



遥感分布式面源污染 评估模型

——理论方法与应用

王雪蕾 著



科学出版社

公益性行业(农业)科研专项(201003014) 共同资助
国家自然科学基金项目(41271349)和(40901280)

遥感分布式面源污染评估模型

——理论方法与应用

王雪蕾 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书从面源污染管理需求出发,结合国内外面源污染研究成果,利用遥感(RS)技术和地理信息系统(GIS)技术优势,耦合污染过程模型,构建了DPeRS 遥感分布式面源污染评估模型。本模型方法以遥感像元为基本模拟单元,最大程度上突破了模型应用的空间尺度问题,可以同时实现农田型、畜禽养殖型、农村生活型和城市型四个类型的面源污染负荷评估,为实现国家尺度面源污染总量评估提供了技术支撑。本书重点介绍了 DPeRS 模型在新安江流域的应用,并与 SWAT 模型进行同步对比研究,证明了模型的有效性;同时还介绍了模型在巢湖流域的深度推广,尤其在水华与面源污染关系方面开展了遥感尺度同步研究的尝试,充分体现了 DPeRS 模型的技术优势。

本书可供资源、环境、农业、土壤、水土保持,以及面源污染研究等领域的高等院校师生、科研院所研究人员、政府部门管理和技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

遥感分布式面源污染评估模型:理论方法与应用/王雪蕾著. —北京:科学出版社,2015. 10

ISBN 978-7-03-045896-4

I. ①遥… II. ①王… III. ①农业污染源-面源污染-污染防治-评价模型-中国 IV. ①X501

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 236278 号

责任编辑:朱 丽 杨新政 / 责任校对:张小霞

责任印制:肖 兴 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 10 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2015 年 10 月第一次印刷 印张:9 1/4

字数:180 000

定价:80.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

江河湖泊是人类赖以生存的重要淡水资源,具有调节流域水量、蓄洪、航运、提供水源等多种功能。随着人类与水土资源之间的相互作用,我国湖泊富营养化及流域水污染问题十分突出,严重影响湖区人民的生产生活与饮用水安全,极大地制约了区域社会经济的可持续发展。

目前,国内外学者的研究已经证实,面源污染是导致水环境恶化的主要原因之一,然而至今国际上没有一套通用且行之有效的面源污染管理技术体系和模式。在面源污染管理方面,美国无论从模型构建、监测方法和管理政策等方面都走在世界的前沿,但是欧美发达国家和地区的模型和管理制度很难直接复制到我们国家,原因之一是我国国情与欧美差异大,其次是我们开始面源污染研究较欧美落后近 20 年。

在没有行之有效的面源污染监测方法的情况下,面源污染模型成为流域污染综合管理的有效工具。国际上面源污染模型由经验统计模型(20 世纪 60~70 年代)和机理过程模型(20 世纪 70~90 年代),发展到基于地理信息系统-遥感(GIS-RS)的功能模型(20 世纪 90 年代至今)。尤其进入 21 世纪,随着计算机技术的发展,遥感技术、地理信息系统与面源污染模型相结合,获取和描述流域下垫面空间分布信息的技术日渐完善,分布式面源污染模型获得了长足发展,大大提高了面源污染模拟的可靠性和实用性。我国学者开展了大量基于 RS 和 GIS 的面源污染研究,但是这些研究 90%都基于国外模型的移植和二次开发,至今仍没有一个模型可以实现国家尺度面源污染估算,从而无法满足我国面源污染防治和管理需求。

基于国内面源污染管理需求和模型技术的发展,笔者研究团队在国内学者开发的“大尺度二元结构模型”基础上研发了基于遥感技术的 DPeRS(Diffuse Pollution estimation with Remote Sensing)遥感分布式面源污染评估模型。本书将对 DPeRS 模型开发背景、构建原理和实地验证与应用示范等进行充分介绍,希望本模型工具能够满足未来面源污染宏观管理需求,并在推动我国面源污染管理体系建设方面尽绵薄之力。

本书共 5 章。第 1 章对国内外面源污染研究进行了总结和归纳;第 2 章阐述了 DPeRS 模型的原理和结构;第 3 章介绍了 DPeRS 模型在新安江流域的应用;第 4 章对比分析了 SWAT 模型与 DPeRS 模型在新安江流域应用效果;第 5 章是对 DPeRS 模型的深度应用,在巢湖流域尝试性将面源污染与水华现象进行遥感尺度的空间分析。

