

国家自然科学基金青年基金项目“基于生态系统服务价值的流域
非点源污染控制措施评价与优选方法研究”(51509223)资助

HSPF 模型技术 及其应用研究

王慧亮 著



黄河水利出版社

国家自然科学基金青年基金项目“基于生态系统服务价值的流域
非点源污染控制措施评价与优选方法研究”(51509223)资助

HSPF 模型技术及其应用研究

王慧亮 著

黄河水利出版社

· 郑州 ·

内 容 提 要

本书以 HSPF 模型为基础,系统介绍了模型的原理,详细说明了模型改进和构建方法、参数率定方法以及输入数据对模型不确定的影响的分析方法等关键技术,并以滦河流域为例进行应用研究。主要内容包括 HSPF 模型原理及其改进、基于 PEST 的模型自动率定算法、输入数据对模型不确定性的影响,滦河流域非点源污染动态模拟以及滦河流域非点源污染控制方案研究等。

本书适合于从事非点源污染研究的科研人员、教师以及相关专业的研究生阅读,同时可以供水土流失、环境科学等相关领域的专家学者参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

HSPF 模型技术及其应用研究/王慧亮著. —郑州:黄河水利出版社,2018. 8

ISBN 978 - 7 - 5509 - 1939 - 6

I. ①H… II. ①王… III. ①流域模型 - 水文实验 - 应用软件②流域模型 - 水质模型 - 应用软件 IV. ①P344 - 39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 324234 号

出版社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼 14 层 邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371 - 66026940、66020550、66028024、66022620(传真)

E-mail:hhslcbs@126.com

承印单位:河南新华印刷集团有限公司

开本:850 mm × 1 168 mm 1/16

印张:9.75

字数:170 千字

印数:1—1 000

版次:2018 年 8 月第 1 版

印次:2018 年 8 月第 1 次印刷

定价:36.00 元

前 言

水污染,是全人类在经济高速发展过程中所面临的共同问题。随着点源污染控制能力的提高,非点源问题日益凸显。非点源污染负荷模型是对非点源污染定量化和有效控制的重要方法,可以对各类非点源的形成、迁移转化以及负荷量进行模拟,而我国由于数据缺乏等原因,很多模型难以有效使用。另一方面,非点源污染与降雨径流过程密切相关,而在半干旱半湿润流域水量季节与年际差异显著,给非点源污染控制带来困难。如何实现半干旱半湿润流域污染过程的定量化并明确其控制目标,是开展流域污染管理的基础和关键。

本书结合半干旱半湿润区域的特点和中国水环境管理的实际需要,在“分区、分类、分级、分期”水环境管理理念的指导下,以滦河流域为对象,开展半干旱半湿润流域非点源污染模型技术与管理研究。研究主要结论如下:

(1) 针对中国水质目标管理需要,在模型中增加 COD 模拟模块;针对中国复杂的水资源调度情况,在模型中实现了简单处理水库调度等人工干扰对流域产汇流的影响;针对 HSPF 模型,研究了多目标自动水文率定技术,提高了模型的模拟效率。

(2) 定量化研究了 DEM 和土地利用数据分辨率对模型产流产沙的影响,结果表明,基于高分辨率 DEM 和土地利用数据模拟的径流、泥沙误差明显减少,DEM 和土地利用分辨率对模型的影响可以用概率密度函数表示;应用静态和动态相结合的方法,定量研究了降雨数据时空分辨率对模型效率和参数的影响,研究表明,模型效率对降雨数据的时间分辨率比对数据的空间分辨率更加敏感;在降雨站点相同的情况下,站点的分布对模型效率有明显影响,尽量选择流域中下游站点可以提高模型效率;不同的时间和空间分辨率的数据驱动模型时,模型可以通过改变模型参数(改变产流成分比例)来达到最好的模型效率。

(3) 模型动态模拟了滦河流域 8 个子流域 1998 ~ 2009 年的污染负荷,并估算了畜禽养殖、化肥施用和生活非点源污染负荷对 8 个子流域非点源污染负荷的贡献率。结果表明,柳河和伊逊河流域是 COD 污染严重区域,武烈河流域是氨氮污染严重区域,柳河和洒河流域是总氮严重污染区域,瀑河和柳河是总磷严重污染区域;从污染源贡献率来看,COD 和氨氮属于点源和非点源

