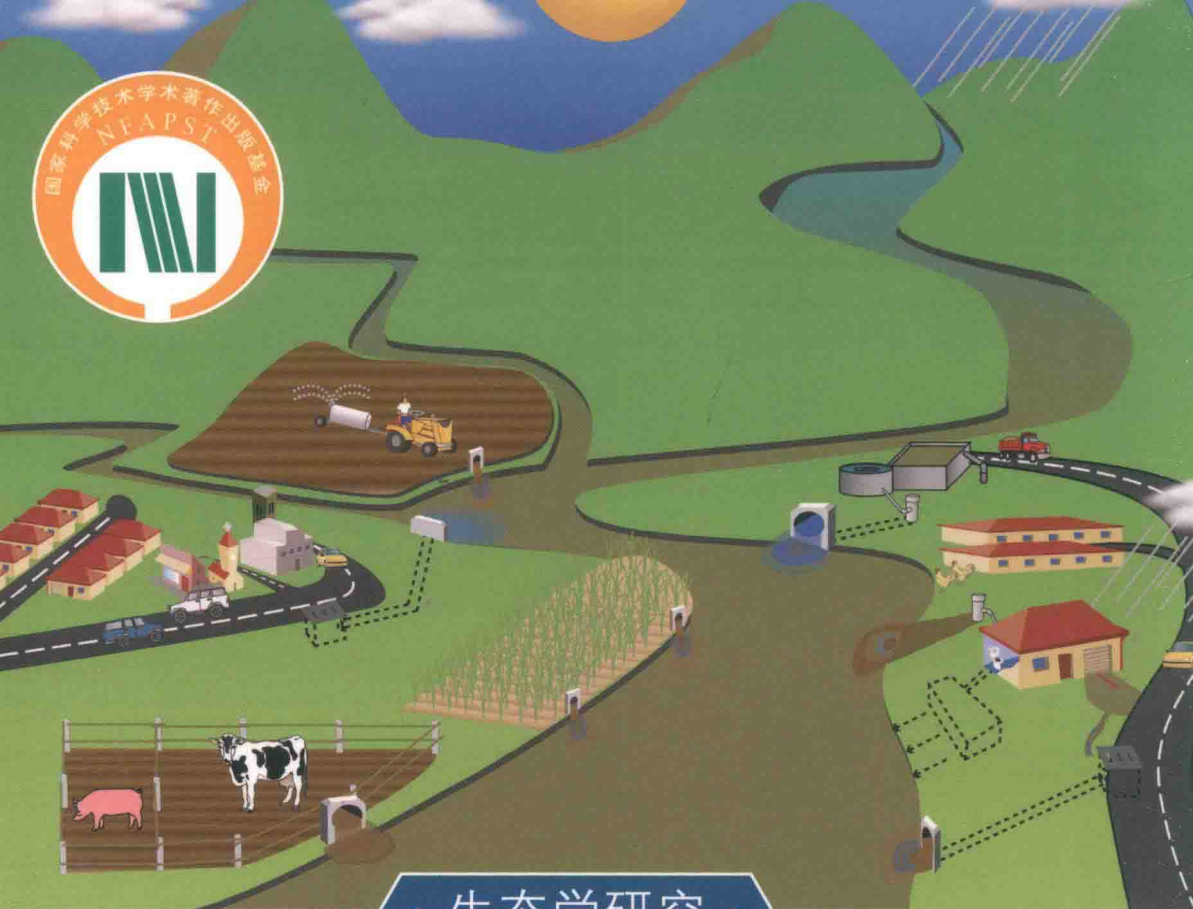




· 生态学研究 ·

分布式栅格流域环境系统 模拟模型及应用

李 勇 等 编著



科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

生态学研究

分布式栅格流域环境系统 模拟模型及应用

李 勇 等 编著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

流域生源要素管理模型(CNMM)是一个空间分布式、基于栅格数据结构的流域生态水文环境模拟模型。本书对CNMM的原理及应用进行了较全面的介绍,主要包括:CNMM的结构和建模方法;CNMM的基本模块(能量、水文、植物生长、碳氮磷循环、管理措施、水体水质等);CNMM的废弃物处理和人工湿地模块;环境变化(气候和土地利用)与流域生态水文过程的交互影响;CNMM关键参数的空间化方法、敏感性分析和优化方法,以及模型的不确定分析方法;CNMM的应用实例。

