的改进, 增加了对水位的处理。考虑到参数的不确定性, Haan^[1]等研究了 CREAMS-WT 模型中不确定性参数对径流体积和地表径流中的磷负荷的影响。

GLEAMS (Groundwater Loading Effects on Agricultural Management Systems) 模型与 EPIC (Erosion Productivity Impact Calculator) 模型均由 CREAMS 模型进化发展而来。GLEAMS 模型主要用于模拟

收稿日期: 2001-07-17; 修订日期: 2001-10-22

基金项目: 中国科学院知识创新工程项目 (CX10G-E01-08/ KZCX2-SW-317) 资助

作者简介: 薛金凤(1971-), 女, 江苏铜山人, 讲师, 博士研究生, 主要从事环境科学和应用化学方面的研究。

地下水中的杀虫剂负荷, 而 EPIC 模型用来计算侵蚀对农作物产量的影响。

CLEAMS 模型也采用曲线数法预测径流和侵蚀, 营养物负荷部分是一个考虑了氮和磷循环的复杂的子模型。氮组分包括: 矿化、固定不动、反硝化、氨的挥发、豆类的固氮作用、植物吸收以及径流、泥沙和根系区下渗的氮的损失量。磷组分包括: 矿化、固定不动、植物吸收以及径流、泥沙和渗漏的磷的损失量。此外两种组分均考虑了肥料和动物排泄物的应用, Shirmohammadi 等改进了曲线数换算程序, 并且将其应用于估计马里兰沿海平原区域的径流和侵蚀, 预测更精确。Morari 等在 CLEAMS 模型中增加了估计关于土壤、缝隙流、缝隙流中溶质运动的缝隙动力学程序, 描述了在有裂缝的粘土壤中水和溶质的运动; Yoon 等分别用 CLEAMS 和 EPIC 预测了棉区径流中的营养物含量; Kumar 和 Kanwar 用 CLEAMS 模型将一种杀虫剂合并到 DRAINAGE 模型中, 然后很好地预测了正常降水年份里亚表面排水沟中莠去津的浓度^[2]。Shirmohammadi^[3]使用 CLEAMS 模型合理地估计了瑞典西南部地区粘土层中亚表面排水管中硝酸盐氮和溶解态磷的损失量, 并发展了一个独立的且用于估计颗粒态磷的子模型 PARTLE。Stone^[4]使用 CLEAMS 模型模拟了卡罗莱纳州北部一集水区中养猪废水喷洒区和农作物生长区地下水中硝酸盐氮的含量, 证明 CLEAMS 模型可以用来预测农业管理体系地下水中硝酸盐氮的负荷。

EPIC 模型分为九部分: 水文、天气、侵蚀、营养物、植物生长、土壤温度、耕种、经济和耕种环境控制, 营养物中介绍了氮的输移, 硝酸盐氮随地表径流或下渗后随横向亚表面水流迁移, 迁移量等于水流体积与 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度的乘积, 而有机氮则随泥沙一起迁移, 迁移量用改进的负荷方程计算; Tharacad 等^[5]用 EPIC 模型分析了可供选择的农业管理措施, 模拟了棉花、小麦等农作物在灌溉和干燥条件下的农肥反应曲线, 用农肥反应方程建立了每种农作物的最佳施肥量, 并在最佳施肥量下模拟了每一种庄稼的性能, 最后确定如何选种庄稼。

限于集总模型不考虑时空变异性, 适用流域面积小, 因而提出了用网格划分流域、可以模拟时空变异性的分布式模型。按模拟事件的时间连续性可分为单个事件模型和时间连续性模型。单个事件模型出现较早, 在模拟暴雨事件时, 不考虑亚表面流、蒸散发、植物生长等水文因素, ANSWERS(Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation) 和 AGNPS(Agricultural Nonpoint Source) 模型属于这一类; 时间连续性模型则考虑了亚表面流、蒸散发、植物生长等水文因素, HSPF(Hydrological Simulation Program Fortran)、SWRRB(Simulator for Water Resources in Rural Basins)、SWAT(Soil Water Assessment Tool)、WEPP(Water Erosion Prediction Project) 属于这一类。