复合污染,而总氮和总磷则是典型的非点源污染。以伊逊河为例分析,结果表明,非点源污染负荷与年降水量高度正相关;非点源污染负荷基本都在汛期产生;不同土地利用对污染物的输出系数差别较大。

(4)对 COD、氨氮和总磷三种污染物制订了分区(不同子流域)、分期(不同水文年型)、分类(各种污染源)和分级(不同水质目标)的污染物总量控制方案,结果表明,洒河流域由于水量充沛,环境容量较大,污染物还有剩余环境容量;小滦河和老牛河流域由于地处山区,基本无污染,污染物也还有剩余环境容量;其他流域则需要不同程度的污染物削减。

本书由郑州大学王慧亮完成。在本书的编写过程中,中国科学院生态环境研究中心李叙勇研究员给予了悉心指导,李老师为 HSPF 模型在非点源污染流域的应用提供了宝贵的意见和耐心的帮助,郑州大学吴泽宁教授对本书进行了系统的审阅,提出了许多宝贵的修改意见,在此对两位老师表达最诚挚的谢意!陈开放硕士、狄丹阳博士、吴梅梅博士、何鹏硕士、申晨阳硕士、康永飞硕士和鲁珂瑜硕士先后帮助搜集素材、整理和校对文稿,付出了辛勤的劳动,在此一并表示感谢。本书的出版得到了国家自然科学基金青年基金项目“基于生态系统服务价值的流域非点源污染控制措施评价与优选方法研究”(51509223)的资助。

这几年笔者一直从事流域水文模型和非点源污染的研究工作,本书是这几年的一些研究成果,我们期望通过研究成果,能够促进 HSPF 模型的我国水文水资源和非点源污染管理领域中的推广与普及。由于笔者水平有限,成熟仓促,书中的缺点和错误在所难免,竭诚欢迎读者批评指正和学术争鸣。相关建议可以通过电子邮件 wanghui liang@126.com 与作者联系。

作 者

2017 年 10 月

目 录

前 言

第 1 章 绪 论	(1)
1.1 研究背景及意义	(1)
1.2 污染物总量控制研究进展	(2)
1.3 非点源污染模型应用进展	(5)
1.4 非点源污染模型技术研究进展	(18)
1.5 滦河流域水环境管理研究进展	(22)
1.6 研究内容与技术路线	(23)
第 2 章 HSPF 模型原理及其改进	(27)
2.1 HSPF 模型的组织结构	(27)
2.2 HSPF 模型原理	(30)
2.3 HSPF 模型的改进	(38)
2.4 本章小结	(42)
第 3 章 基于 PEST 的模型率定算法研究与应用	(43)
3.1 HSPF 模型在典型子流域的构建	(43)
3.2 基于 PEST 的多目标自动水文率定算法研究	(53)
3.3 HSPF 模型在典型子流域的参数率定与验证	(59)
3.4 本章小结	(71)
第 4 章 输入数据对模型不确定性的影响	(72)
4.1 空间属性数据分辨率对模型效率的影响	(72)
4.2 降雨数据时空分辨率对模型效率的影响	(84)
4.3 本章小结	(93)
第 5 章 滦河流域非点源污染动态模拟	(95)
5.1 滦河流域污染负荷估算	(95)
5.2 各子流域污染负荷对比分析	(101)
5.3 典型子流域非点源污染负荷分析	(104)
5.4 本章小结	(114)

第 6 章 滦河流域污染物总量控制方案	(115)
6.1 滦河流域水质基本状况	(115)
6.2 流域水环境容量核算与水质目标确定	(117)
6.3 流域污染物分期分类总量控制方案	(118)
6.4 本章小结	(122)
第 7 章 结论与展望	(123)
7.1 研究结论	(123)
7.2 研究不足与展望	(125)
参考文献	(126)
附 录	(138)
附录 1 COPY 模块处理水库调度操作过程	(138)
附录 2 COD 模块扩展操作步骤	(141)