本书可供从事流域生态水文、环境科学、农业科学、生态学等研究的科研人员及大专院校师生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

分布式栅格流域环境系统模拟模型及应用/李勇等编著. —北京:科学出版社, 2017.3

(生态学研究)

ISBN 978-7-03-049714-7

I. ①分… II. ①李… III. ①流域环境—模拟系统—研究 IV. ①X321

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第206445号

责任编辑:罗 静 岳漫宇 刘 晶 / 责任校对:李 影

责任印制:张 伟 / 封面设计:刘新新

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>

北京京华虎彩印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年3月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2017年3月第一次印刷 印张:13

字数:260 000

定价:80.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《分布式栅格流域环境系统模拟模型及应用》

编写人员名单

李 勇 沈键林 王 毅 高懋芳

刘 锋 周 萍 刘新亮 陈 丹

邹钢华 罗 巧 马秋梅

作者简介

李勇，男，1967年生，研究员，博士生导师。1989年获农学学士学位（南京农业大学土化专业），1992年获理学硕士学位（中国科学院沈阳应用生态研究所生态学专业），2002年获博士学位（澳大利亚墨尔本大学资源管理专业）。1992~1998年在中国科学院南京土壤研究所任助理研究员，2002~2009年在墨尔本大学任研究员。2009年7月至今在中国科学院亚热带农业生态研究所任研究员，并入选中国科学院“百人计划”。

主要从事流域生态水文、碳氮磷循环与农业面源污染防治研究。近五年主持承担科技部973计划课题与专题、科技支撑计划专题、中国科学院“百人计划”项目、院/省/市重点项目、国家自然科学基金项目等十多项研究任务。在碳氮磷于土壤/微生物和农田水系中转化与运移过程、农业氮磷污染生态防控、农田和流域碳氮磷循环模型、陆气界面碳氮气体交换等方面成果显著。主要成果包括：确定土壤微生物量元素计量比与农田系统生产力和环境负荷关系密切；以第一完成人，与墨尔本大学、中国农业大学合作开发了农田水与养分管理模型（WNMM），并在多国应用；目前独立研发了适用于我国亚热带、高分辨率（时、空和生态过程）、空间分布式的栅格流域生源要素管理模型（CNMM）。发表科学论文100余篇，其中SCI收录的学术论文70余篇，千余次引证。

序

为满足流域水文、生源要素物质循环高分辨率模拟的需要,以分布式水文模型(如 DHSVM、GSSHA)框架为基础,开发了分布式的流域水文模块,并与生态系统模型 WNMM 进行了无缝耦合,主要表现为两者共用统一数据结构,WNMM 模型的植物生长、有机物质分解和土壤有机质积累、溶质淋溶、硝化和反硝化、碳氮气体(CO_2 、 CH_4 、 NH_3 、 NO 、 N_2O 、 N_2)排放及农学措施等模块得到了保留,扩充了地表径流汇流、不饱和区和地下水饱和流汇流、渠道水流汇流、能量平衡和融雪等过程,于是构建的流域碳氮循环耦合模型具有三维的水文模块和溶质迁移模块,土壤各层次的温度由能量平衡的土壤热项和热传导方程来定解,现定名为流域生源要素管理模型(Catchment Nutrients Management Model, CNMM)。该模型的模拟空间大小为 $1\sim 500\text{ km}^2$ (小流域),垂直深度为 $1\sim 10\text{ m}$ (一般为 4 m ,在这个深度的土壤温度基本上恒定,近似于年平均气温),时间尺度为 $1\sim 100$ 年(一般为 30 年、60 年、90 年),时间步长为 $1\sim 24\text{ h}$ (一般为 3 h),网格大小为 $1\sim 100\text{ m}$ (一般为 10 m)。模型的汇水方式为分布式,单网格可以向 4 个方向(上、下、左、右)的邻网格分水。CNMM 模型相比于其他水文模型的特点是基于网格,任意时间尺度和空间尺度,考虑土壤和土地利用类型,输入变量为气象变量、数字高程和河流网络(由 ARC/INFO 或其他 GIS 系统产生),输出变量为流域各出口流量和水质、点及区域的土壤和植物各种变量(如植物生物量、产量、土壤水分、土壤养分、土壤温室气体排放等)。目前该模型已经在湖南长沙县金井河流域、四川盐亭小流域、江西千烟洲小流域等进行了验证,在较少的参数校正下,模拟的流域出口水量和水质与观测值具有很好的吻合。