ANSWERS 模型^[6]包括水文模型、泥沙分散 - 输送模型和几个描述坡面、亚表面、渠中的水流路径的组件, 采用概念模型模拟水文, 用泥沙连续性方程模拟侵蚀, 用方形网格划分研究区域, 可供水质规划者或其他用户模拟土地利用方式对水文和侵蚀响应的影响, 对控制非点源污染进行规划。Connolly 等用下渗模型取代了径流预测中的概念模型, 精确地预测了奎恩斯兰德 9.6 hm^2 的草原集水区在不同的土壤和覆盖条件下的径流。Rewerts 等^[7]将地理信息系统(GIS)应用到 ANSWERS 模型中, 首先项目管理器从用户那儿收集信息, 然后利用 GIS 提取数据, 产生一个输入文件, 并将 ANSWERS 模型的输出读入新的 GIS 层, 项目管家的应用使输入数据赋值时间减少了 7~10 倍。

AGNPS 模型^[8]采用方形网格划分单元, 模型包含水文、侵蚀和泥沙输送、氮磷和 COD 的输移等内容, 其中径流量用 CREAMS 模型中使用的公式计算, 侵蚀用 RUSLE 预测, 化学物质的输移采

用CREAMS模型和一个饲养场评价模型中的方法,并对土壤结构的影响方面做了改进,化学物质的输移计算分为溶解相和泥沙吸附相的计算,溶解相的计算与径流量有关,而泥沙吸附相的计算则与产沙量有关;Grunwald^[9]研究了AGNPS模型和改进版的效率,结果表明,Lutz法优于CN法,LS因子依据渠中每种受侵蚀颗粒与径流速度的关系进行计算最好。Prato使用AGNPS模型计算了几种保护性措施减少侵蚀的潜力;Tim等和Rode等用AGNPS模拟了几种方案,对土地利用和耕种措施以及它们对非点源污染的影响做了比较;Mostaghimi等用AGNPS模型很好地模拟了1153 km²集水区的营养物量和产沙量;在校正后,AGNPS模型可靠地模拟了魁北克省的一个26 km²集水区的径流和产沙量;Kusumandari和Mitchell则用AGNPS模型计算了一块小集水区的侵蚀量和产沙量,对该区域中的树木覆盖区和农作物覆盖区的侵蚀量和产沙量做了比较,结果表明农作物能够减少侵蚀量,是一种极好的土地利用方法;Corbett等用AGNPS模型比较了树木覆盖的集水区和城市化的集水区径流体积、径流量、泥沙负荷和不透水表面对径流和泥沙输送的影响;Rode等用AGNPS满意地模拟了一两个集水区的产沙量和总磷;Kao等^[10]将AGNPS模型与WASP模型结合成—动态空间模型,估计了一远离溪水的水库中磷的负荷,为进行水质规划提供了便利;Choi采用AGNPS估计了沿海流域的流量和总氮负荷,平均误差为5%。Hession等将AGNPS模型与GIS ARC/INFO连接起来,模拟了在假定的平均输入值下几个最佳管理措施;Panuska等^[11]将两个地形增强程序TAPES-C和TAPES-G模型并入AGNPS模型中,使地面坡度、坡长、水渠的坡度、水流的方向等数据的输入自动化;He等^[12]利用GIS较强的数据处理功能,将GRASS和AGNPS结合在一起,研究了密歇根州一个农业流域土壤侵蚀及营养元素(N和P)的流失情况,提出了农业最佳管理措施;Engel^[13]发展了GRASS模型和AGNPS模型及ANSWERS模型的界面,模拟了土壤侵蚀及营养元素在农业流域中的损失;Line等使用AGNPS和GRASS(GIS)模拟了卡罗莱纳州以北奶牛场的泥沙和营养物质的输出;Liao等将GIS ARC/INFO与AGNPS模型连接起来,并用它模拟了爱荷华州的一个集水区中含有莠去津的径流;Leon^[14]报道了一个可提供预处理和后处理工具、模型控制和参数灵敏度分析的决策支持体系,并给出了AGNPS模型和其与决策支持体系的连接RAISON模型的界面结构,并对模型做了描述:包括输入要求、工具的发展、提取必要的步骤等。

