

· 专论与综述 ·

农业面源污染模型研究进展

杨善莲¹, 郑梦蕾¹, 刘纯宇¹, 马友华², 王强^{1*}

(1. 安徽农业大学资源与环境学院, 安徽 合肥 230036;

2. 安徽农业大学新农村发展研究院, 安徽 合肥 230036)

摘要:综述了农业面源污染模型国内外研究进展,介绍了常用的面源污染模型概念与适用范围,明确“3S”技术与SWAT、AGNPS等模型有机结合是当今面源污染模型的研究热点。提出我国面源污染模型未来研究的重点是围绕水质改善目标,建立面向全流域尺度的面源污染负荷估算方法,构建完整的基础监测数据网络,为建立符合我国流域特性的面源污染模型提供支撑。

关键词: 农业面源污染;模型;“3S”技术;流域

中图分类号: X52

文献标志码: A

文章编号: 1006-2009(2020)03-0008-06

Research Progress on Agricultural Non-point Source Pollution Model

YANG Shan-lian¹, ZHEN Meng-lei¹, LIU Chun-yu¹, MA You-hua², WANG Qiang^{1*}

(1. School of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei, Anhui 230036, China;

2. New Rural Development Institute, Anhui Agricultural University, Hefei, Anhui 230036, China)

Abstract: It summarized the research progresses of agricultural non-point source pollution models at home and abroad, introduced the concepts and applicable scope of common non-point source pollution models, and clarified the research focus of today's non-point source pollution models as the organic integration of “3S” technology with SWAT, AGNPS, etc. It pointed out that water quality improvement was future research focus. It suggested establishing a whole-basin-scale non-point source pollution load estimation method and a complete basic monitoring data network for a non-point source pollution model which was in line with national basin characteristics.

Key words: Agricultural non-point source pollution; Model; 3S; Basin

面源污染(Non-point Source Pollution, NPS)是指溶解态或固态的污染物从不确定的地区,在降水(或融雪)冲刷作用下,通过径流过程汇入受纳水体(江河、湖泊、蓄水池和近海海湾等)并导致水质富营养化或者其他形式的土壤污染^[1-2]。农业面源污染是指进行农业耕种活动时产生的细微沙砾、营养盐、农药残留、重金属离子、畜禽粪便及生活垃圾等污染源,随着降水或灌溉时农田中产生的水流或地下渗透,流入流域水体或土壤中所造成的水体环境污染^[3]。其主要来源是农村居民生产及生活废物,包括农业种植业和养殖业生产过程中因不合理使用而流失的农药、化肥,残留在农田中的农用薄膜和处置不当的农业畜禽粪便、恶臭气体,以及

不科学的水产养殖等产生的水体污染物^[4-6]。

中国水土流失面积较多,占国土总面积的37.2%,面源污染已成为江河湖泊尤其是巢湖、太湖、滇池等湖泊水质恶化的主要成因^[7]。在中国,面源污染控制将成为未来几十年水环境保护中最重要的问题之一^[8]。农业面源污染是面源污染的主要来源,由于其产生的复杂性、机理具有模糊性

收稿日期:2019-04-25;修订日期:2020-03-05

基金项目:国家重点研发计划“菜地氮磷养分流失综合阻控技术优化与集成”基金资助项目(2018YFD0800402)

作者简介:杨善莲(1994—),女,海南乐东人,在读研究生,主要研究方向为资源环境与信息技术应用。

*通信作者:王强 E-mail: 51544718@qq.com

及形成具有潜伏性,具有在不确定时间内通过不确定途径排放不确定数量污染物的特征,特别是其污染负荷具有很强的时空差异性,使得在监测、模拟与控制方面面临巨大的困难。如何正确认识农业面源污染并对其实施切实有效的防治措施,已经成为当今社会的焦点问题^[9-10]。

