



推荐阅读:

[广西城市污水处理厂污泥产生及处置现状分析](#)

[平顶山市煤矿区土壤重金属污染程度评价](#)

[基于灰色关联分析法的宜昌市空气质量影响因素分析](#)

[废旧锂离子电池流向及管理现状调研](#)

[生物法处理气态污染物的研究现状与应用前景](#)

[环境敏感区农村生活污水处理工艺设计案例分析](#)

[氨法脱硫+低温 SCR 脱硝工艺在焦炉烟气净化中的应用](#)

[反渗透双膜工艺处理印染废水研究进展](#)

[重金属污染土壤修复技术研究进展](#)

[基于 SARIMA 模型的二氧化氮时间序列预测研究](#)

[碳基功能材料在土壤修复中的应用](#)

[虾蟹壳对水中刚果红吸附性能的研究](#)

[农村生活垃圾生物质热解和燃烧气相数值模拟](#)

[基于灰色 GM\(1, 1\)模型的成都市大气污染物浓度预测](#)

[江苏省非道路移动源大气污染排放清单研究](#)

[欧盟 15 国污水污泥产生量与处理处置方法对比](#)

[基于 Hydrus-1D 的粉煤灰堆场 Cr\(VI\)在包气带中迁移规律的研究](#)

[工业废水活性炭深度处理的研究](#)



移动扫码阅读

周梦娇,冯华军,沈霞娟.农业面源污染模型研究进展[J].能源环境保护,2020,34(3):1-7.

ZHOU Mengjiao, FENG Huajun, SHEN Xiajuan. Research progress of agricultural non-point source pollution models[J]. Energy Environmental Protection, 2020, 34(3): 1-7.

农业面源污染模型研究进展

周梦娇¹, 冯华军^{1,*}, 沈霞娟²

(1. 浙江工商大学 环境科学与工程学院, 浙江 杭州 310012;

2. 嘉兴市秀洲区环境保护监测站, 浙江 嘉兴 314000)

摘要:介绍了 USLE、CREAMS、EPIC、ANSWERS、AGNPS、AnnAGNPS、SWRRB、SWAT 等常用的农业面源污染模型的研究历程,讨论了模型的基本组成、特点和现有问题。针对农业面源污染模型在数据获取、模拟结果和模型引进本土化等问题,提出了新的研究思路。对发展趋势的分析可以发现:农业面源污染模型将更多地作为大型流域集成管理模型的第一部分进行开发,并且向环境评估和管理等方面发展;新兴技术可促进模型优化,“3S”技术将成为农业面源污染模型研究的热点。

关键词:农业面源;模型;污染“3S”技术

中图分类号:822.1

文献标识码:A

文章编号:1006-8759(2020)03-0001-07

Research progress of agricultural non-point source pollution models

ZHOU Mengjiao¹, FENG Huajun^{1,*}, SHEN Xiajuan²

(1. School of Environmental Science and Engineering, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou 310012, China;

2. Jiaxing Xiuzhou Environmental Protection Monitoring Station, Jiaxing 314000, China)

Abstract: The research process of common agricultural non-point source pollution models such as USLE, CREAMS, EPIC, ANSWERS, AGNPS, AnnAGNPS, SWRRB and SWAT were introduced, and their basic composition, characteristics and existing problems were discussed as well. In view of the problems regarding data acquisition, simulation results and localization of imported models, several new research ideas were proposed. The analysis of future research show that the agricultural non-point source pollution models will be developed more as the first part of the integrated management model of large watersheds focusing on environmental assessment and management. New techniques helps optimize models. In particularly, "3S" technology will become a research hotspot of agricultural non-point source pollution models.