HSPF模型模拟了陆地表面、亚表面和地下水的水文路线以及污染物的输移,主要分两部分:PERLAND模型和RCHRES模型。PERLAND模型模拟了发生在前期的坡面流、亚表面水流、地下水流的运动和水质水量的变化过程;RCHRES模拟了径流汇入水渠或湖泊的过程;Jacomino等^[15]在16 km²的集水区对HSPF模型做了验证,通过应用灵敏度分析、数值优化和模型参数的率定等关键方法证明了模型具有很好的预测能力。SWRRB^[16]模型包括:天气、亚表面横向流、池塘和水库蓄水量、植物生长、迁移损失和泥沙的运动等成分,由CREAMS模型改进而成的营养物和杀虫剂的运动成分、农业管理成分可用于决定农作物轮种、种植和收获日期、化学物质的施用日期和用量等管理因子的影响,可根据土地利用、土壤、地形、农作物、降水和温度的差异划分子区域,适用于500 km²的流域。

HSPF模型与SWRRB模型虽然时间连续,但缺乏空间的详细描述,而SWAT模型则弥补了这一不足。SWAT水文模型^[17]包括:地表径流、横向流、地下水流、蒸发、渠中水流路径等在内的水文平衡及相互作用,主要考虑了土地管理和水质负荷,既可应用于土地利用以农业为主的集水区的模拟,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管理措施,进行规划

和决策,但是不能模拟单个事件的洪水路径。该模型需要大量的参数,为了便于集水区的参数化,以 GIS 为基础的输入界面 SWAT-GRASS 应运而生,该界面利用 GRASS 操作、提取信息,并将空间信息转换为 SWAT 的输入数据;Bingner 等评价了集水区的尺度对 SWAT 预测细沙产量的影响。Srinivasan^[18]将 SWAT 和 GRASS(GIS 工具)连接在一起,成功的模拟了德克萨斯的一流域的水文、土壤侵蚀和泥沙输送,模型输入信息从 GRASS 中提取,减少了数据筛选和操作时间。

WEPP 模型^[19]估计了陆地和水渠的径流和侵蚀、保护措施的影响,是一种计算山坡和集水区土壤侵蚀和泥沙输送的新技术,模型包括气候、表面和亚表面的水文、冬季冻融过程、灌溉、残余物的降解、沟渠和蓄水坑中泥沙的分散、输送和沉积等部分。计算程序计算了土壤流失的时空分布、泥沙输送和泥沙颗粒的特征,侵蚀预测系统包含了用户界面程序,输入文件包括程序、气候数据库、土壤数据库、植物参数数据库、耕具数据库。这些附加的程序增强了 WEPP 模型的使用功能,可供用户用于保护自然资源 and 进行环境评价。采用 Green-Ampt 方程计算下渗,使用估计的有效传导率 K_0 预测径流,与 CREAMS 模型一样,用稳态泥沙连续方程描述沟中悬浮泥沙的运动,不同的是根据沟渠水力学而不是剪切流计算剪切力,使用已有的研究估计参数而没有使用 USLE;采用两种方法计算水渠或集水区出口的最大径流量,一种是 EPIC 模型中使用的改进的有理方程,一种是 CREAMS 模型使用的方法;水渠侵蚀程序由 CREAMS 程序改变而来。Liu 等用缺省参数模拟了美国 15 个集水区的径流和产沙量。