1 农业面源污染模型概述

流域农业面源污染在世界范围内日益严重,其防治要点在于建立流域范围内的评估模型与预防机制。最佳管理措施(Best Management Practices, BMPs)是采用工程与非工程措施相结合的分散-综合控制体系,基于污染物关键源区的位置可分为不同类型(源头控制、迁移途径阻截、末端治理)^[11],而关键源区则需要依赖于面源污染模型的关键源区识别,以及途径迁移情况和污染负荷情况。农业面源污染模型是对农业面源污染情况进行描述、评价、预测和预警的有效工具^[12-13],以方程为主要形式,对各种不同类型的面源污染在水文循环过程中,以及接纳水体所产生的污染源和污染负荷量在农田生态循环中的迁移转化过程进行模拟^[14]。其在水文模型的基础上搭载模拟污染物负荷的组件模型,构建模型研究的基本框架,其中主要是建立地表径流和泥沙输移模型,模拟农业水体的排水特性和产沙量,定量其对土壤质量和接纳水体质量的影响,进而制定农业水体管理策略^[15-16],达到预测并为农业面源污染制定管理规则的目的^[17]。

国内外流域模型众多,根据模拟参数是否考虑因子物理机制过程与时空变化尺度,可以归纳为经验集总式模型和机理分布式模型两大类。集总模型将影响污染过程的各因子均一化处理,得出一个综合各因子的参数,从而对区域空间特性实行平均化模拟,实际上采取的是一种经验方法,精度较低,需要历史数据的校验。此类模型包括水质水量相关法^[18],建立了 NPS、ECM、ARM、STORM、ACTMO 模型及 USLE 方程等非点源污染计算模型,虽然能够在较大区域范围内应用,但是由于模型本身对因素在空间上采用了简单的均一化处理,且通用性较差,因而难以广泛应用于非点源污染的宏观控制与管理。分布模型将流域细分为多个连续的小单元格,不同单元中的流域因子不同,而同一个单元中的流域因子近似,模型把流域中各个单元的模拟结

果串联,扩展成为整个流域的输出结果,可以较为准确地模拟流域的自然过程,精度也较高^[19]。然而,分布模型结构复杂,需要详尽的资料和数据率定模型参数,且在运算过程中需要大量的时间,因而在大尺度区域内应用时存在很多问题和矛盾,难以成为一种用于管理实践的评估方法,只适用于小区域非点源污染过程的精细模拟。

在进行模型研究时,应根据评估区实际情况,考虑人为管理、地形坡度、降雨、种植作物等因素及其影响权重,对输出系数做出改正,获得有科学基础的可靠输出参数,使模拟误差变小^[20-21]。借助特定的技术与管理措施对农业面源污染进行管控,同时评估土地利用变化,可以为流域水质环境管理与规划决策提供可靠依据^[22-24]。

2 国内外模型研究进展

2.1 国外研究进展

国外面源污染模型的发展过程可以分为 4 个阶段,即经验统计模型、机理模型、功能模型,以及引入“3S”技术和不确定性的改进版模型^[25]。

(1)经验型模型。通过寻找污染输出负荷与流域土地利用、地形特征或径流量之间的关系建立经验模型,具有较高的准确性和较强的实用性,可用于模拟稳定水体如湖泊和水库的营养物负荷和富营养化问题。经验型模型在面源污染模型开发的前期阶段(20 世纪 60 年代—70 年代初)得到了广泛应用,主要包括美国农业部水土保持局开发的 SCS 模型、出口系数模型(ECM)和改进的出口系数模型(IECM),以及美国环保局的 Screening Procedures 模型等。此类模型缺少对污染源迁移路径与机理的研究,不能很好地描述污染物迁移过程,并且由于其固有的小区域特征而不能在广泛或大的区域中使用,因而具有区域的局限性。

(2)机理模型。随着对农业面源污染研究的深入及对污染物监测力度的加大,加上计算机模拟技术的广泛运用,确定型模型逐步成为主流研究方向。确定型模型综合经验统计模型的数据输入,定量描述面源污染系统内部的迁移转化过程,并对关键源区进行识别,分析其时空变化特征。此类模型被称为“白盒”研究方法,考虑污染过程的内部机制,能够计算长时间序列并具有更清晰的空间特征分布。如 HSPF 模型能够自动提取模拟区域所需要的地形、地貌、土地利用、土壤、植被、河流等数