全书从面源污染模型的科学性和实用性角度,在总结我国学者已经完成的面源污染研究工作基础上,阐述了服务于管理需求,并耦合“3S”技术的 DPeRS 遥感分布式面源污染评估模型的理论、方法和应用,供广大环境保护工作者借鉴和批评。

本书得以面世,首先感谢北京师范大学郝芳华教授带领的面源污染研究团队提供了大尺度模型的相关资料,并在模型重建和二次开发过程中提出了宝贵的建议;其次感谢我的合作导师刘昌明院士和我所在的杨胜天教授研究团队,没有导师的指导和研究小组的技术支持也不会有 DPeRS 模型的诞生;最后感谢在模型示范和验证过程中给予过我帮助的梁涛老师、马友华老师、郭建平老师、张永勇老师和仲波老师,还有在数据处理和程序调试方面一起奋斗过的郑东海博士、蔡明勇博士、钟部卿博士、杨爱霞博士和冯爱萍硕士、王新新硕士。

DPeRS 模型还处于起步阶段,在许多方面还存在不足,欢迎专家同行共同交流讨论,为 DPeRS 模型的发展提出建议。由于水平有限,书中难免存在不足甚至错误之处,真诚欢迎读者批评指正。

作 者
2015 年 8 月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 面源污染研究方法概述	1
1.1.1 野外实地监测	1
1.1.2 人工降雨模拟试验	1
1.1.3 模型模拟	2
1.2 我国现有面源污染地面监测方法	2
1.2.1 种植业氮磷流失监测	2
1.2.2 畜禽养殖业排污监测	3
1.2.3 农村生活源排污监测	3
1.2.4 流域内河流水质监测	4
1.3 面源污染模型方法研究	4
1.3.1 国内外面源污染模型研究现状	4
1.3.2 典型的面源污染模型	9
1.4 面源污染控制与管理研究进展	11
1.4.1 美国 TMDL 计划	11
1.4.2 最佳管理措施	12
1.4.3 美国农业部 CEAP 项目	12
1.5 存在问题与发展趋势	13
第 2 章 遥感分布式 DPeRS 模型原理与构建	15
2.1 大尺度模型简介	15
2.2 DPeRS 模型构建	16
2.3 农田氮磷平衡估算模块	17
2.3.1 化肥输入	18
2.3.2 有机肥输入	18
2.3.3 灌溉带入	24
2.3.4 种子带入	24
2.3.5 生物固氮	25
2.3.6 大气干湿沉降	26
2.3.7 作物带走	28

2.3.8	气态氮损失	30
2.3.9	径流侵蚀损失	32
2.3.10	淋溶损失	34
2.4	植被覆盖度定量遥感反演模块	36
2.5	溶解态面源污染负荷估算方法	38
2.6	吸附态面源污染负荷估算方法	39
2.7	面源污染物入河量估算方法	41
2.8	DPeRS 模型适应性	41
第 3 章	基于环境星 DPeRS 模型新安江流域应用	43
3.1	环境星数据介绍	43
3.2	新安江流域现状	44
3.2.1	自然地理概况	44
3.2.2	经济社会概况	45
3.2.3	水资源与水环境现状	45
3.2.4	示范区位置	45
3.3	新安江流域(黄山片)面源污染数据库构建	46
3.3.1	土地利用和植被覆盖度	46
3.3.2	土壤数据	48
3.3.3	降水数据	49
3.3.4	农田氮磷养分平衡数据	52
3.3.5	坡度坡长数据	53
3.3.6	主要模型参数	54
3.4	新安江流域面源污染负荷结果与分析	55
3.4.1	溶解态面源污染负荷空间分布	55
3.4.2	新安江流域土壤侵蚀及泥沙时空分布	57
3.4.3	吸附态面源污染负荷空间分布	59
3.4.4	新安江流域面源污染物产生量时空分布	60
3.4.5	新安江流域面源污染物入河量核算	62
3.4.6	新安江流域面源污染分级分区	64
第 4 章	DPeRS 模型与 SWAT 模型在新安江流域的对比研究	66
4.1	SWAT 模型原理	66
4.1.1	水量模拟	66
4.1.2	水质模拟	70
4.2	数据的收集与整理	73
4.3	模型的建立	75