此外,还有很多用于模拟营养物输移和估计营养物负荷的模型。

Heng 和 Nikolaidis(1998)^[20]提出的 NTF-Watershed(Watershed Nutrient Transport and Transformation)模型,是一种用来模拟水和营养物输移的分散机理模型,采用方形网格划分单元,模拟了氮(NO_3^- 、 NH_4^+ 、Org-N)的输移和最后的存在形式,该模型可供集水区规划人员开发最佳的管理措施方案,以便最大程度地减少氮的输出量,从而减少氮的污染。Nikolaidis 用该模型模拟了氮的运动、评价了流域对氮负荷的非线性响应情况;Ketelsen^[21]以地下水监测数据为依据,发展了一个概念性的水文地质模型,解释了德国北部 Foehr 岛上含水层氮的空间分布;El-Kadi^[22]介绍了一用于评价从农业用地渗出的氮的集总参数模型,模型考虑了氮的迁移过程、气候、多种灌溉和施肥技术,适合于管理肥料的应用和估计进入地下水的氮的渗透浓度。

Tufford^[23]以土地利用和接近溪水区为基础,发展了一经验模型,模拟了非点源污染引起的溪水中总磷和总氮的浓度,提出了管理水质的重点;由于用交叉区数据发展的模型可用性差、而使用单个潮湿土壤区的数据噪音高且范围有限,Qian^[24]用 Bayesian 分析将交叉区域和单个潮湿土壤区模型组合在一起,预测了营养物的截获量,为水质管理提供了依据;Krysanova^[25]提出了一个一般性的模拟营养物从土壤迁移到亚表面水中的方法,并用分布式水文水质耦合模型 SWIM 对模拟的水文过程和氮的动力学过程进行了验证,该模拟可作为评价管理方案的依据,同时还用来控制非点源污染;Winter^[26]使用 20 世纪 90 年代改进的输出系数模拟法建立了安大略省南部流域磷的输出系数模型,为依据磷负荷预测将来市区发展规划的影响提供了一种简单的工具,此外还评价了几种最佳管理方案;Schoumans^[27]对荷兰的方法进行了综述,该法根据磷的吸附和解吸动力学,模拟了土壤中磷的累积和土壤溶液中的无机磷浓度,证明可用土壤测试磷指示农业污染风险和估计磷的损失、预测和评价营养物管理措施对减少磷的损失和土壤测试磷的影响。

Leon^[28]建立了一个模拟农业分水岭非点源污染的分布式水质模型,使用 GRU 方法模拟水质,计算了每种土地覆盖类型的径流量、产沙量和营养物浓度,模拟了流动路线,模型与 GIS 相结

合,利用GIS技术提取数据,改善了非点源污染模拟;Jordan^[29]采用输出系数模型预测了北爱尔兰50多个集水区的扩散的溶解反应磷(SRP)和总磷(TP),土地类别从卫星图像上判读,使用GIS对集水区的磷负荷做了预测,并用实测数据进行了校正。

2 国内的非点源污染模型进展

自从20世纪80年代以来,我国也逐渐认识到非点源污染的存在及其危害性,开始了非点源污染的控制研究。

温灼如等根据苏州的实际情况,建立了苏州暴雨径流污染的概念模型,该模型是确定性集总模型,采用水量单位线和污染负荷单位线计算流量和污染负荷;刘曼蓉等用相同的方法建立了南京城北地区的暴雨径流污染概念模型,并研究了输入径流模数与输出污染径流模数的相关关系,建立了统计相关模型;陈西平在研究水网城市径流污染对河流水质影响时,根据建立的分散排放与总排放口集中排放量之间的表达式和径流浓度降解率方程,模拟了成都城市径流污染对河流水质的影响。朱萱等通过研究农田暴雨径流污染特征及污染物输出规律提出了采用统计技术的区域径流-污染负荷模型;陈西平等通过对具有代表性的小区资料进行统计分析,外推并建立了涪陵地区BOD₅、SS、COD、TN、TP等五种污染物的各次降雨冲刷预测方程。李定强、王继增等^[30]分析了杨子坑小流域主要非点源污染物氮、磷随降雨径流过程的动态变化规律,建立了降雨量-径流量、径流量-污染物负荷输出量之间的数学统计模型,并用该模型对流域的非点源污染负荷总量进行了计算,得出了流域非点源污染物流失规律。