据,进行面源污染负荷的长时间连续模拟。然而,由于参数对大量输入数据的要求及有限的可用信息,此类模型难以得到校准和验证,限制了其在大规模区域的使用。

(3) 功能模型。功能模型是20世纪80年代—90年代在前两种模型基础上优化得到的一种系统模型,其代表模型有ANSWERS、AGNPS、SWAT。AGNPS是由美国农业部农业研究局与明尼苏达污染防治局共同研制的计算机模拟模型,除了对化肥施用、降雨和径流及渗透进行模拟外,还可以对地表水和地下水中的氮平衡进行连续模拟,适用于研究200 km²以下流域农业区域的污染负荷,评价不同管理措施的效果。SWAT是由美国农业部开发的适用于较大流域尺度的面源污染负荷计算模型,其是一个分布参数计算模型,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,还能辅助水资源管理者评价水质、营养物和杀虫剂等面源污染及相应的管理措施。

(4) 引入“3S”技术和不确定性的改进版模型。20世纪90年代之后,“3S”技术已经普遍应用于模型研究中,成为面源污染模型重要的组成部分,使模型在数据分析处理、模拟因子数量、计算能力、结果分析与显示方式方面的能力大为提高,一些大的模型系统也相继问世,包括美国环保局开发的BASINS,以及SWAT、AGNPS等模型的改进版^[14]。

由于模型使用时基础数据信息的匮乏及误差、参数值不够准确等原因,使得模型模拟系统无法消除不确定性,处理不确定性的主要代表模型包括传递函数模型理论或者敏感参数等。当机理模型中的参数存在较大的空间变异性和某些变量存在时间变异性时,将其参数或边界条件处理为随机变量,模型的运行结果转变为输出变量的一个统计分布或范围^[15]。如Jury提出的传递函数模型具有较完备的理论基础,将溶质在土壤孔隙中复杂的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^[16]。目前,处理面源污染不确定性的定量方法较少且不太成熟,通过对相关研究方法的分析和归纳,总结出适用于非点源污染不确定性的定量分析方法主要有灵敏性分析、一阶误差分析、蒙特卡罗方法、Bootstrap方法、傅立叶敏感性检验法等。

2.2 国内研究进展

我国的农业面源污染研究起步于20世纪80年代初的江河、水库等水质富营养化调查及水质规划,并取得了一些成果^[26]。

(1) 国内建立的经验统计模型和简单的机理模型。如李怀恩^[18]提出的平均浓度法是经验统计模型的一个代表,利用有限的基础监测资料,基于输入的基础数据,利用经验分析和统计分析方法估算流域农业面源污染年负荷量^[27]。张瑜芳等^[28]提出了不同排水前提下农田氮素迁移转化、流失的简单计算模型。黄满湘等^[29]采用田间试验,以降雨产生的径流过程为模拟基础,研究了北京地区农田范围内降雨径流过程氮素流失与降雨强度,包括田间作物种植情况与施肥情况之间的关系。相比国外模型软件,此类模型要求数据包含的类型和数量较少,模型费用相对较低,对于我国处于发展阶段的面源污染模型研究具有重要意义。

(2) 引进国外成熟的机理或功能模型,结合本国实际二次开发的模型。现阶段我国在面源污染模型上的研究主要基于引进国外成熟的模型软件。如蔡明等^[30]改进了输出系数法,使其更加适用于流域面源污染负荷估算。陈欣等^[31]基于AGNPS模型对南方丘陵区小流域磷素流失情况进行预测,经过验证,该模型模拟结果与实际观测结果具有较高的相关性。范丽丽等^[32]利用SWAT模型对大宁河流域的农业面源污染负荷量进行模拟计算,经过验证,该模型计算结果与实际观测结果具有较高的相关性。翟玥等^[33]利用SWAT模型对洱海农业面源污染定量描述分析,确定了对洱海流域面源污染影响最为严重的几种污染源,并估算了负荷量。

(3) 国内面源污染模型不确定性研究及定量分析面源污染的不确定性。只有深入分析面源污染模拟结果不确定性的来源和解决办法,对模型进行最优化,才能提高模型的有效性,促进模型进一步应用。廖谦等^[34]围绕农业面源污染模拟的不确定性问题,介绍了国内外常用的模型及其不确定性来源,着重探讨了模型参数、结构和输入信息等不确定性的研究方法及其应用进展,并提出定量分析面源污染的不确定性是今后的研究趋势。