4.4	模型率定及验证	75
4.5	面源污染负荷分布	82
4.6	面源污染负荷模拟结果	85
4.7	新安江流域双模型对比分析和验证	90
4.7.1	调查数据验证	90
4.7.2	SWAT 模型结果对比分析	91
第 5 章	巢湖流域 DPeRS 面源模型推广应用	93
5.1	巢湖流域现状	93
5.2	巢湖流域主要空间数据库	94
5.2.1	土地利用解译	94
5.2.2	植被盖度反演	94
5.2.3	降雨量插值	96
5.2.4	土壤数据	98
5.2.5	坡度坡长数据	100
5.2.6	农田氮磷平衡空间数据	101
5.2.7	统计调查数据	101
5.2.8	入河系数参数估计	104
5.3	巢湖流域氮磷面源污染与水华关系研究	104
5.3.1	基于 NDVI 的蓝藻水华遥感识别及年度分析	104
5.3.2	巢湖流域面源污染物空间分布特征	107
5.3.3	巢湖流域面源污染量估算结果分析	109
5.3.4	巢湖流域氮磷面源污染源解析	111
5.3.5	巢湖流域面源污染与巢湖水华时空分布分析	112
5.3.6	巢湖流域 DPeRS 模型情景分析	113
5.4	巢湖流域氨氮和化学需氧量典型污染物空间特征分析	115
5.4.1	畜禽养殖密度计算	115
5.4.2	氨氮和化学需氧量产污时空特征	115
5.4.3	氨氮和化学需氧量入河量估算	119
5.4.4	巢湖流域面源 DPeRS 模型污染源解析	119
5.4.5	人口密度、农田养分平衡与氨氮负荷相关分析	120
5.4.6	畜禽养殖与化学需氧量负荷相关分析	120
5.5	主要结论	122
参考文献		124

第 1 章 绪 论

1.1 面源污染研究方法概述

1.1.1 野外实地监测

面源污染研究的关键是获取所需的基础数据,早期的研究工作中,几乎所有数据都来自野外实地监测。目前,在野外实测时,一般采用径流小区收集方式,然后推算整个研究区的面源污染负荷总量。由于面源污染是一种间歇发生的,随机性、突发性、不确定性很强的复杂过程,基础数据收集的劳动强度大、效率低、周期长、费用高,而且往往由于数据资料缺乏或可靠性差等缺点,影响污染负荷的估算精度,因此野外实测方法多数情况下是作为辅助手段,用于面源污染模型的验证和参数的校正(董亮,2001;余炜敏,2005;王静,2006)。常见的野外实地监测列举如下:

1) 综合试验场法

具体方法是:先在研究区域内选择一块面积不大,又有代表性的典型径流小区,在径流小区内同步监测降雨、径流的水量和水质;最后,以小区的污染单位负荷量估算整个研究区域的面源污染负荷量。这种方法,工作量不大,花费也较少,因而在我国得到广泛应用。但是,工作中典型径流小区较难确定,而且面源污染是一种时空差异性很强的现象,仅以小区研究代替大区域,污染负荷的计算精度不高,也不利于了解污染的地域差异。

2) 源类型划分法

源类型划分法与综合试验场法基本相同,不同点在于先对研究区域进行详细调查,根据土地利用状况划分为不同的面源类型区,然后在每个源类型区内选择一块典型小区作为径流试验场,同步监测水量和水质,建立各源类型的污染负荷估算模型(鲍全盛和王华东,1996)。这种方法考虑了不同土地利用对面源污染总负荷量的贡献,因而大大提高了估算精度,但是工作量和费用也相应增加了很多。吕耀和程序(2000)在对太湖流域农田面源氮负荷的研究中,分别设立了水稻田和小麦地的典型小区,以此估算得整个流域的氮肥流失量。

1.1.2 人工降雨模拟试验

人工降雨模拟试验通过人为控制条件模拟各种自然条件下的面源污染,可以获取大量在野外工作很难或无法得到的数据,并可以解决野外实测研究周期长、耗

资高等缺陷。目前,人工降雨模拟试验主要用于面源污染机理和模型的研究。Barros 等(1999)用人工降雨技术研究了砂壤土和粉质黏壤土上的降雨径流的产流特征;黄满湘等(2003)利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;张乃明等(2003)采用模拟试验的方法,研究了人工降雨和自然降雨条件下坡度、表土质地、降雨强度和地表状况等因素对农田土壤径流中磷污染物输出浓度和输出总量的影响;梁涛等(2005)利用小型人工降雨模拟器,选择官厅水库周边 4 种典型土地利用类型,通过进行天然大暴雨试验,研究了氮、磷随暴雨径流及径流沉积物的迁移过程;马彦涛等(2006)在官厅水库周围进行了野外人工降雨试验,用于研究奶水河流域的氮磷面源污染来源。