王昕皓将研究流域划分为若干坡面,提出了单元坡面模型,根据水量平衡计算了暴雨径流过程,并用统计分析法计算了非点源污染(BOD₅、COD)的负荷量。夏青等提出一包含降雨径流、汇流出流、出水量与水质相关三个子模型的流域非点源污染负荷模型,模拟了沱江流域COD、BOD₅和SS的过程线,其中水质相关子模型中采用数学统计法,汇流子模型中采用瞬时单位线法。陈西平提出了包括降雨产流和径流水质相关子模型、用于计算农田径流污染负荷的三峡库区模型,根据蓄水容量曲线确定产流子模型,根据次雨径流确定污染物输出总量,计算了库区BOD₅、COD、TN、TP等污染物的输出量。李怀恩、沈晋等^[31]建立了用逆高斯分布瞬时单位线法计算流域汇流的非点源污染物迁移机理模型,较好地模拟了于桥水库及宝象河流域洪水、泥沙和多种污染物的产生和迁移。后来在不考虑迁移过程中的诸多影响因素的前提下,提出了简单的产污计算模型,但是不适用于次暴雨产生的污染负荷及其过程^[32]。王宏等^[33]将改进的QUAL-FU水质模型和一非点源污染模型有机的粘结在一起,建立了用于流域优化管理的综合水质模型,采用曲线数法计算径流,用统计模型计算污染物负荷。

朱学愚等^[34]用灰色系统理论方法和对流-弥散方程的特征有限元解模拟地下水中污染物随时间的分布,用趋势面分析和Kriging方法模拟地下水中污染物的空间分布,并进行了污染预测。

从近年来的研究可以看出:关于非点源污染对地下水的污染方面的研究很少,建立的模型大多数是污染负荷模型,忽略了壤中流对地表水质的影响。研究进展可分为两个阶段:根据实测资料建立污染负荷与径流量之间的关系,不进行产汇流计算;首先根据流域的调蓄作用计算产汇流,然后建立污染负荷与流量间的关系。计算产流时使用的方法主要有SCS法和蓄满产流法,计算汇流的方法有Nash瞬时单位线法和逆高斯瞬时单位线法。建立污染负荷与径流量的关系

时,采用的方法有两种:概念法,即以降雨为输入,径流与污染量为输出的确定集总方法;统计分析法,即研究输入径流模数与输出污染径流模数的相关关系的方法。

3 总 结

国外的非点源污染模型在 20 世纪 70 年代后期、80 年代以来已由简单的统计分析向机理模型、由平均负荷输出或单场暴雨分析向连续的时间响应分析、由集总模型向分布式模型发展,模型的研究开始以过程为依据、并与管理、控制措施相结合,强调普遍适用性和实际应用价值。20 世纪 80 年代末、90 年代以来 GIS 开始与分布式模型和污染物负荷模型结合,对氮磷、农药的不同形态的迁移过程进行模拟并估计负荷,为实现最佳管理提供依据;由于模拟中存在多种误差,模拟结果常常是不确定的,所以在今后模型的发展过程中,模糊理论、不确定性分析、风险评价和风险管理将是令人感兴趣的研究方向之一,可减少不确定性成分的遥感、GIS 与模型的结合将会继续深入发展。