2.3 国内外研究比较

我国的农业面源污染研究起步较晚。杨林章^[35]总结性地提出了农村面源污染治理的“4R”理论与技术,构建了农村面源污染治理的总体思

路、相关技术集成与工程化应用框架。“4R”控制技术体系是以污染物削减为根本,从污染物的源头减量(Reduce)入手,根据治理区域的污染汇聚特征进行过程阻断(Retain),通过对养分的循环再利用(Reuse)减少污染物的入水体量,并对水体进行生态修复(Restore),从而实现水质改善的目的。源头减量-过程阻断-生态修复三者之间在逻辑上一环紧扣一环,呈串联结构,养分再利用则将三者在地域空间上有效地连接起来,使其成为一个复杂的网络体,从而达到污染控制技术在时间和空间上的全覆盖,使整个系统的污染控制效果更好。

赵人俊教授及其团队在总结研究大量数据和

经验的基础上创立的新安江模型,是基于蓄满产流理念创立的一个蒸发、产流、汇流等环节的连续计算公式,应用于我国湿润和半湿润地区的降雨径流模型。该模型是在国际上受到广泛认可的我国原创模型,也是一个不断丰富发展的模型理论体^[36-37]。目前,我国绝大部分研究都是沿用国外优秀的科学理念与现有模型,今后应投入更多的人力物力,获得更加准确的基础监测数据和参数,建立更加符合我国国情的流域农业面源污染模型,更好地服务于综合治理规划^[38-39]。常用的农业面源污染模型见表 1^[15,40-44]。

表 1 常用的农业面源污染模型
Table 1 Main agricultural NPS model

模型	类型	主要内容	优点	局限性
AGNPS	事件驱动分布式模型	水文、化学和侵蚀/沉积物运输	模拟集水区特性的空间分布,给出与实验相比较的即时响应,有助于理解侵蚀过程	需要专门和广泛的数据、大量的工作和较强的编程能力;无法评估养分转化及流内过程
ANSWERS	分布式参数,面向事件的模型	水文、蒸发-蒸腾、入渗和陆上泥沙输送	程序代码易于修改,预测结果与观测数据具有可比性	无法模拟流内过程和子过程(如融雪或农药);需要精细的输入数据准备,并且需要计算密集型;输出对输入变量的微小变化非常敏感,验证难度大
SWAT	连续、半分布、盆地尺度模型	水文、气候、营养、泥沙输送	考虑了农村和农业管理措施的长期影响,以及汇流和泥沙汇合,可用于专门的流程如细菌载运	模型运行需要大量的输入文件;无法模拟水体中溶解氧的日变化,无法准确评估极端日流量发生、土壤氮碳复杂动态演化和产流模拟;在不同研究区域使用时必须修改数据库
CREAMS	场尺度集总逼近模型	水文、化学和侵蚀/沉积物运输	预测单个降雨事件,计算径流量和暴雨负荷,可用简单的数学术语表示	有限的仿真能力,无法模拟流内过程;对用户的能力要求高,很容易误用和解释模型输出
HSPF	长期连续仿真模型	水文、气候和泥沙运输	有效地评估径流、泥沙输送、养分和农药浓度的流速,预测结果令人满意,能够模拟水流过程	依赖于许多经验关系来表示物理过程,并需要广泛的校准和高水平的专业知识;需要高数据集,而且不考虑流域的空间分布
EPD-RIV1	一维水动力模型	水动力与水质	模拟面源污染物对水质和水流过程的影响	对数据的要求很高,需要高水平的专业知识
DMA	数学模型	水文	估算流域面源污染流出量	在划分流域时不能划定水文统一区域;不将面源污染输入视为陆路流量

3 “3S”耦合的农业面源污染模型发展趋势

“3S”技术在 20 世纪 90 年代之后被广泛应用于面源污染综合防治,并成为农业面源污染建模中不可或缺的技术支撑^[45-46]。由于农业面源污染产生时与一些下垫面情况紧密相关,包括区域地形、土壤状况、土地利用等,因而能否获取准确的地表信息是影响模型准确度的重要因素^[47]。早期通过人工测量监测径流水质,以获取基础数据,方法成本高、周期长、精度差、劳动强度大、效率低,成为制约农业面源污染模型发展的主要因素^[11]。RS 作