1.1.3 模型模拟

模型模拟就是建立数学模拟模型,利用计算机对面源污染进行时间和空间序列上的模拟。面源污染模型不仅可以估算面源污染物负荷量,有些模型还可以模拟面源污染的物理、化学和生物过程,并对面源污染进行预测研究。随着模型的不断完善,模型模拟研究已成为面源污染研究最重要的方法。

1.2 我国现有面源污染地面监测方法

面源污染监测难度大、费用高,我国几乎没有系统的长时间系列面源污染监测资料,国家层面上也没有相应的监测规范和标准。随着对面源污染监测的不断探索,当前在农业面源污染方面的监测方法相对成熟。农业面源污染的监测主要是种植业氮磷流失监测、畜禽养殖业排污监测、农村生活源排污监测和流域内河流水质监测四个方面。

1.2.1 种植业氮磷流失监测

径流和淋溶是农田养分流失的主要途径。目前,中国农业化肥的平均有效利用率仅为 30%~35%,剩余部分通过地表和地下径流入江河湖海(王桂苓等,2008)。

径流所造成的养分流失已经严重影响水体水质,因此对径流所产生的污染物进行监测至关重要。径流中氮磷的监测方法具体包括流量计法(夏小江等,2011;徐畅等,2011)、堰测法(孙正宝等,2011)、人工模拟降雨(黄满湘等,2001;段永惠等,2004;周林飞等,2011;张燕等,2011)和导流管-径流桶法等(王军等,2010;宁建凤等,2011;俞巧钢等,2011;汤宏等,2012)。

淋溶大部分发生在北方及平原地区,对旱作尤为明显。据报道,施入农田中的氮肥大约有 5%~41.9%通过淋溶进入地下水(Ceccon et al., 1995),给我国地下

水资源带来了严重的污染。当前主要淋溶监测方法包括淋溶盘法(李宗新等, 2008)、淋溶集水槽法(刘方春等, 2010)、渗漏池法(高忠霞等, 2010)、抽滤管法和土柱实验法(张静等, 2008), 实验主要采集径流、淋溶水、土壤、植株、泥沙、灌溉水和降水样品, 分析全氮、氨态氮、硝态氮、总磷、可溶性磷等指标。当前淋溶盘法比较常用, 适用于旱地, 但会在一定程度上破坏土壤结构。在 2007 年《全国种植业污染源普查排污系数测算实施方案》中, 统一淋溶监测采用淋溶盘法。

1.2.2 畜禽养殖业排污监测

我国第一次全国污染源普查中开展了畜禽养殖业产排系数测算工作, 并制定了详细的监测方案(国务院第一次全国污染源普查领导小组, 2007), 方案规定: 畜禽养殖业排污监测的对象主要是规模化饲养的猪、奶牛、肉牛、蛋鸡和肉鸡。污水监测指标为污水量、pH、化学需氧量(COD_{Cr})、总磷(TP)、总氮(TN)、 NH_4^+-N 、铜、锌; 固体污染物监测指标为: 粪便量、含水率、全磷、全氮、铜、锌。采样方法如下: 在养殖场(区、户)安装水表监测用水量, 通过用水量推算污水产生量。在养殖场(区、户)污水总排放口设置量水槽用于测量污水排放量。对有污水处理设施的养殖场(区、户)进行监测时, 除在量水槽采集水样外, 还需在污水处理设施入口采集水样。混合样品的单元采样不得少于 2 个, 每个样品量 2000 mL。利用代谢笼收集测量畜禽粪尿产生量。对每种动物在每个区域、每种畜牧生产的组织模式中选择 1 个场(区、户)进行测定。根据动物的饲养阶段, 每阶段选择 5 头(猪、牛)或 25 只(蛋鸡、肉鸡)进行监测。利用收集桶测量猪粪的收集量, 每个阶段至少随机收集 3 栏(猪)的猪粪。奶牛、肉牛、蛋鸡、肉鸡的粪便收集量根据粪便收集频率和每次的收集量确定。粪利用率根据各地区粪便农田利用、沼气处理或销售量情况计算。