Key Words: Agricultural non-point source; Model; Pollution "3S" technology

0 引言

近年来,在一系列农业扶持政策的指导下,我国农村农业经济发展态势向好,农业发展过程中产生的环境污染问题也日益凸显,农业面源污染的氮磷排放量分别占水环境中氮磷污染总量的

81%和93%^[1-2]。由此可见,农业面源污染的治理势在必行。但与工业点源相比,农业面源污染具有随机性、滞后性、涉及面广、控制难度大等特点^[3],使得农业面源污染的研究和治理难度较大,尤其是农业面源污染负荷的核算,不能与工业点源一样简单地通过水质水量来计算。

收稿日期:2019-10-30

基金项目:水体污染控制与治理科技重大专项(No.2018ZX07208-009)

第一作者简介:周梦娇(1990-),女,河北保定人,硕士研究生,主要从事水污染控制研究工作。E-mail:619940858@qq.com

通信作者简介:冯华军(1980-),男,浙江舟山人,硕士生导师,主要从事水污染控制研究工作。E-mail:Fenghuajun@mail.zjgsu.edu.cn

面源污染模型是核算农业面源污染负荷,制定农业面源污染治理对策,评估农业面源防治效果的有效手段,也是目前国内外学者普遍使用的方法。面源污染模型耦合了水文水利、气象气候、地理环境、污染物转化等一系列影响因素,以野外实地考察为基础,结合计算机、卫星遥感等技术,在时间及空间尺度上对面源污染进行量化研究,从而探查污染物的来源,确定污染物的浓度,核算污染物负荷,然后基于计算结果预测污染造成的影响并提出可行的管理措施,对污染治理和环境管理决策提供支持^[4]。目前我国研究者使用的面源污染模型多种多样,每种模型的特点不一,优劣势明显,针对的污染类型也不尽相同。例如 EPIC 模型只能应用于农田小区,模拟的污染物主要有氮、磷和农药,而 HSPF 模型适用于流域尺度,可对 COD 进行模拟研究^[2]。

本文从农业面源污染模型发展历程角度出发,详细介绍了常用的几种农业面源污染模型,逐一讨论各模型的基本组成和优缺点。通过分析农业面源污染模型在实际应用中遇到的问题,指出农业面源污染模型的未来发展方向。

1 常用的农业面源污染模型

目前农业面源污染模型在学术上尚未形成统一的分类系统,认可度较高的是根据模型的发展历程及特征将模型分为 3 类^[5]。一是统计模型,又称经验模型,这类模型形式简单而且只注重应用,在形式上大多仅为一个公式,获得方法通常是经过长年累月的数据积累、整理和总结,从中归纳出一个普适性的经验方程;二是机理模型,这类模型从污染产生的源头出发,探究了污染物的输移和转化过程,对污染形成的过程进行了解释;三是流域综合模型,这类模型包含的内容广泛,而农业面源污染则作为其中的子模块进行模拟。本文大体沿用此分类方法对模型进行介绍。

1.1 统计模型

农业面源污染研究之初,人们普遍认为是雨水冲刷土壤带走了污染物,研究者首先从土壤侵蚀入手,从而提出了通用土壤流失方程(USLE)。1965 年美国农业部颁布了农业手册,详细介绍了 USLE 的使用方法^[6],其公式为

$$A = R \times K \times L \times S \times C \times P$$

其中 A 表示平均年度土壤流失量, t/hm^2 ; R 表示降雨径流侵蚀指数, $10^6 J \cdot mm/(hm^2 \cdot h \cdot a)$;

K 表示土壤侵蚀性因子, $kg \cdot m^2 \cdot h/(10^6 J \cdot mm \cdot hm^2)$; L 和 S 表示斜面长度和坡度的地形因子,无量纲; C 表示作物管理因子,无量纲; P 表示土壤保持系数,无量纲。

该公式只适用于中等质地土壤,在坡度小于 120 m、坡度介于 3% 和 18% 之间的地区准确度较高,因此 USLE 的通用性不强^[7]。

1985 年,美国农业部对 USLE 进行了修正,形成了修正通用土壤流失方程(RUSLE)。在 R 值和 K 值的计算方法上都进行了改进,同时把作物管理因子分成多次因子,从而使该模型能更灵活地描述种植制度、保土耕作措施和轮作等情况^[8]。之后美国农业部在 RUSLE 基础上研发了 RUSLE 2.0 版本,该版本采用独立参数的方法,要求用户充分描述 6 大因子的具体状态,使得预测结果更加准确,使用范围更加灵活,与其他模型的相容性更高^[9]。