为现代对地探测和识别的高效技术,可以全面、实时、大范围地获取流域内的基础空间数据信息,大大提高了面源污染研究的效率和精准程度,是面源污染模型研究的重要数据源^[48]。GIS 作为空间信息的管理、查询、可视化和分析工具,是辅助扩散污染建模和在空间环境可视化结果的一种方法,逐步成为面源污染模型研究领域的热门方向^[49-50]。在纯物理机制的模型发展遇到瓶颈时,“3S”技术带来了新的契机,使面源污染模型更加注重功能化、实用化,同时具备相对明确的物理机制,即所谓的

基于“3S”的功能模型^[51]。

21世纪以来,国内学者开始将AGNPS、AnnAGNPS、SWAT等模型与GIS结合开展研究^[52]。曾远等^[53]将AGNPS模型与GIS相结合,对平原河流网络系统地表积水径流量和氮磷流失负荷进行了定量预算。黄金良等^[54]将GIS与AnnAGNPS模型相结合,校验了连续-分布式参数模型在九龙江流域的适用性。Hao等^[55]研究了SWAT模型在黄河流域高径流模数(770 t/km²)的适用性。周慧平等^[56]针对降雨和下垫面自然参数空间分布不均匀的特点,研究了基于栅格数据的流域降雨径流模型。

4 展望

水污染是中国乃至全球的重点治理方向,未来面源污染研究应紧密围绕改善水质的目标,要求模型不仅能够充分和有效地模拟水体中的面源污染物,而且可以灵活采用水质参数,时间效率高,对不同污染来源和不同地点普适性强,针对国内数据有限、缺乏长序列监测信息的情况灵活构建模型。需要进一步研究基于“3S”技术的面向全流域尺度的面源污染负荷估算方法,加强面源污染物进入沟渠和河流网络的过程机理研究,更多地利用综合模拟技术,对大气、水文、水质综合系统进行模拟。引入地理时空概念,对不同种类的污染物开展全面研究,关注不同尺度的地下水污染及环境健康效应,深入耦合污染模型并拓展到生物学层面,寻找其尺度效应和规律,为农业面源污染输出、模型模拟和优化,以及径流变化和土壤属性对面源污染输出的影响等研究提供更好的支撑。

随着“3S”技术的发展,模型参数获取手段和方法取得突破,可以通过数据同化与融合来转换尺度破解水文过程、土壤侵蚀和污染物迁移转化过程中参数的不确定性问题,提高模型的有效性。通过互联网爬虫获取污染地信息和位置更加便捷,可以利用大数据网络平台结合众源数据,基于云计算处理生成高精度的污染识别或管理模型,获取更多实时、高精度、有效的农业面源污染源监测数据并进行特征分析,使模拟结果更加准确。“互联网+”与农业面源污染模型相结合有利于农业面源污染监管与治理,同时推进与社会公众的信息交流,形成农业面源污染治理的多元循环。

国内的农业面源污染模型研究主要依据特定流域情况建立经验模型,或者引用国外优秀成熟的

模型进行流域范围内的验证并对其模拟运用,真正适合国内复杂流域情况的模型研究较少。因此,迫切需要建立适用于国内复杂多变的流域并能反映区域时空变异特征的面源污染机理模型。模型建立与验证需要环保、水文、气象、农林等多项监测基础数据资料支持,而国内的基础调查工作只在个别城市和流域进行,调查的内容与精度不足,使得模型建立与验证缺少数据支撑,难以获得准确且符合我国流域特性的面源污染模型。由此可见,只有建立完整的基础监测数据网络,才能推动我国面源污染模型研究的进一步发展。

[参考文献]