1.2.3 农村生活源排污监测

我国第一次全国污染源普查中对农村生活污染监测对象定义为生活污水和生活垃圾。生活污水是指生活在农村的居民日常生活中产生的污水, 包括厨房、水冲式厕所、洗澡、洗衣等产生的污水。生活垃圾是指在农村日常生活过程中产生的固体废弃物。生活污水监测指标为污水产生量、 COD_{Cr} 、TP、TN、 NH_4^+-N 和 pH; 生活垃圾监测指标为生活垃圾的产生量、容重(密度)、成分组成、含水率、有机垃圾的 TN 含量及 TP 含量(国务院第一次全国污染源普查领导小组, 2007)。为了准确计量污水排放量, 便于采样, 各地区因地制宜为每个监测点农户配置污水收集设施和垃圾收集桶, 分别在春、夏、秋、冬四个季节进行采样监测, 每次连续收集 3 天的生活污水和生活垃圾。对于生活污水样品充分混匀后不同深度多点采集 2 个样品, 每个样品 1000 mL; 生活垃圾样品混匀后按四分法取 2 个样品, 每个样品 1.0 kg。

1.2.4 流域内河流水质监测

流域内河流水质监测是对污染来源为农田以及畜禽养殖和农村生活源的河流进行监测。具体要求选择具有代表性的监测点,在洪水期和非洪水期取样。非洪水期在连续几日水位基本无变化且水位较低(尽可能接近于基流)的情况下,每次进行 24 h 连续采样,每隔 3~4 h 采样 1 次。洪水期洪水过程监测尽可能控制洪涨落过程,至少取样 5 次以上,且分别位于洪水过程的起涨段、峰顶段和退水段,其中,起涨段采 2~3 次样,峰顶段采 1~2 次样,退水段采 2~3 次样(李家科等, 2009; 2011)。监测指标为径流量、pH、TN、TP、凯氏氮、 COD_{Cr} 和悬浮物。

1.3 面源污染模型方法研究

1.3.1 国内外面源污染模型研究现状

自 20 世纪 60 年代,国外学者开始进行面源污染模型的研究,通常以简单的经验统计分析和长期平均负荷的粗略估计为特征建立经验统计回归模型,并以此建立污染负荷与流域土地利用或径流之间的统计关系(张玉珍,2003;张雪松,2004)。该类模型主要包括以下几种:平均浓度法(USEPA,1973;1976)、径流-水质统计回归法(McElroy et al.,1976;Miller et al.,1978)和累积冲刷模型(Manning et al.,1977)等。该类模型对数据需求低、计算简便,实用性和准确性较强,在早期得到了较为广泛的应用,但由于考虑因素少,难以描述污染物迁移的路径与机理,使得模型的进一步应用受到了较大的限制。

20 世纪 70 年代中期,面源污染模型研究有了很大的进展,逐步由简单统计模型发展为复杂机理模型,出现了一系列机理模型,如模拟城市暴雨径流污染的 STORM、SWMM(Novotny and Chesters,1981),模拟农业污染的 ARM 以及流域模型 HSPF 等。这些模型经过了一些实测数据的检验并得到初步应用,但模型对各种资源(计算机、数据、费用、用户素质等)要求很高,大多只适用于很小的集水流域,不能适用面源污染的广泛性,限制了模型的推广和应用(朱萱等,1985)。

20 世纪 70 年代后期至 80 年代以来,通过对面源污染过程的大量监测,以及对面源污染物理化学过程的逐步了解,面源污染的基础研究涉及地域更广、类型更多样,因素分析和污染物迁移机理研究更加深入,面源污染模型研究逐渐向实用方向发展。由美国农业部开发的 CREAMS 模型(Knisl,1980)奠定了面源污染模型发展的“里程碑”,它首次对面源污染的水文、侵蚀和污染物迁移过程进行了系统的综合。CREAMS 提出后,在此基础上发展出了一系列结构类似的模型,如农田小区 EPIC 模型(Williams et al.,1984)、用于模拟农业活动对地下水影响的 GLEAMS