USLE 及其修正模型引入我国后,我国研究者更多的将该模型应用于土壤侵蚀定量评价及土壤侵蚀空间分布的研究中,例如史志华等^[10]使用 RUSLE 模型估算了小流域农田土壤侵蚀量,左琳琳^[11]通过通用土壤侵蚀方程计算得到 2015 年巢湖流域农田面源土壤侵蚀量小于 $8\,584.89\,t/hm^2 \cdot a$,王娇等^[12]通过 USLE 模型对太行山水土流失空间分布特征进行研究,从而确定了区域水土流失敏感性定量评价的方法和模式。

USLE 及其修正模型仅对区域土壤侵蚀做出了模拟,未考虑氮、磷、农药及其它化合物^[13],适用范围较窄,但它的灵活性和简便性使其在农业面源污染模拟应用中较为广泛。虽然诸多机理性模型已被研发并投入使用,但在应用过程中为了操作简便,仍使用通用土壤流失方程作为农业面源污染模块^[14]。

1.2 机理模型

单纯的土壤侵蚀模拟不能满足农业面源污染研究的需要,研究者试图从污染形成的机理方面进行深入探究,因此 CREAMS 模型应运而生。上世纪 70 年代,美国农业部研发建立了 CREAMS 模型^[15],该模型首次系统考虑了面源污染中水文、土壤侵蚀和污染物转移过程,从污染物迁移转化的角度探究面源污染的产生。较多研究者认为 CREAMS 模型的出现具有里程碑式的意义,标志着农业面源污染模型进入机理研究阶段。

CREAMS 中的水文模型一般采用日降雨量估

算日平均径流量;侵蚀模型是根据水文模型的输出以及降雨动能、土壤可蚀性指标等估算侵蚀量;化合物模型则依据水文模型和侵蚀模型的输出以及所要模拟化合物的特征,估算污染物的流失量^[16]。考虑到 CREAMS 模型不能评估农药使用对环境造成的影响,美国农业部在其基础上提出 GLEAMS 模型^[17],该模型考虑了农药随地下渗漏进入地下水的过程,在模型中增加了农药的垂直通量模拟,模拟在不同管理模式,农药对地下水产生的影响。

EPIC 模型则是对 CREAMS 模型的更进一步改进,将模块增加到 9 个,分别是气候模块、水文模块、土壤侵蚀模块、养分循环模块、土壤温度模块、作物生长模块、耕作模式模块、经济效益模块、作物环境控制模块、农药和杀虫剂模块、C 循环模块,后又增加了农药和杀虫剂模块和 C 循环模块,构成了由 11 个模块组成的内容丰富、体系庞大的模型。该模型可以综合评价作物产量、水土流失、气候变化影响、农田水肥管理等。

EPIC 模型引入我国后,单独作为面源污染模型应用的研究并不多见,研究学者更多的将 EPIC 作为作物生长模型,用于评估土壤和气候变化对土壤侵蚀和作物产量的影响。例如潘东华等^[18]通过 EPIC 模型探究了中国西南地区石漠化对玉米旱灾风险的影响。

近年来,部分学者开始尝试将 EPIC 模型用于土壤侵蚀的研究中。汪邦稳等利用径流小区的实测数据计算了皖西、皖南主要土壤可蚀性值,并对 EPIC 模型进行了验证^[19];罗兰花构建了基于 EPIC 模型的水土流失数据测量误差评估方法^[20]。

1.3 流域综合模型

为了探究农业面源污染产生的机理,在之前的研究过程中设定的假设条件范围都较少,大多以小田块为单元,使得农业面源污染模型应用时在空间尺度上受到限制。从适用时间范围来看,机理模型大多只能模拟单次降雨过程,不能实现连续性。因此农业面源污染模型模拟开始着手于时间和空间的大尺度拓展,例如 ANSWERS 模型和 AGNPS 模型实现了空间上的拓展,AnnAGNPS 模型则实现了连续模拟。

1980 年 Beasley 提出了 ANSWERS 模型^[21],是一个基于降水事件的分布式参数模型,它的一个假设条件是径流量与水文参数构成函数关系,所以 ANSWERS 模型在使用时,首先要用网格法

将流域划分为若干个单元,相邻的两个网格之间,以第一个网格的流出结果作为第二个网格的流入初始值,逐个演算,得到最终结果。ANSWERS 模型通过这种将大流域划分成小网格的方式,实现了模型研究在空间上的扩大。