第1章 绪论

1.1 研究背景及意义

由于社会经济的发展,人口、资源与环境面临的突出矛盾,水资源保护与开发利用协调的水资源可持续利用这一新的理念,已经成为21世纪水资源规划和管理的目标与追求。水资源表现为在一定时间、一定空间具有足够数量的可用水,它是“质”与“量”的函数。这也就是说,在水资源管理方面,水量、水质两个方面互为依存,缺一不可。特别是随着社会经济快速发展和城镇化进程的加快,尤其是在经济发达的区域,水环境污染已严重威胁着当今人类的生存和发展,成为亟待解决的重大环境问题之一。

水污染通常分为点源污染和非点源污染。点源污染(Point Source Pollution)主要是工业废水和城市生活污水通过固定排污口排向水体而产生的污染。非点源污染(Non-point Source Pollution),又称面源污染,指溶解的或固体的污染物从非特定的地点进入受纳水体(河流、湖泊、水库和海湾),引起的水体富营养化或其他形式的污染。美国《清洁水法修正案》(1977)对非点源污染的定义是:污染物以广域的、分散的、微量的形式进入地表及地下水体。微量指污染的起始浓度通常较低,但汇入水体的总体负荷非常巨大。同时,相对于容易标识、排污口单一的工业和城市生活污水点源污染源,非点源污染来源极其广泛,这些污染物包括农田过量施用的化肥农药、耕地或林地产生的水土流失、生活区或畜禽养殖所带来的氮磷流失、大气干湿沉降等。

目前,许多发达国家的研究已经证实,非点源污染是导致水环境恶化的主要原因之一。如美国60%的水环境污染是由非点源污染造成的;丹麦270条河流中94%的氮负荷、52%的磷负荷来自于非点源污染;荷兰来自于农业非点源污染的总氮、总磷分别占水环境污染总量的60%和40%~50%。我国目前正处在污染构成快速转变时期,非点源污染的负荷比重在逐步上升。据研究,非点源已成为太湖、巢湖、滇池等重要湖泊水质恶化的主要原因之一。在我国农村,氮、磷肥料和农药的投入仍然是粮食作物增产的有效措施之一。但是氮、磷的过量施用已带来了令人担忧的环境问题,近二十年来的研究表明,

氮、磷非点源污染负荷已占受纳水体的 50% 以上,并对受纳水体产生严重影响。例如,我国湖泊达到富营养化水平的已占 63.6%,一些农业发达地区的湖泊,如太湖、巢湖、滇池等总氮、总磷浓度是 20 世纪 80 年代的十几倍。由以上分析可见,非点源污染的危害性已经在我国很多流域和地区显现出来,很多地区非点源污染比例已经超过点源污染,严重影响社会的可持续发展。因此,在流域管理规划中,需要将水量与水质统一考虑,若仅从水文水量的角度规划,很难达到预期的流域规划目标。考虑到非点源污染的危害性,仅靠单纯的点源污染控制,若不重视非点源污染研究问题,也很难达到预期的流域环境治理目标。

滦河发源于河北省丰宁县巴颜图古尔山麓,流经坝上草原,穿过燕山山脉,于乐亭县流入渤海,全长 888 km,流域面积 44 750 km²。然而,近年来,随着滦河的不断改道,滦河流域几经变迁,加之该地区开发力度不断加大,人类活动影响渐趋严重,自然生态环境越来越脆弱。滦河流域处于环渤海经济圈前沿,面向太平洋经济圈,内外交通便利,区位优势明显。而滦河流域存在的水污染问题和水量年内及年际分配不均的问题在半干旱半湿润地区普遍存在,具有典型的代表性。因此,从生态环境保护角度来看,研究滦河流域对半干旱半湿润地区的水污染防治和管理具有十分重要的意义。本书以滦河流域为例,基于 HSPF 模型研究半干旱半湿润流域非点源污染模拟与管理,解决模型在半干旱半湿润流域水环境模拟与管理中的模型适用性、输入数据不确定性,水质模块扩展以及参数的率定和验证等关键科学问题。