模型(Leonard et al., 1987; 1989)、用于农业面源管理和政策制定的农业面源 AGNPS 模型(Young et al., 1989)、用于模拟大型流域面源污染负荷的 SWRRB 模型(Arnold et al., 1993),以及欧洲水文系统模型 SHE。这些模型极大地丰富了机理性的面源模型,并且得到了不同程度的应用。

20 世纪 90 年代以后,随着计算机技术的发展,遥感(RS)技术、地理信息系统(GIS)与面源污染模型相结合,获取和描述流域下垫面空间分布信息的技术日渐完善,分布式面源污染模型获得了长足发展,大大提高了面源污染模拟的可靠性和实用性。分布式面源污染模型可以分为基于“水文响应单元”(hydrologic response unit, HRU)和基于“栅格”(grid-based)两类。前者将流域根据雨量站及流域特征划分成若干个单元面积,当单元面积小到一定程度时,即可认为具有水文要素上的均一性,并将其作为模拟输入输出的基本单元,如 Arnold 等(1994, 1998a)开发的 SWAT 模型;后者的基本单元是矩形网格,如 Beven 等(1989)提出的 TOPMODEL 模型、AGNPS 模型。此时,这些模型已不再是单纯的数学运算程序,而是集空间信息处理、数据库技术、数学计算和可视化表达等功能于一身的大型专业软件,其中比较著名的有美国国家环境保护署(USEPA)开发的 BASINS(Whittemore, 1998)、AnnAGNPs(Bingner and Theurer, 2001)和 SWAT 模型(Arnold et al., 1994; 1998b)等。近年来,模拟进入地下水的污染物迁移、转化过程成为面源污染研究的重点,地下水的排泄也被列入地表水源的重要污染源。

我国的面源污染研究起步较晚,始于 20 世纪 80 年代的北京城区径流污染研究(夏青, 1982),此后又在农业面源污染和城市径流污染方面开展了一些研究工作,例如在天津于桥水库(朱萱等, 1985)、涪陵农田(陈西平和黄时达, 1991)、太湖(马立珊, 1992)、滇池(阎自申等, 1990; 辜来章等, 1991)等地开展了面源污染监测和评估。此时,面源污染负荷的经验统计模型得到了迅速发展并广泛应用。

尽管经验统计模型能够建立暴雨径流量与污染负荷的定量关系,但是只能以观测数据作为模型输入,使得该模型的应用性受到极大限制。李怀恩和沈晋(1997)建立了用逆高斯分布瞬时单位线法计算流域汇流的面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。此后李怀恩又提出了面源污染迁移逆高斯模型、分布瞬时单位线模型和流域产污模型,并建立了流域面源污染模型系统(李怀恩和沈晋, 1996; 李怀恩和吴晓光, 1997)。针对我国面源污染产生、迁移和转化过程不确定性明显,以及基础数据有限等情况,为满足全国水资源综合规划对大尺度面源污染负荷估算的需求,郝芳华(2006b; 2006c)、杨胜天等(2006)在充分借鉴经验统计模型和机理过程模型优势的基础上,结合我国在面源污染调查工作中的实际情况,建立了具有面源污染产生、迁移转化机理的大尺度面源污染负荷估算方法体系,并在黄河流域、松花江流域取得了较好的应用效果(程红光等, 2006; 岳勇等, 2007)。

近些年来,随着“3S”技术的发展,我国基于 RS 和 GIS 的面源污染研究逐步开展。史志华等(2002)开发并建立了汉江中下游农业面源动态监测信息系统,运用数学模型及其与 GIS 相结合,研究了汉江中下游农业面源污染负荷及分布规律;薛素玲(2006)运用 GIS 对黑河流域面源总氮、总磷负荷的形成进行了模拟研究;傅世锋和查轩(2008)运用 GIS、RS 与 USLE 模型预测了东圳库区流域土壤侵蚀量。国外常用面源模型及英文说明见表 1-1;国内典型模型对比见表 1-2(毛玉娜, 2013)。