AGNPS 模型是 1987 年美国农业部与明尼苏达污染防治局共同开发的计算机模拟模型^[22]。该模型是典型的流域分布式事件模型,但与 ANSWERS 模型不同的是,在实际操作中,AGNPS 模型首先将流域划分为若干个正方形网格,然后将这些网格产生的地表径流汇流到一起进行计算,经演算后即可得出氮、磷和化学需氧量(COD)随颗粒物转移及沉积物迁移富集等结果。Perrone 等^[23]在加拿大的魁北克省内一个小流域试验田里评估了 AGNPS 模型,该试验模拟了 12 次暴雨径流产生的泥沙量,模拟值和实测值的平均误差在 10%~15%之间。

AGNPS 模型在评价和预测农业面源污染方面表现良好,但该模型只能模拟单次事件。因此研究者又开发了 AnnAGNPS 模型^[24],相较于 AGNPS 模型,AnnAGNPS 模型有 3 大突出特点^[25]:一是改变了流域划分方式,采用了更能表征流域水文特点的集水区划分法;二是通过连续模拟及累计计算,实现了长时序的模拟预测;三是采用了修正的土壤流失方程,提高了模型的精准性。王飞儿等^[26]利用 AnnAGNPS 模型对千岛湖的氮磷输出总量进行了预测,结果显示预测值和实测值的误差在 10%之内,证明该模型在模拟农业面源污染方面效果良好。

目前在这几种模型中 AnnAGNPS 模型的使用比较普遍,研究内容涉及氮磷流失、参数不确定性分析、水文模拟、土壤流失等多个方面。例如赵串串等^[27]运用 AnnAGNPS 模型对流域内氮磷流失污染特征进行了定量分析,并以灞河为例提出面源污染控制方案。高瑞梅^[28]通过 AnnAGNPS 模型对罗李村流域水文进行了模拟与评价,结果显示该模型适用于罗李村流域的径流过程模拟;亓潘^[29]通过 AnnAGNPS 模型对砭砂岩小流域的径流和产沙量进行了模拟,结果表明,径流和产沙年际变化很大,且空间分布不均。

在农业面源模型从内容到形式上都逐渐完善之后,研究者开始关注流域的整体情况,而农业面源则作为构成流域的一部分来研究,因此出现了一批更注重实用性的功能性综合集成模型,具有

代表性的有 RZWQM 模型、SWAT 模型等^[30-31]。

SWAT 模型是在 SWRRB 模型基础上发展起来的一个可应用于大流域的模型,也是目前使用范围最广,最受研究者关注的一个模型。SWRRB 模型是一个具有物理机制的田块尺度非点源污染模型,随后又加入了 GLEAMS 的杀虫剂部分和 EPIC 的作物生长部分,形成了一个可以模拟评价小流域尺度非点源污染的模型。但 SWRRB 模型仅能将研究区域划分为 10 个亚区,且每个区域的径流量和泥沙量出口必须与流域出口保持一致,这就严重限制了它的使用范围。SWAT 模型可以通过按一定规则划分的水文响应单元单独计算地表径流量,然后进行汇流演算,克服了不能应用于大流域的瓶颈^[32]。同时,SWAT 模型又是一个物理基础模型,且可以进行长时序的模拟^[33]。

2 农业面源污染模型发展中存在的问题

2.1 基础数据获取困难

模型基础数据的代表性、模型计算单元的精细程度以及模型参数的准确性是模型模拟的关键问题之一^[34]。随着模型相关研究的不断深入,模型结构越来越完善,内容越来越丰富,但同时大数据的数量和精度要求越来越高。例如 BASINS 系统中用来模拟农业面源污染的 HSPF 模型,需要输入长时序的降雨和蒸发等数据,同时也需要与之对应的水文及水质的数据去校正模型^[35]。而我国的农业面源研究起步晚,监测工作薄弱、资金投入短缺^[36],导致面源数据积累少,数据连续性差,数据密集程度不高等问题。同时,我国数据共享程度低也是限制农业面源污染模型广泛应用的原因之一。但随着我国数据化、信息化的进步,以及水文水质等数据收集站监测点的增多和发展,所需的气象数据、土壤数据、土地利用数据、河道水力数据和其他相关数据将更易获取^[37]。农业部自 2012 年开始在全国建立了 273 个农田面源污染国控监测点和 25 个规模化养殖污染物排放国控监测点^[38]。随着面源污染研究的不断拓展与深入,农业面源污染模型基础数据缺乏问题将会逐步得到解决。