我国的非点源污染问题是不容忽视的,为了经济有效的控制非点源污染,应当加强非点源污染的科学调查和研究工作,通过模拟非点源污染物的迁移过程,找出主要的污染源,以便采取相应的管理、控制措施。然而 20 世纪 80 年代以来因资料缺乏,关于非点源污染模拟的研究尚显不足,建立的多为污染负荷模型,忽略了壤中流的影响。然而大量的研究表明,在沙土壤区或地下水位较高时,亚表面水流对地表水质的影响是显著的。计算产汇流时,考虑的因素过于简单,忽略了时空变异性的影响,实际上引起非点源污染的因素是复杂多样的、不确定的,这就必然会引起较大的误差,所以需要进一步的发展关于以过程为依据的农业区、山地的土壤流失和污染物质的迁移的研究;开展分布式模型的研究;利用遥感和 GIS 解决参数的选择问题;在模型中引入不确定性分析;加强地下水的研究工作。

参考文献:

- [1] Haan C T, Zhang J. Impact of uncertain knowledge of model parameters on estimated runoff and phosphorus loads in the lake Okeechobee Basin[J]. Transactions of the ASAE, 1996, 39(2):511 - 516.
- [2] Line D E, *et al.* Nonpoint sources[J]. Water Environment Research, 1998, 70(4):895 - 911.
- [3] Shirmohammadi A, Ulen B, Bergstrom, *et al.* Simulation of nitrogen and phosphorus leaching in a structured soil using gleams and a New Submodel, 'PARTLE'[J]. Transactions of the ASAE, 1998, 41:353 - 360.
- [4] Stone K C, Hunt P G, Johnson M H, *et al.* CLEAMS simulation of groundwater nitrate-N from row crop and swine wastewater spray fields in the eastern Coastal Plain[J]. Transactions of the ASAE, 1998, 41:51 - 57.
- [5] Ramanarayanan T S, Storm D E, Smolen M D. Analysis of nitrogen management strategies using EPIC[J]. J Am Water Resour Assoc, 1998, 34(5):1199.
- [6] Beasley D B, Huggins L F, Monke E J. ANSWERS:A model for watershed planning[J]. Transaction of the ASAE, 1980, 23(4):938 - 944.
- [7] Srinivasan R, Engel B A. A spatial decision support system for assessing agricultural non-point source pollution[J]. Water Resources Bulletin, 1994, 30(3):441 - 452.
- [8] Young R A, Onstad C A, Bosch D D, *et al.* AGNPS, agricultural nonpoint source pollution model for evaluating agricultural watersheds[J]. J Soil and Water Conserv, 1989, 44(2):164 - 172.