1.2 污染物总量控制研究进展

1.2.1 污染物总量研究进展

污染物排放总量控制,又称污染物负荷总量控制,是指根据一个区域或特定地区(包括水环境污染严重的区域,或可能成为严重污染的区域及必须重点保护的区域等)的水环境现状和自净能力,考虑社会经济发展水平,科学合理地提出不同时期的水环境目标,依据环境质量标准,计算出研究区所允许的各类污染物的最大排放量,把污染物的排污总量控制在自然环境的承载能力(环境容量)的范围之内。污染物总量控制是 20 世纪 70 年代初发展起来的一种较先进的水环境保护管理方法,最初起源于日本和美国的水质规划,经过近半个世纪的发展和完善,已成为一种比较先进的水环境管理方法,在许多国

家的应用中取得了显著的环境改善效果。

20世纪60年代,日本为改善大气环境质量,提出了污染物总量控制的问题,使日本成为首次提出“总量控制理论”的国家。1973年,日本批准了《濑户内海环境保护临时措施法》,这一法案中设定了COD削减50%的目标。1978年,该法修正案在国会通过,从而正式确立了总量控制措施的法律地位。1979年日本开始在东京湾、伊势湾和濑户内海实行第一次总量控制,1987年、1991年日本分别实行了第二次、第三次总量控制。从第三次总量控制开始,日本环境厅每隔4年执行新一轮的总量控制规划。日本总量控制体系的实施流程主要是由日本环境部根据各地水体污染程度,对各水体的污染物削减进度和削减速率等基本问题做出规定,然后各地方政府据此进一步制订针对各种污染源的具体削减方案。由于采取了总量控制方法,日本3个海湾80%以上的污染大户受到控制,水环境质量得到改善。

美国于1972年开始施行“最大日负荷总量”(Total Maximum Daily Loads, TMDL),并提出了总量分配的思想方法,其有效的执行手段为污染物排放许可证制度。TMDL是指在满足水质标准的情况下,水体能够接受的某种污染物的最大日负荷量,它包括污染负荷在点源和非点源之间的分配,同时还要考虑安全余量(可允许污染负荷的不确定性)和季节性的变化,为采取有效措施使断面水质达到相应的水质标准提供了依据。TMDL的具体实施主要分为以下几个步骤:第一步,调查分析水体目前水质状况,与水质标准进行对比,确定水体是否需要实施TMDL,并对污染水体控制治理的先后顺序进行分析;第二步,制定TMDL,主要包括筛选主要目标污染物、水体最大允许负荷的计算、入河的污染物总量计算、污染负荷的分配;第三步,执行TMDL计划;第四步,评估TMDL实施效果,主要采取的措施为实地监测。并且美国从1983年开始正式立法,实施以水质限制为基点的污染物排放总量控制,之后又陆续开展了“季节总量控制”和“实时总量控制”。

20世纪70年代以来,欧洲共同体相继出台了一系列的水政策,其目的是缓解、逐步停止并消除人类活动对水体的影响,保证民众和环境健康。而欧洲的总量控制大体经过了方法初现、限制控制、目标与限制结合控制三个阶段。2000年《水框架指令》(WFD)的颁布实施标志着欧盟进入了综合和全方位管理的新阶段。该指令的主要特点有:①从流域区域尺度强调水管理要综合水资源量、水资源利用方式及价值、不同学科及专家意见、涉水立法、生态因素、治理措施、利益相关者意见和建议及不同层次决定等诸多要素,加强政策措施制定的透明度,鼓励公众参与,并给出流域水管理的基本步骤和程序;②总体

目标是保护生态良好,进而从根本上满足动植物保护及水资源和环境的可持续利用;③该法令共包含 26 条和 11 个附件,明确了水资源及环境保护的目标,规定了各项任务的完成期限,对各项措施的实时方法给出了基础性的解释,为水环境及水资源的管理提供了一个基本框架,并要求各成员国及技术指导组报告各阶段的指令实施结果。