2.2 模型不确定性分析是难点

模型模拟结果的不确定性源于人们对自然系统认识的局限性,任何模型的模拟结果与自然系统的实际情况之间都存在误差,且这些误差的大小和分布都无法确定^[39],因此需要进行不确定性

分析。不确定性分析主要从 3 方面着手,一是污染过程本身,二是模型的结构和参数,三是数据来源和准确性。目前应用于农业面源污染的不确定性定量方法主要有灵敏性分析、蒙特卡罗法、一阶误差分析、bootstrap 法、傅里叶敏感性检验法等。虽然方法较多,但大多是对单一不确定性来源进行评估,还未形成一套完整的基础理论和方法体系,且多数研究只局限于个别案例,农业面源污染的本质和内在规律研究不够,不能对模型模拟的中间过程进行核查^[40]。

2.3 国外流域综合模型需本土化

中国的农业面源污染研究起步晚,基础数据积累少,鉴于此,中国学者开发了一些简单的经验模型,如李怀恩提出的平均浓度法、蔡明提出的降雨扣除法等^[11],这些模型对数据要求低,因此应用较为广泛,但其估算结果的准确性也相应较低。除此之外我国研究者也开发了一些物理模型,如清华大学学者研发了非点源污染过程综合模型 (IMPULSE 模型)、王宏等构建的中小流域综合水质模型等^[39],但这些模型的应用范围局限于开发者的研究项目,未得到推广普及。

目前,我国广泛使用的农业面源污染模型大部分是美国农业局开发的,这些模型是基于美国国情开发的,在我国本土使用过程中不可避免地出现引进模型的共性问题,例如数据的分类、格式不统一等^[34]。例如美国的土地分为 9 个一级类型、35 个二级类型,而我国土地分为 8 大类、46 小类,这使得我国土地数据与国外模型严重不匹配。同时国外模型参数不适用于我国,例如目前使用较为广泛的通用土壤流失方程中的坡度因子,因其在开发时主要考虑的是美国的地形,因此用于我国土壤流失计算时结果偏差较大,刘宝元等通过多地区的观测资料,对通用土壤流失方程中 10° 以上坡度因子计算公式进行了修正,修正后的公式提高了 10° 以上坡地的土壤流失预报精度^[41]。由此可见,国外模型具有诸多优势,深受研究者青睐,但模型参数的本地化率定却是在使用时必须解决的问题。

3 农业面源污染模型发展趋势与展望

3.1 拓展研究深度与广度

农业面源污染涉及到环境、气候、人文、水文、经济等多方面因素,是各方面因素交叉影响的结果,因此农业面源污染机理也是复杂多样的^[42]。

然而目前关于农业面源污染的机理还未十分明确,使得研究者在构建模型的时候,不可避免的出现误差,甚至是忽略掉重要节点,这也是造成模型模拟结果不确定性的主要原因。在接下来的研究中,农业面源污染模型须进一步加强污染机理的探究,从研究深度上进一步拓展。

同时,就目前的研究成果来看,农业面源污染模型的研究还是集中在氮磷等营养物质上。荆延德等通过文献计量学方法指出,统计了 Web of Science 网站和中国知网中发表的关于农业面源污染模型的相关文献,其中按照关键词词频排序的结果中,污染物指标里氮、磷和硝酸盐的词频位于前列^[43],这说明地表水体富营养化仍然是农业面源污染模型研究的重点。前文已经提到,随着农业面源污染模型的不断发展,目前多种模型已经可以实现 COD、重金属等多种污染物的模拟,也在多项研究中得以应用^[44-45]。在接下来的研究中,农业面源污染模型研究将覆盖更多的污染物指标,在研究广度上进一步拓展。