本书第 1 章综述了当前流域环境模型的研究进展;第 2 章介绍了 CNMM 的结构和建模方法;第 3 章至第 9 章主要介绍了 CNMM 的基本模块;第 10 章和第 11 章介绍了与环境污染及治理相关的扩展模块;第 12 章和第 13 章描述环境变化(包括土地利用和气候)对流域生态水文过程以及流域行为的影响;第 14 章和第 15 章报告了 CNMM 模型关键参数的系列空间化方法、敏感性分析和优化方法,并介绍模型模拟的不确定分析方法;第 16 章以湖南省金井河流域为例,介绍了 CNMM 的实际应用。

李 勇

2017 年 3 月 15 日于长沙

前 言

近十年来,水文学家、生态学家和环境学家都建立及应用了各自领域的数学模型,在流域尺度模拟农业点源和非点源污染,如美国环保署的 HSPF 模型(Bicknell et al., 2001)和美国农业部的 SWAT 模型(Arnold et al., 1998)、澳大利亚 CSIRO 的 E2 模型(Argent et al., 2005),以及其他的模型如 RHESsys(Band et al., 1991)等。这些模型主要基于水文反应单元,应用广泛且各有特点,如在水文方面 HSPF 模型要比 SWAT 模型准确,但在污染物和土壤颗粒迁移方面却不如后者;E2 模型实际上是一个模拟框架,用户可以随意地选择自己喜欢的水文模块,以及污染物产生、迁移和过滤等模块进行农业生态系统模拟,但它的污染物产生模块却非常简单,同时它也提供给有经验的用户进行污染物产生模块的自我定义,从而实现灵活而机动的目的。我国在国际上较有影响的流域环境模型为新安江模型(Zhang et al., 1992)、HELP 模型(Yang et al., 2005)和 ECOHAT 模型(刘昌明等, 2010)等,主要侧重于流域水文及生态水文耦合的模拟。

另外,基于田块尺度的农田生态系统模型如 ANIMO(Kroes et al., 1998)、CENTURY(Parton et al., 1988)、DNDC(Li, 2000)、ECOSYS(Grant, 2001)、DAISY(Hansen et al., 1991)、WNMM(Li et al., 2007)和 FASSET(Chatskikh et al., 2005)功能全面,能够比较系统地模拟农业生态系统的各个生态过程(包括植物生长和水-碳-氮-磷循环),但都缺乏对水分在空间上的三维动态模拟,从而限制了它们在景观尺度上应用于农业生产活动对环境的影响评价。

本书作者及其科研团队在中国科学院“百人计划”和科技部重点基础研究项目课题的资助下,以其已开发完成并得到广泛应用的农田生态系统养分管理模型 WNMM 为生物地球化学功能基础,结合空间分布式的栅格流域水文模型,扩展其三维水文及生态水文耦合过程模拟能力,构建了流域生源要素管理模型(Catchment Nutrients Management Model, CNMM)。CNMM 综合模拟亚热带农业生态系统中人、动物和自然的关系,农业生产活动与环境的关系,公共社会民生政策(包括区域经济开发、污染控制和温室气体减排)和农业生态系统行为(包括土地利用变化 and 环境影响)的关系,以及农业生态系统对全球气候变化的响应等,寻求基于追求不同社会、环境和经济效益等方向的农业生态系统最佳管理模式。

目 录

1. 流域环境模型研究进展	1
1.1 引言	1
1.2 国外流域环境模型研究	2
1.3 流域环境模型系统	10
1.4 流域环境模型发展趋势	12
参考文献	12
2. 模型结构与建模方法	15
2.1 引言	15
2.2 模型的结构和主要模块	15
2.3 模型输入数据	25
2.4 模型输出	26
2.5 模型潜在应用	26
参考文献	27
3. 能量平衡	28
3.1 引言	28
3.2 能量平衡	29
参考文献	35
4. 水文过程	36
4.1 引言	36
4.2 水文过程的组成部分	36
参考文献	44
5. 碳循环	46
5.1 土壤碳库分类	46
5.2 土壤碳循环的影响因素	48
5.3 土壤有机碳库转化、分解	51
5.4 土壤有机碳库的 CO ₂ 、CH ₄ 排放	53
5.5 DOC 淋溶和迁移损失	54
参考文献	54