我国的水质目标管理主要集中于水污染总量控制的研究上,而水污染物总量控制研究开始于 20 世纪 70 年代,以制定松花江生化需氧量(简称 BOD)总量控制标准为先导进行了最早的探索和实践。早期研究侧重于水环境容量、污染负荷分配和水环境承载力的定量研究上;后又进行了以总量控制规划为基础的水环境功能区划和排污许可证发放等方面的研究,并在近海海域环境污染物自净能力和环境容量方面进行了有益的探索;这期间还开展了水质模型、水环境容量、排污许可证管理制度以及流域水污染防治综合规划等多项技术研究,将总量控制技术与水污染防治规划相结合,并在辽河、淮河、海河以及太湖、巢湖、滇池等重点流域开展了水环境容量的研究,从而逐步形成了以目标总量控制为主、容量总量与行业总量控制为辅的管理技术体系,为我国涵盖总量控制、排污许可证等环境管理基本制度的建立奠定了基础。我国从 20 世纪 90 年代后期开始在水环境管理中应用总量控制技术。在实践和探索的过程中,我国出台了一系列水污染总量控制的相关规定与标准。水污染总量控制已逐步成为我国实施水环境管理的重要措施,并且在经过浓度控制、目标控制两个阶段之后,将逐步过渡进入容量总量控制阶段。

在总量控制的实施方面,我国也进行了大量的研究工作。如张天柱(1990)对区域水污染物排放总量控制的大系统理论模式进行了探讨,提出把水污染物排放总量控制作为一个涉及经济、法律、行政、技术等多方面综合的水环境管理体系;李嘉和张建高(2001,2002)充分考虑各污染源对容量资源的竞争,推导并建立排污量限制和排污浓度限制的协同模型。而近期总量控制的研究方向则主要集中在以下几个方面:①重点污染水域环境容量测算;②环境容量分配;③总量控制在管理过程中的有效实施,等等。

1.2.2 我国污染物总量控制的发展方向

目前我国的流域水环境管理的发展方向是,在借鉴国外先进经验的基础上,开展符合我国国情的水质目标管理技术研究,形成系统综合的污染治理方案和流域水环境综合管理技术体系,实现从目标总量控制向基于流域控制单元水质目标的容量总量控制技术的转变。虽然,目前我国对总量控制进行了

大量研究,但在流域总量控制方面仍存在一些問題。我国目前对国际上普遍采用的流域水环境“分区、分类、分级、分期”管理的关键技术还缺乏系统研究。而这一思想在半干旱半湿润流域水环境管理中尤其重要,半干旱半湿润流域水文情况的特点是年际及年内各季节水量变动较大,而目前的研究往往忽略了这一点。因此,完成研究区分区(不同子流域)、分期(不同水文年型)、分类(各种污染源)和分级(不同水质目标)的总量控制是半干旱半湿润流域水质目标管理的发展方向之一。

1.3 非点源污染模型应用进展

1.3.1 非点源污染模型发展

非点源污染模型通过对整个流域系统及其内部发生的复杂污染过程进行定量描述,进行时间和空间序列上的模拟,分析非点源污染产生的时间和空间分布特征,识别其主要来源和迁移路径,预报污染的产生负荷及其对水体的影响,并评估土地利用的变化以及不同的管理与技术措施对非点源污染负荷和水质的影响,为流域规划和管理提供决策依据。非点源模型的发展与人们对非点源污染认识上的提高以及国家和政府的重视有极大的关系,基本上可分为四个阶段。

(1)20世纪50~60年代,以美国农业局为首的研究机构就开发了一些有关农业非点源污染方面的经验统计模型,包括SCS模型和通用土壤流失方程式(USLE),这些模型在径流计算和土壤侵蚀预报方面发挥了重要的作用,这些模型是基于大量观测数据拟合的经验方程,通过这些方程可以计算流域内的平均径流深或者平均泥沙量,但不能模拟详细的时间动态。

(2)20世纪70年代初期至中期,是农业非点源污染模型研究的大发展时期。1972年《美国水污染控制法修正案》发布,该法案明确规定,在制定水污染防治规划时,必须同时包括点源和非点源防治规划。这也使得非点源污染研究突飞猛进,该时期非点源污染模型研究取得了两方面的重要进展:一是从简单的经验统计分析提高到复杂的机制模型,如ACTMO;二是从长期平均负荷输出或单场暴雨分析上升到连续的时间序列响应分析,如PTR-HSP-ARM-NPS。这些模型虽然经过了一些实测数据的检验并得到初步的应用,但它们往往对外部条件(计算机、数据、费用、用户素质等)的要求很高,多数模型只能适用于很小的集水流域,不能适用于非点源污染的广泛性,从而限制了这类