3.2 服务于流域集成管理模型

从模型结构来看,农业面源污染模型集成于大型流域管理模型是大势所趋。近年来,流域集成管理思想越来越被接受和认可,大型流域管理模型也随之成为了研究热点,而农业面源污染是影响流域环境的重要因素之一,因此农业面源污染模型是大型流域管理模型中必不可少的组成部分,例如美国环保局开发的流域综合管理平台 BASINS 就采用了 HSPF 模型作为农业面源污染模块^[46]。模型集成并非简单的结构拼凑,还涉及到农业面源污染与环境污染交互关系,模型耦合过程中模型结构、数据格式匹配等计算机技术层面的问题,这些关键点都是可研究的方面。

从模型的用途来看,农业面源污染模型将更多地体现其预测和管理功能。农业面源污染模型可以估算污染负荷,预测污染产生的环境影响,评估土地利用效益,进行流域规划,为管理者提供决策依据。多数文献表明,研究者利用农业面源污染模型进行污染负荷估算和预测的相关研究从技术上已经趋于成熟且取得了显著成果^[47-48],将来农业面源污染模型的应用会在评估和管理层面进行更多的探索和研究。相应的,研究者也尝试开发适用于相关领域的非专业认识使用的模型版本,例如 Rajib 等构建了基于 SWAT 的网页平台 SWATShare,实现了 SWAT 的在线共享、模拟和可

视化^[49],降低了用户的学习门槛,使模型可以更好地服务于决策制定者。

3.3 与新兴技术结合

农业面源污染模型的飞速发展得益于各类新兴技术的支撑,其中尤为明显的是“3S”技术。“3S”技术是遥感技术 RS、地理信息系统 GIS 和全球定位系统 GPS 的集成^[50],自问世以来受到各个领域的关注。上世纪 90 年代,研究者开始尝试将“3S”技术应用到农业面源污染模型中来,经过研究者几十年的探索和研究,目前二者已经可以集成使用,例如 SWAT 模型已经实现了在 Arcgis 软件中的嵌入,利用 Arcgis 对空间和属性数据的强大处理能力,进行更为精确的农业面源污染负荷估算^[47]。然而在实际应用过程中也存在很多问题,例如最为常见的尺度匹配问题,其中以遥感数据最为明显。遥感数据在空间上分辨率很高,可达到米级,但在时间上却只需数天甚至数月才能获取一个数据,时间分辨率低但空间分辨率高,导致农业面源污染模型建模时必须通过数据的同化和融合进行数据尺度转化^[51]。除此之外,运算效率、模型验证、不确定分析等也是农业面源污染模型与“3S”技术集成过程中的难题,如何解决这些问题,使“3S”技术更好地服务于农业面源污染模型,将是接下来农业面源污染模型研究的一个方向。

4 结论

农业面源污染模型发展经历了经验统计和机理探究阶段,现已在结构和适用范围上趋于完善,并进入实际应用阶段。但目前农业面源污染模型仍面临数据获取困难、模拟结果的不确定性、引进模型需本土化等诸多问题。在未来的研究中,农业面源污染模型将更多地作为大型流域集成管理模型中第一部分进行开发,并朝着环境评估和管理方面发展。而与“3S”技术既可以助力于农业面源污染模型的研究,同时也对农业面源污染模型的开发提出新的挑战。

参考文献

- [1] 吴迪民,莫彩芬,柯杰,等. 农业面源污染生态拦截系统构建技术研究 [J]. 上海交通大学学报(农业科学版), 2019, 37 (4): 13-18.
- [2] Du Xinzong, Su Jingjun, Li Xuyong, et al. Modeling and evaluating of non-point source pollution in a semi-arid watershed: Implications for watershed management [J].