表 1-1 国外常用面源模型及其英文说明

模型缩写	模型全称	参考文献
CREAMS	Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems(来自农业管理系统的化学,径流和侵蚀)	(Knisel, 1980)
HSPF	Hydrological Simulation Program-Fortran(基于 Fortran 的水文模拟程序)	(Johanson, 1983)
ANSWERS	Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation(区域面源流域环境响应)	(Beasley, 1981)
AGNPS	Agricultural Nonpoint Source(农业面源)	(Young et al., 1989)
EPIC	Erosion Productivity Impact Calculator(侵蚀生产量影响算法)	(Williams, 1995)
CNPS	Cornell Non-Point Source(康奈尔面源)	(Dikshit and Loucks, 1996)
GLEAMS	Groundwater Loading Effects on Agricultural Management Systems(地下水对农业管理系统的负荷影响)	(Leonard et al., 1987)
SWAT	Soil and Water Assessment Tool(土水评估工具)	(Arnold et al., 1998a, 1998b)
WEPP	Water Erosion Prediction Project(水侵蚀预测项目)	(Ascoug et al., 1996)
SWRRB	Simulator for Water Resources in Rural Basins(农村流域水资源模拟器)	(Williams et al., 1985)
BASINS	Better Assessment Science Integrating Point and Non-Point Sources(综合点源与面源的改进评估方法)	(Whittemore, 1998)
AnnAGNPS	Annualized Agricultural Nonpoint Source(年尺度农业面源)	(Cronshey and Theurer, 1998)
GWLF	Generalized Watershed Loading Function(通用流域负荷方程)	(Haith and Shoemaker, 1987)
SPARROW	Spatially Referenced Regressions on Watershed Attributes(流域空间属性关联)	(Smith et al., 1997)

表 1-2 国内典型面源模型对比

模型名称	开发时间	应用区域	采用公式	模型类型	GIS/RS 应用	参考文献
区域径流-污染负荷模型	1985 年	于桥水库	$M = \sum Q_i \cdot C_i$, 其中, M 为某种污染物输出总量, Q_i 为第 i 个小时的径流量, C_i 为第 i 个小时的污染物浓度	A	—	(朱萱等, 1985)
暴雨径流污染概念模型	1986 年	苏州市	淋洗: $W_1 = 10^{-6} G \cdot P \cdot F$, 冲刷: $W_2 = 10^{-6} C_2 \cdot G$ 。其中, W_1 为雨水淋洗某污染物的污染量, G 为雨水中污染物浓度, F 为汇水面积, P 为降雨量; W_2 为雨水冲刷某污染物的污染量, C_2 为单位质量的沉积物中污染物含量, G 为区域内每年清掏阴井沉积物的含量	C	基于 RS 影像获取土地利用	(温灼如等, 1986)
平均浓度法	2000 年	黑河流域	$W_T = C_{SM} W_S + C_{IM} W_B$, 其中, W_T 为年负荷总量, C_{SM} 、 C_{IM} 分别为地表径流和地下径流的平均浓度, W_S 、 W_B 分别为年地表和地下径流量	C	—	(李怀恩, 2000)
营养负荷-泥沙关系法	2003 年	黑河流域等	$Y_i = S_{is} ER_i Y_s$, 其中, Y_i 为第 i 种污染物的负荷量或浓度, S_{is} 为流域内土壤表层中第 i 种污染物的含量, ER_i 为第 i 种污染物的富集比, Y_s 为河流某断面或流域出口处的输沙量或含沙量	A	—	(李怀恩等, 2003)
改进的 Johnes 输出系数法	2004 年	流域	$L = \lambda \left\{ \alpha \sum_{i=1}^n E_i [A_i (I_i)] + p \right\}$, 其中, L 为营养物流失量, E_i 为第 i 种营养源输出系数; A_i 为第 i 类土地利用类型面积或第 i 种牲畜数量、人口数量; I_i 为第 i 种营养源营养物输入量; p 为降雨输入的营养物量; λ 为流域损失系数; α 为降雨影响系数	C	—	(蔡明等, 2004)