- [1] 于维坤,尹炜,叶闯,等. 面源污染模型研究进展[J]. 人民长江,2008,39(23):83-87.
- [2] 张维理,武淑霞,冀宏杰,等. 中国农业面源污染形势估计及控制对策. I. 21世纪初期中国农业面源污染的形势估计[J]. 中国农业科学,2004,37(7):1008-1017.
- [3] 李建军,李玉庆. 农田面源污染现状及研究进展[J]. 中国科技信息,2017(19):65-67.
- [4] 宋涛,成杰民,李彦,等. 农业面源污染防治研究进展[J]. 环境科学与管理,2010,35(2):39-42.
- [5] WANG X M, YANG F, YANG S X, et al. Study on non-point source nitrogen and phosphorus pollution and its law of accumulation in villages and towns[J]. Argo Food Industry Hi-Tech, 2017,28(3):2005-2009.
- [6] 王庆海,李翠,郑瑞伦,等. 我国农田农药流失现状及减控策略[J]. 环境监测管理与技术,2018,30(1):11-15.
- [7] 李丽娜,谢靖,盛思远,等. 农业面源污染控制研究[J]. 南方农机,2018,49(7):37-38.
- [8] SHEN Z Y, LIAO Q, HONG Q, et al. An overview of research on agricultural non-point source pollution modelling in China[J]. Separation and Purification Technology,2012,84:104-111.
- [9] 于峰,史正涛,彭海英. 农业非点源污染研究综述[J]. 环境科学与管理,2008,33(8):54-58.
- [10] 叶闯,杨国胜,张万顺,等. 城市面源污染特性及污染负荷预测模型研究[J]. 环境科学与技术,2006,29(2):67-69.
- [11] 仓恒瑾,许炼峰,李志安,等. 农业非点源污染控制中的最佳管理措施及其发展趋势[J]. 生态科学,2005,24(2):173-177.
- [12] 孙棋棋,张春平,于兴修,等. 中国农业面源污染最佳管理措施研究进展[J]. 生态学杂志,2013,32(3):772-778.
- [13] 耿润哲,王晓燕,赵雪松,等. 基于模型的农业非点源污染最佳管理措施效率评估研究进展[J]. 生态学报,2014,34(22):6397-6408.
- [14] 唐浩,熊丽君,黄沈发,等. 农业面源污染防治研究现状与展望[J]. 环境科学与技术,2011,34(S2):107-112.
- [15] 余进祥,刘娅菲. 农业面源污染理论研究及展望[J]. 江西农业学报,2009,21(1):137-142.