- CLEAN- Soil, Air, Water, 2016, 44 (3): 247-255.
- [3] 冯爱萍, 吴传庆, 王雪蕾, 等. 海河流域氮磷面源污染空间特征遥感解析 [J]. 中国环境科学, 2019, 39 (7): 2999-3008.
 - [4] 罗娜, 李华, 樊霆, 等. HSPF 模型在流域面源污染模拟中的应用 [J]. 浙江农业科学, 2019, 60 (1): 147-151.
 - [5] 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.
 - [6] Alewell C, Borrelli P, Meusburger K, et al. Using the USLE: Chances, challenges and limitations of soil erosion modelling [J]. International Soil and Water Conservation Research, 2019, 7 (3): 203-225.
 - [7] Sabzevari T, Talebi A. Effect of hillslope topography on soil erosion and sediment yield using USLE model [J]. Acta Geophysica, 2019, 67 (6): 1587-1597.
 - [8] Renard K G, Foster G R, Yoder D C. Rusle, revised; status, question, answers, and the future [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1994, 49 (1): 213-220.
 - [9] Yoder D, Lown J. The Future of RUSLE, inside the new revised universal soil loss Equation [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1995, 50: 484-489.
 - [10] 史志华, 蔡崇法, 丁树文, 等. 基于 GIS 和 RUSLE 的小流域农地水土保持规划研究 [J]. 农业工程学报, 2002, 18 (4): 172-175.
 - [11] 左琳琳. 巢湖流域农田面源污染负荷估算及其风险评估 [D]. 西安: 西安科技大学, 2018: 25.
 - [12] 王娇, 程维明, 祁生林, 等. 基于 USLE 和 GIS 的水土流失敏感性空间分析——以河北太行山区为例 [J]. 地理研究, 2014, 33 (4): 614-624.
 - [13] 申凤敏, 姜桂英, 张玉军, 等. 典型红壤不同形态氮素迁移对长期施肥制度的响应 [J]. 中国农业科学, 2019, 52 (14): 2468-2483.
 - [14] 刘晓娜, 裴厦, 陈龙, 等. 基于 InVEST 模型的门头沟区生态系统水土保持功能研究 [J]. 水土保持研究, 2018, 25 (6): 168-176.
 - [15] Knisel W. CREAMS: A field scale model for chemicals, runoff and erosion from agricultural management systems [M]. Washington, D. C.: USDA, 1980: 58.
 - [16] 张建. CREAMS 模型的结构特点 [J]. 西北水资源与水工程, 1995, 6 (3): 17-21.
 - [17] Bolster C. H, Vadas P. A. Comparison of two methods for calculating the P sorption capacity parameter in soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 2018, 82 (2): 493-501.
 - [18] 潘东华, 贾慧聪, 陈方, 等. 中国西南地区石漠化对玉米旱灾风险的影响 [J]. 农业工程学报, 2017, 33 (23): 172-178.
 - [19] 汪邦稳. 皖西南南土壤可蚀性值及估算方法验证 [J]. 人民长江, 2019, 50 (9): 60-64.
 - [20] 罗兰华. 基于 EPIC 模型的水土流失数据测量误差评估方法 [J]. 中国水运 (下半月), 2019, 19 (7): 93-94.
 - [21] Beasley D B, Huggins L F, Monke E J. ANSWERS: A model for watershed planning [J]. American Society of Agricultural Engineers, 1980: 937-944.
 - [22] Young R A, Onstad C A, Bosch D D. AGNPS: A nonpoint-source pollution model for evaluating agricultural watershed [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1989, 44 (2): 168-173.
 - [23] 赵串串, 高瑞梅, 章青青. 基于 AnnAGNPS 模型的罗李村流域水文模拟与评价 [J]. 水土保持研究, 2017, 24 (2): 137-141.
 - [24] USDA Agricultural Research Service. AnnAGNPS: Annualized agricultural non-point source pollution model [M]. Washington, D. C.: USDA, 2006: 22.
 - [25] Chahor Y. Evaluation of the AnnAGNPS model for predicting runoff and sediment yield in a small mediterranean agricultural watershed in Navarre (Spain) [J]. Agricultural Water Management, 2014, 134 (3): 24-37.
 - [26] 王飞儿, 吕唤春, 陈旭英, 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.
 - [27] 赵串串, 冯倩, 侯文涛, 等. 基于 AnnAGNPS 模型的瀾河流域非点源污染模拟研究 [J]. 环境污染与防治, 2019, 41 (3): 317-322.
 - [28] 高瑞梅. 基于 AnnAGNPS 模型的罗李村流域水文模拟与评价 [D]. 西安: 陕西科技大学, 2017: 60.
 - [29] 元潘. 基于 AnnAGNPS 模型的砒砂岩小流域产沙模拟及其机理分析 [D]. 西安: 西北大学, 2016: 55.
 - [30] 孙美, 张晓琳, 冯绍元, 等. 基于 PEST 的 RZWQM2 模型参数优化与验证 [J]. 农业机械学报, 2014, 45 (11): 146-153.
 - [31] 薛长亮, 张克强, 张国印, 等. 应用 RZWQM 模型模拟华北玉米土壤剖面水氮迁移及淋溶特征 [J]. 农业环境科学学报, 2014, 33 (11): 2179-2186.
 - [32] Francesconi W, Srinivasan R, Pérez-Miñana E, et al. Using the soil and water assessment tool (SWAT) to model ecosystem services: A systematic review [J]. Journal of Hydrology, 2016, 535: 625-636.
 - [33] Dharni B, Himanshu S K, Pandey A, et al. Evaluation of the SWAT model for water balance study of a mountainous snowfed river basin of Nepal [J]. Environmental Earth Sciences, 2018, 77 (1): 107-127.
 - [34] 石炎原. 三峡区间流域非点源污染的精细化模拟研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2017: 13.
 - [35] 白晓燕, 位帅, 时序, 等. 基于 HSPF 模型的东江流域降水对非点源污染的影响分析 [J]. 灌溉排水学报, 2018, 37 (7): 112-119.
 - [36] 朱青, 彭晓静, 葛文君, 等. 浅议流域水环境非点源污染负荷模型 [J]. 科技视界, 2016 (24): 281-310.
 - [37] 罗娜, 李华, 樊霆, 等. HSPF 模型在流域面源污染模拟中的应用 [J]. 浙江农业科学, 2019, 60 (1): 147-151.
 - [38] 金书秦, 邢晓旭. 农业面源污染的趋势研判、政策评述和对策建议 [J]. 中国农业科学, 2018, 51 (3): 593-600.