模型的推广和应用。

(3) 20 世纪 70 年代后期特别是 80 年代以来,农业非点源污染模型研究的重点转向如何把已有模型应用到非点源污染的管理中去,并积极开发新的实用模型,研究并广泛实施非点源污染控制与管理措施等,出现了新一代的非点源污染模型,如流域非点源污染模拟模型 AGNPS、ANSWERS 等。美国农业部农业研究所开发的 CREAMS 模型奠定了非点源污染模型发展的“里程碑”,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,泥沙负荷子模型采用经验公式 USLE,预测污染物负荷采用的是概念模型,它首次对非点源污染的水文、侵蚀和污染物迁移过程进行了系统的综合。很多分布式半分布式流域模型也在此时应运而生,例如:MIKE SHE、SWAT 和 HSPF 等,分布式与半分布式模型能够模拟研究区任意空间单元的复杂水文及污染物迁移转化过程,有的模型如 MIKE SHE、SWAT 和 HSPF 等还能够模拟污染物在河流等水体中的迁移转化过程,模型的各个子过程有着可靠的物理机制支持。

(4) 20 世纪 90 年代至今,由于计算机技术和“3S”技术的发展,带动了流域模型的发展。GIS 与模型紧密集成成了发展的主流。分布式参数机制模型的空间数据输入效率、模拟输出显示和模型运行效率因集成而大大提高。GIS 与模型的结合有松散集成、紧密集成、完全集成三种方式。紧密集成是指 GIS 与模型拥有同一用户界面。具有代表性的是由 GIS 来提供共享界面,进行数据的直接转换,为模型提供输入数据,对模型的输出进行可视化处理。其特点是利用 GIS 中内嵌的二次开发语言,如 ARC/INFO 的 AML 和 ArcView 的 Avenue 等为两个系统开发共同的用户界面。松散集成是指 GIS 与模型相互独立,它们通过文件交换传递信息从而实现交互操作。完全集成是模型被移植嵌入到 GIS 当中,成为其中的一个模块。要做到 GIS 与模型二者的完全集成难度很大,目前以紧密集成方式为主,例如 ArcView 与 AGNPS、AnnAGNPS、SWAT 和 GWLF 的集成等。

近些年来,流域综合管理的思想导致了近年来欧美国家一些大型流域管理系统的产生,这类系统集成了污染负荷、水质、水文、工程治理以及费用效益分析等模型,非点源模型是这类系统的核心组成部分。美国国家环保局主持开发的 BASINS 系统标志着这类模型的出现,BASINS 模型系统包括了 6 个组件,即国家环境数据库(National environmental databases)、流域非点源污染及负荷模型(HSPF、SWAT、PLOAD)、河流水质与富营养化模型(QUAL2E)、环境评价工具(TARGET、ASSESS、Data Mining)、实用工具(Utilities)及流域分析

报告(Watershed characterization reports),它将流域数据与各种分析工具集成在一起,使流域管理变得十分方便。

1.3.2 非点源污染模型的比较与选择

非点源污染的发生迁移受降雨径流和流域下垫面特性影响较大,这些因素又随着区域地形地貌、气候条件、水文特征等不同而具有时空变异性,使得任何一种模型的应用都受到时域性和地域性的限制。我国目前尚处于运用国外成熟机制模型阶段,由于气候、土地利用、土壤等相关模型参数的差异,要将国外模型引入我国,其前提是验证模型的适用性,否则,模型变量参数的偏差累积会导致结果的严重不可信。

目前,国内使用较多的非点源模型包括 SWAT、HSPF、AnnAGNPS (AGNPS)和 GWLF。这些模型在结构、参数以及输入数据上各不相同,适用的尺度和流域特征也不尽相同。本书将从模型结构、模型参数以及模型输入数据对以上模型进行比较,查阅模型在国内外不同流域非点源污染负荷估算中的应用案例,分析流域尺度和模型效率,进而来阐述模型的适用性,最后给出非点源污染模型在国内使用时,模型选择的一些原则与建议,从而为非点源污染模型的应用以及非点源污染的综合流域管理提供科学依据。