- [9] Grunwald S, Norton L D. Calibration and validation of a non-point source pollution model[J]. *Agricultural Water Management*, 2000, 45(1): 17 - 39.
- [10] Kao J J, Lin W L, Tsai C H. Dynamic spatial modeling approach for estimation of internal phosphorus load[J]. *Water Research*, 1998, 32(1): 47 - 56.
- [11] Panuska J C, Moore I D, Kramer L A. Terrain analysis: integration into agricultural nonpoint source (AGNPS) pollution model[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1991, (1-2): 59 - 64.
- [12] He C, Riggs J F, Kang Y T. Integration of geographic information systems and a computer model to evaluate impacts of agricultural runoff on water quality[J]. *Water Resource Bulletin*, 1993, 29(6): 891 - 900.
- [13] Engel B A, *et al.* Non-point source pollution modeling using models integrated with geographic information systems[J]. *Water Sci Technol*, 1993, 28: 685.
- [14] Leon L F, Lam D C, Swayne D A, *et al.* Integration of a nonpoint source pollution model with a decision support system [J]. *Environmental Modelling and Software*, 2000, 15: 249 - 255.
- [15] Jacomino V M F, Fields D E. A critical approach to the calibration of a watershed a model[J]. *J Am Water Resour Assoc*, 1997, 33(1): 143 - 154.
- [16] Arnold J G, Allen P M, Bernhardt G. A comprehensive surface-groundwater flow model[J]. *J Hydrol*, 1993, 142: 47 - 69.
- [17] Arnold J G, Srinivasan R, Muttiiah R S, *et al.* Large area hydrologic modeling and assessment Part I: Model development[J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 1998, 34(1): 73 - 89.
- [18] Srinivasan R, Ramannarayanan T S, Arnold J G, *et al.* Large area hydrologic modeling and assessment part : Model application[J]. *Journal of American Water Resources Association*, 1998, 34(1): 91 - 101.
- [19] Flanagan D C, Nearing M A. USDA-water erosion prediction project (WEPP) [M]. NSERL Report No. 10, USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory, West Lafayette, Indiana, 1995.
- [20] Heng H H, Nikolaidis N P. Modeling of nonpoint source pollution of nitrogen at the watershed scale[J]. *J Am Water Resour Assoc*, 1998, 34(2): 359.
- [21] Ketelsen H, Widmoser P. Trend and spatial pattern of nitrate pollution in the groundwater of the western geest zone of the island foehr[J]. *Hydrology and Water Resources*, 2000, 44(2): 75 - 87.
- [22] El-Kadi A I, Ling G L P M N. A lumped parameter model for nitrogen leaching in agricultural lands[J]. *Ground Water*, 1999, 37(1): 27 - 32.
- [23] Tufford D L, McKellar H N J, Hussey J R. In-stream nonpoint source nutrient prediction with land-use proximity and seasonality[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1998, 27: 100 - 111.
- [24] Qian S S, Reckhow K H. Modeling phosphorus trapping in wetlands using nonparametric bayesian regression[J]. *Water Resources Research*, 1998, 34(7): 1745 - 1754.
- [25] Krysanova V, Becker A. Integrated modeling of hydrological processes and nutrient dynamics at the river basin scale [J]. *Hydrobiologia*, 1999, 410: 131 - 138.
- [26] Winter J G, Duthie H C. Export coefficient modeling to assess phosphorus loading in an urban watershed[J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2000, 36(5): 1053 - 1062.
- [27] Schoumans O F, Groenendijk P. Modeling soil phosphorus levels and phosphorus leaching from agricultural land in the netherlands[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2000, 29: 111 - 116.
- [28] Leon L F, Soulis E D, Kouwen N, *et al.* Nonpoint source pollution: A distributed water quality modeling approach[J]. *Water Research*, 2001, 35: 997 - 1007.
- [29] Jordan C, McGuckin S O, Smith R V. Increased predicted losses of phosphorus to surface waters from soils with high Olsen-P concentrations[J]. *Soil Use and Management*, 2000, 16(1): 27 - 35.

- [30] 李定强, 王继增, 等. 广东省东江流域典型小流域非点源污染物流失规律研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1998, 4(3):12.
- [31] 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.
- [32] 李怀恩. 透水性流域非点源产污模型的初步研究[J]. 水利学报, 1998, (2):16.
- [33] 王 宏, 杨为瑞, 高景华. 中小流域综合水质模型系列的建立[J]. 重庆环境科学, 1995, (1):45.
- [34] 朱学愚, 徐绍辉, 吴春寅, 等. 山东博山地下水污染的数学模拟[J]. 环境科学学报, 1996, 16(1):2-12.

Advances in non-point source pollution prediction model

XUE Jin-feng¹, XIA Jun^{2,3}, MA Yan-tao⁴

(1. Department of Applied Chemistry, College of Chemistry & Molecular Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Institute of Geographical Science and Natural Resources Research, Chinese Academy of Science, Beijing 100101, China;

3. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 4. Department

of Environment Engineering, College of Resource & Environment Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Transfer and transform of pollutants is very complicated. In order to prevent and control runoff pollution, the complicated processes need to be analyzed, simulated and predicted. The development of recent overseas and inland non-point pollution models is introduced in this paper. It can be seen that integrating GIS, fuzzy set theory, uncertainty analysis and risk management into non-point source pollution model will be future development direction. However, it is still behindhand with this field in China, and remains to be developed.

Key words: nonpoint source pollution; predication model; GIS; fuzzy set theory; uncertainty analysis; risk management