- [39] Shen Z, Liao Q, Hong Q, et al. An overview of research on agricultural non-point source pollution modelling in China [J]. Separation & Purification Technology, 2012, 84 (none): 104-111.
- [40] 郝改瑞, 李家科, 李怀恩, 等. 流域非点源污染模型及不确定分析方法研究进展 [J]. 水力发电学报, 2018, 37 (12): 56-66.
- [41] 刘斌涛, 宋春风, 史展, 等. 西南土石山区土壤流失方程度因子修正算法研究 [J]. 中国水土保持, 2015 (8): 53-55+81.
- [42] 郭洪鹏, 张维, 宋文华, 等. 农业非点源污染研究方法分析 [J]. 环境科学与管理, 2018, 43 (2): 135-138.
- [43] 荆延德, 樊蕊. 基于 CNKI 和 WOS 的非点源污染模型的研究热点及趋势分析 [J]. 生态学报, 2018, 38 (11): 4077-4087.
- [44] 吴云龙. 基于改进输出系数模型的铅镉砷非点源污染负荷研究 [D]. 湘潭: 湘潭大学, 2017: 4.
- [45] 李彤, 易雯, 付青, 等. 极端暴雨条件下北江重金属非点源污染负荷估算 [J]. 环境科学研究, 2014, 27 (9): 990-997.
- [46] 李兆富, 刘红玉, 李燕. HSPF 水文水质模型应用研究综述 [J]. 环境科学, 2012, 33 (7): 2217-2223.
- [47] 王文章, 程艳, 敖天其, 等. 基于 SWAT 模型的古蔺河流域面源污染模拟研究 [J]. 中国农村水利水电, 2018, 432 (10): 37-41+47.
- [48] 李娜, 韩维峥, 沈梦楠, 等. 基于输出系数模型的水库汇水区农业面源污染负荷估算 [J]. 农业工程学报, 2016, 32 (8): 224-230.
- [49] 朱阿兴, 朱良君, 史亚星, 等. 流域系统综合模拟与情景分析——自然地理综合研究的新范式? [J]. 地理科学进展, 2019, 38 (8): 1111-1122.
- [50] Gou Xiaojiang. 2016 international conference on education, sports, arts and management engineering [C]. Paris: Atlantis Press, 2016.
- [51] 毛玉娜, 叶爱中, 王雪蕾, 等. 基于 GIS-RS 的非点源污染模型研究进展 [J]. 北京师范大学学报 (自然科学版), 2013, 49 (4): 407-416.