1.3.2.1 模型的比较

1. 模型算法与功能的比较

SWAT、HSPF、AnnAGNPS (AGNPS)和 GWLF 为机制模型,通过量化非点源污染影响因子,模拟流域非点源污染发生的实际物理过程,这些模型主要由水文、侵蚀和营养物迁移三个基本结构因子组成,但是每个模块使用的计算方法不同,模型在功能上也有差别,如表 1-1 所示。

SWAT 模型是由美国农业部农业局开发的流域尺度模型,用于模拟地表和地下水质的水量及水质,预测不同土地利用情景下对流域水文、泥沙和农业化学物质产量的影响。模型考虑了地表径流、壤中流和地下径流,采用 SCS 曲线法模拟地表径流,可以模拟壤中流和地下径流。对泥沙模拟采用 MUSLE 方程,主要模拟的污染物为氮、磷,考虑了地表径流流失、入渗流失、化肥输入等过程。模型主要通过将相同土地利用方式、土壤特征和管理方式的田块划分成水文响应单元,并假定这些水文响应单元是相互没有联系的,首先独立计算出每个单元的水量、泥沙以及污染物负荷,然后将计算结果累加得到该子流域的水量、泥沙以及污染物负荷总量。模型中的水库演算为独立部分,分别计算水库水量平衡、泥沙以及污染物负荷。

表 1-1 常用模型主要模块算法比较

模型	水文模块				泥沙模块			污染物迁移模块
	地表径流	地下径流	河道汇流	水库演算	土壤侵蚀	泥沙运移	水库演算	
SWAT	SCS 曲线法或 Green-Ampt 公式	壤中流使用动力蓄水模型、地下水流使用经验公式	曼宁公式和变动存储系数模型或 Muskingum 演算法	水量平衡或者实测流量	MUSLE	Bagnold 指数	流量和沉积物浓度乘积推求	EPIC 模型和 QuAI2K 一维稳态水质模型
HSPF	Philip 方程和 Chezy-Manning 公式	壤中流和地下径流都使用经验公式	连续性方程和存储系数法或运动波方程	处理成河道	考虑雨滴溅蚀、径流冲刷侵蚀和沉积作用	考虑沙粒、粉沙和黏粒 3 个粒径等级的泥沙	处理成河道	考虑复杂的污染物平衡,可以模拟输出多种污染物负荷
AGNPS	SCS 曲线法	壤中流使用达西定律,不考虑地下水流	曼宁公式和渠道形状关系	根据水库容量推求	MUSLE	Bagnold 指数	根据水库容量推求	一级动力学方程和 CREAMS 模式
GWLF	SCS 曲线法	不考虑壤中流,地下水流使用经验公式	不考虑	不考虑	MUSLE 和通用累积冲刷方程	不考虑	不考虑	不考虑

HSPF 模型是美国环境署开发的流域水质模型,可以对水文、水质进行长期连续模拟。模型中水文模块以 Stanford 水文模型为基础,自上而下分为树冠层、植被截留层、各个土壤层,同时考虑降水、植被截留、不同土壤层的水分传导、蓄积和蒸散发等水量平衡中十多个子过程;泥沙模块则考虑雨滴溅蚀、泥沙冲刷和不同粒径泥沙在河道中的输移、淤积以及冲淤过程;营养物迁移模块考虑复杂的污染物平衡。水库按河道处理,计算方法与河道产流和产沙计算相同。该模型按地表性质差异将模拟地段分为透水地面段、不透水地面段、河流或混合型湖泊(水库)三部分分别进行水文和水质过程模拟。

AGNPS 模型是由美国农业部农业研究局和土壤保护局于 1986 年联合开发的基于降水事件的分布式参数模型,主要用于小流域生态系统中的农业非点源污染评价与预测,可以模拟农业区内径流、泥沙和化学径流(氮、磷)。模型中水文模块只考虑了地表水和部分壤中流,并不考虑地下水,地表径流应用美国土壤保持局提出的 SCS 曲线数法计算;土壤侵蚀量利用修正的通用土壤流失方程(MUSLE);营养物模块则考虑氮磷的迁移转化。水库的蓄水量和泥沙则按照水库容量确定。该模型以网格为基本的运行单位,通过逐网格演算推算至流域出口。首先计算所有起始单元内坡地侵蚀,地表径流、汇流时间,以及可溶性污染物水平;其次计算流出起始单元的地表径流和泥沙量;最后完成整个流域的计算汇总。