- [16] 高懋芳,邱建军,刘三超,等. 基于文献计量的农业面源污染研究发展态势分析[J]. 中国农业科学, 2014, 47(6): 1140-1150.
- [17] 马广文,王业耀,香宝,等. 长江上游流域土地利用对面源污染影响及其差异[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(4): 791-797.
- [18] 李怀恩. 估算非点源污染负荷的平均浓度法及其应用[J]. 环境科学学报, 2000, 20(4): 397-400.
- [19] 郝芳华,杨胜天,程红光,等. 大尺度区域非点源污染负荷计算方法[J]. 环境科学学报, 2006, 26(3): 375-383.
- [20] ZHANG P, LIU Y, PAN Y, et al. Land use pattern optimization based on CLUE-S and SWAT models for agricultural non-point source pollution control[J]. Mathematical and Computer Modelling, 2013, 58(3/4): 588-595.
- [21] 王文章,敖天其,史小春,等. 基于输出系数模型的射洪县农村面源污染负荷估算[J]. 环境工程, 2018, 36(1): 173-177.
- [22] 袁星,王亚炜,魏源送,等. 基于最佳管理实践的中新生态城面源污染控制措施优选研究[J]. 环境工程学报, 2013, 7(11): 4231-4235.
- [23] 王玲玲,张斌,闫春森,等. 三峡库区面源污染综合管理前景与方法探究[J]. 环境科学与技术, 2013, 36(S1): 311-314.
- [24] TANG Z, ENGEL B A, PIJANOWSKI B C, et al. Forecasting land use change and its environmental impact at a watershed scale[J]. Journal of Environmental Management, 2005, 76(1): 35-45.
- [25] 张婉莹,郁亚娟,孙秀秀. 流域农业面源污染控制模拟优化系统的软件实现[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(8): 451-454.
- [26] 廖炜,李璐,杨伟,等. 城镇化过程中的流域面源污染时空变化[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(8): 1776-1783.
- [27] GRUNWALD S, NORTON L D. Calibration and validation of a non-point source pollution model[J]. Agricultural Water Management, 2000, 45(1): 17-39.
- [28] 张瑜芳,张蔚榛,沈荣开. 排水农田氮素运移、转化及流失规律的研究[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 1996, 11(3): 251-260.
- [29] 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.
- [30] 蔡明,李怀恩,庄咏涛,等. 改进的输出系数法在流域非点源污染负荷估算中的应用[J]. 水利学报, 2004(7): 40-45.
- [31] 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.
- [32] 范丽丽,沈珍瑶,刘瑞民,等. 基于SWAT模型的大宁河流域非点源污染空间特性研究[J]. 水土保持通报, 2008, 28(4): 133-137.
- [33] 翟玥,尚晓,沈剑,等. SWAT模型在洱海流域面源污染评价中的应用[J]. 环境科学研究, 2012, 25(6): 666-671.
- [34] 廖谦,沈珍瑶. 农业非点源污染模拟不确定性研究进展[J]. 生态学杂志, 2011, 30(7): 1542-1550.
- [35] 杨林章. 我国农田面源污染治理的思路与技术[J]. 民主与科学, 2018(5): 16-18.
- [36] 李致家,周轶,哈布·哈其. 新安江模型参数全局优化研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2004, 32(4): 376-379.
- [37] 赵人俊,王佩兰. 新安江模型参数的分析[J]. 水文, 1988(6): 2-9.
- [38] 梁流涛,曲福田,冯淑怡. 经济发展与农业面源污染:分解模型与实证研究[J]. 长江流域资源与环境, 2013, 22(10): 1369-1374.
- [39] 黄东风,王果,陈超. 农业面源污染研究概况及发展趋势[J]. 中国农村小康科技, 2006(11): 39-45.
- [40] 李颖,王康,周祖昊. 基于SWAT模型的东北水稻灌区水文及面源污染过程模拟[J]. 农业工程学报, 2014, 30(7): 42-53.
- [41] 黄晓秋. 基于SWAT模型的大凌河流域面源污染模拟影响分析[J]. 水利规划与设计, 2018(4): 53-55.
- [42] 杨宝林,崔远来,赵树君,等. 基于SWAT模型的莲塘口流域农业面源污染模拟[J]. 武汉大学学报(工学版), 2016, 49(3): 359-364.
- [43] KINNELL P. AGNPS-UM: applying the USLE-M within the agricultural non-point source pollution model[J]. Environmental Modelling & Software, 2000, 15(3): 331-341.
- [44] 张建. CREAMS模型在计算黄土坡地径流量及侵蚀量中的应用[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1995, 1(1): 54-57.
- [45] 雷能忠,黄大鹏. 基于GIS的农业面源污染风险评估[J]. 中国农学通报, 2007, 23(12): 381-385.
- [46] 苏东彬,姚琪,戴枫勇,等. 基于GIS的SWAT模型原理及其在农业面源污染中的应用[J]. 水利科技与经济, 2006, 12(10): 712-714.
- [47] 万超,张思聪. 基于GIS的潘家口水库面源污染负荷计算[J]. 水力发电学报, 2003(2): 62-68.
- [48] 孙本发,马友华,胡善宝,等. 农业面源污染模型及其应用研究[J]. 农业环境与发展, 2013(3): 1-5.
- [49] 毛鹏,周美春,胡国仲. GIS在农业面源污染研究中的应用[J]. 现代农业科技, 2013(21): 246-247.
- [50] 文建辉,李建,许睿,等. 基于GIS技术和线性结构模型的漓江流域水污染状况分析[J]. 环境监测管理与技术, 2018, 30(1): 27-30.
- [51] 张德利. “3S”技术在盐城市农业环境面源污染监测中的应用[J]. 河北农业科学, 2008, 12(11): 135-137.
- [52] 武升,张俊森,张东红,等. 小流域农业面源污染评价与综合治理研究进展[J]. 环境污染与防治, 2018, 40(6): 710-716.
- [53] 曾远,张永春,张龙江,等. GIS支持下AGNPS模型在太湖流域典型圩区的应用[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(3): 761-765.
- [54] 黄金良,洪华生,杜鹏飞,等. AnnAGNPS模型在九龙江典型小流域的适用性检验[J]. 环境科学学报, 2005, 25(8): 1135-1142.
- [55] HAO F H, ZHANG X S, YANG Z F. A distributed non-point source pollution model: calibration and validation in the Yellow River Basin[J]. Journal of Environmental Sciences, 2004, 16(4): 646-650.
- [56] 周慧平,高超,朱晓东. 关键源区识别:农业非点源污染控制方法[J]. 生态学报, 2005, 25(12): 3368-3374.