续表

模型名称	开发时间	应用区域	采用公式	模型类型	GIS-RS 应用	参考文献
降雨量差值法	2005 年	流域	$L_n = f(R), L_p = C, L = L_n + L_p = f(R) + C$ 。其中, L_n 为面源负荷, L_p 为点源污染负荷, R 为降雨量, $f(R)$ 为 L_n 与降雨量 R 的函数关系, C 为常数	A	—	(蔡明等, 2005)
二元结构溶解态 NPS 负荷模型	2006 年	大尺度区域	$C = \sum_{i=1}^4 \rho_i \cdot Q_i \cdot N_i \cdot S_i$, 其中, C 是单位面积 NPS 负荷; i 是 NPS 类型; Q_i 是单位面积 NPS 源强; ρ 是面源产污系数; N_i 是自然因子修正系数; S_i 是社会因子修正系数	B	GIS 建立数据库, RS 获取土地利用、植被盖度等	(郝芳华等, 2006b)
支持向量机模型	2006 年	流域	支持向量机算法	A	—	(李家科等, 2006)
偏最小二乘回归模型	2007 年	流域	偏最小二乘算法	A	—	(李家科等, 2007)
自记忆模型	2009 年	流域	$x_1 = \sum_{i=-q-1}^{-1} a_i y_i + \sum_{i=-q}^0 \theta_i F(x, i) + \sum_{i=1}^n \gamma_i M_i$, 其中, a_i, θ_i 为记忆系数; γ_i 为系数; M_i 为第 i 种 NPS 影响因子; x_1 为第 1 个变量; y_i 为第 i 个变量, 且 $y_i = (x_i + x_{i+1})/2$; $F(x, i)$ 为关于 x, i 的函数	A	—	(李家科等, 2009b)
灰色神经网络模型	2011 年	流域	灰色神经网络模型算法	A	—	(李家科等, 2011)

注: 模型类型中, A 为经验统计模型, B 为机理过程模型, C 为概念模型;

“—”表示没有考虑 GIS-RS 应用。

1.3.2 典型的面源污染模型

1) CREAMS 模型

CREAMS 模型(Knisl,1980)是1980年由美国农业部(USDA)研发的综合模拟水文、产沙和农业面源污染的集总式模型。该模型既可以模拟场次降雨的土壤侵蚀,又可以模拟长期(2~50年)的土壤侵蚀过程,蒸发计算采用修正的 Penman 公式,预测径流使用 SCS 法或 Green-Ampt 入渗模型,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,产沙子模型采用 USLE,预测污染物负荷采用概念模型,污染物如氮、磷和杀虫剂分别按照溶解态和沉积态进行模拟,沉积态中还考虑了富集因子。该模型适合于地块内面积约为 5 hm^2 的典型小流域,不适合于复杂的地貌状况,在模拟地形较平坦的情况下精度较差。后来发展出了 CREAMS-WT 模型,增加了对地下水位的考虑,Haan 等(1996)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磷负荷的影响。

2) SWAT 模型

SWAT 模型(Arnold et al.,1994;1998a;1998b;2005)是美国农业部农业研究局(ARS)开发的流域尺度模型,用于模拟地表水和地下水水质和水量,预测土地管理措施对不同土壤类型、土地利用方式和管理条件的大尺度复杂流域的水文、泥沙和农业化学物质产量的影响,其中主要子模型有水文过程子模型、土壤侵蚀子模型和污染负荷子模型。模型考虑了气候、水平衡、土壤条件、侵蚀、营养、植物生长、耕作、残茬管理、地表水流、壤中流和地下径流等。模型采用径流曲线法(SCS)模拟地表径流、壤中流和地下径流;采用 MUSLE 方程实现泥沙负荷的模拟。Srinivasan 等(1998a)应用 SWAT 模型对全美 2000 多个 HU(hydrologic unit)进行了径流、泥沙和总氮、总磷的模拟。由于 SWAT 模型需要大量的参数,以 GIS 为基础的输入界面 SWAT-GRASS (Srinivasan and Arnold,1994)、ArcView-SWAT (Srinivasan et al.,1998b; Di Luzio et al.,2004)、ArcSWAT (Olivera et al.,2006; SWAT,2007)、MapWindowGIS-SWAT 以及 SWAT-APEX 等应运而生。此外,一系列工具被开发出来用于简化 SWAT 模拟,如 i_SWAT(CARD,2007)、CRP-DSS(Rao et al.,2006)、AUTORUN 系统(Kannan et al.,2007)以及 SWAT-CUP(Abbaspour et al.,2007)。目前,SWAT 模型用户大会已经在世界范围内举办了 10 届,该模型还在不断完善,已经在世界范围内成为应用较为广泛的面源污染模型。美国 TMDL 计划(Borah et al.,2006)、美国农业部 CEAP (CEAP,2007)项目均采用 SWAT 模型进行分析。

3) AGNPS 模型和 AnnAGNPS 模型

由美国国家环境保护署(USEPA)推荐的 AGNPS 模型(Young et al.,1989)