GWLF 模型是由美国康奈尔大学开发的流域非点源污染模型,主要用于模拟流域内不同土地利用类型所产生的地表径流、土壤侵蚀以及由其产生的氮、磷养分污染。水文模块中应用 SCS 曲线方法计算地表径流,对地下径流和壤中流考虑不多,仅仅根据水量平衡的经验公式推求地下水量;泥沙模块采用 MUSLE 方程计算土壤侵蚀,城市地表冲刷利用通用累积冲刷模型。营养物迁移模块应用污染物单位负荷率计算,即在径流汇流和泥沙运移过程中可不考虑其平衡和迁移转化,通过累加流域内不同土地利用对非点源污染的贡献率得到流域非点源污染负荷总量。

2. 模型输入与输出的比较

SWAT 模型的输入数据包括逐日的降雨、最高/最低气温、太阳辐射和相对湿度(这些数据可以是实测数据,也可以通过模型天气发生器来生成,但是降雨数据最好用实测值),DEM,土地利用图层、土壤图层,点源排放数据,以及储水区与水库信息。输出连续的逐日水量、泥沙以及污染物负荷,污染物负荷包括氮、磷的各种形态以及重金属。

HSPF 模型的输入数据包括逐时的降雨、蒸发量、气温、风速、太阳辐射、

潜在蒸散发、露点温度以及云量,DEM,土地利用图层、土壤图层,点源排放数据。模型输出水量、沉积物、营养物、DO、BOD、藻类及农药过程的年、月、日时间序列。营养物包括氮、磷的各种形态以及用户定义的污染成分。

AGNPS 模型的输入信息包含逐日降雨量,降雨能量强度值,DEM,土地利用图层、土壤图层,以及 BMP 措施的去除情况;输出信息包含暴雨径流和峰值流量、沉积物、营养物和 COD 浓度;污染物类型包括氮、磷、COD、细菌和金属。

GWLF 模型要求输入逐日的降雨和平均气温,土地利用图层数据,输出月平均的水量,泥沙、污染物负荷量,以及每种土地利用类型年平均负荷。污染物类型包括总氮和总磷。

3. 模型应用的比较

1) 同一模型在不同流域的应用比较

SWAT、HSPF、AGNPS 和 GWLF 模型在国内外都有广泛的应用,但是每一种模型都有其特定的使用范围和应用条件,为了分析模型更适合于什么特征的流域,本书在大量阅读文献的基础上,选取了流域尺度和气候条件典型的流域列于表 1-2 ~ 表 1-5,为模型在国内的应用提供模型适用性的信息。从表中可以看出,SWAT 模型使用的流域尺度最广,HSPF 模型次之,而 AGNPS 和 GWLF 模型则比较适用于小流域。

2) 不同模型在同一流域的应用

比较同一流域不同模型的应用效果,对模型选择也非常重要。本书参考前人的研究,比较了模型的模拟效率,并从结构上分析了模型适用性。

Boomer et al(2011)在 Chesapeake Bay 流域研究流域管理和土地利用规划时,比较了 GWLF、SWAT 和 HSPF 模型的模拟效果,研究发现,三个模型对于径流的预测效率相差不大,率定期和验证期,GWLF、SWAT 和 HSPF 的决定系数和纳什效率系数都在 0.75 左右,但是对于污染负荷模拟中,模型效率存在差别。研究还发现,当土地利用发生变化时,在湿润季节,GWLF 模型预测的流量和总氮负荷增加值比 SWAT 模型预测增加值更显著;在干旱季节,SWAT 模型预测的流量和总氮负荷减少值比 GWLF 模型预测减少值明显,可能因为 SWAT 参数受蒸发影响较大,而 GWLF 模型参数受下渗影响较大。