6. 氮循环	57
6.1 引言	57
6.2 氮循环框架	57
6.3 大气氮沉降	58
6.4 生物固氮	58
6.5 尿素水解	59
6.6 植物氮吸收	60
6.7 硝化、反硝化过程	60
6.8 氨挥发	64
6.9 土壤铵离子吸附	64
6.10 氮淋溶损失	65
参考文献	65
7. 磷循环	67
7.1 引言	67
7.2 磷循环框架	68
7.3 土壤无机磷组分之间的交换	68
7.4 土壤磷素淋溶与迁移	69
7.5 土壤磷素的植物吸收	70
参考文献	70
8. 植物生长	71
8.1 引言	71
8.2 模型描述	71
参考文献	77
9. 水体水质	78
9.1 引言	78
9.2 藻类	78
9.3 氮素	81
9.4 磷素	83
9.5 碳基生化需氧量	83
9.6 溶解氧	84
参考文献	86
10. 水生植物生态湿地污水净化系统	87
10.1 引言	87

10.2	水生植物对氮、磷的吸收和转化	87
10.3	水生植物在污水净化中的应用	90
10.4	小结	93
	参考文献	93
11.	废弃物处理	95
11.1	引言	95
11.2	废弃物产生与处理模型	95
11.3	废弃物产生与处理过程	97
11.4	废弃物生物地球化学过程	100
11.5	环境影响因子及计量学关系	108
	参考文献	112
12.	土地利用变化及其对生态水文过程的影响	114
12.1	引言	114
12.2	土地利用变化研究	114
12.3	小流域土地利用变化研究方法	120
12.4	小流域土地利用变化模型构建	123
12.5	土地利用变化对生态水文过程的影响研究	132
	参考文献	133
13.	流域关键生态水文过程对气候变化的响应	142
13.1	气候变化研究现状	142
13.2	小尺度气候变化研究方法	143
13.3	气候变化与土地利用变化的关系	146
13.4	水文过程响应气候变化的研究	147
	参考文献	148
14.	模型关键参数空间化方法	151
14.1	引言	151
14.2	地统计学插值	151
14.3	土壤传递函数估算	153
14.4	遥感-模型反演	157
	参考文献	164
15.	模型关键参数的敏感性及其不确定性分析和优化方法	165
15.1	引言	165
15.2	模型参数的敏感性	165

15.3 常见模型参数的不确定性分析方法.....	169
15.4 常见模型优化方法.....	177
参考文献	180
16. 模型应用：以金井河流域为例	181
16.1 引言	181
16.2 伏岭小流域	182
16.3 飞跃小流域	185
16.4 涧山流域	187
16.5 南岳流域	188
16.6 小结	192

1. 流域环境模型研究进展

1.1 引言

水资源是基础自然资源,是生态环境的控制性因素之一,水资源问题为世界普遍所关注,它不仅影响、制约社会的可持续发展,而且将成为 21 世纪全球资源环境的首要问题,直接威胁人类的生存和发展。水资源是量与质的高度统一,我们在面临水量危机的同时,水质危机更加严重,甚至因水质问题所导致的水资源危机大于水量危机。

《2014 年中国环境状况公报》显示,全国水环境质量不容乐观。全国 423 条主要河流、62 座重点湖泊(水库)的 968 个国控地表水监测断面(点位)中,Ⅳ、Ⅴ、劣Ⅴ类水质断面比例为 36.9%。Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ、劣Ⅴ类水质断面分别占 3.4%、30.4%、29.3%、20.9%、6.8%、9.2%。开展营养状态监测的 61 个湖泊(水库)中,富营养状态的有 15 个。2014 年,流域地下水水质监测井 2071 个测站数据评价结果显示,较差和极差测站的比例为 84.8%。海水方面,2014 年春季、夏季和秋季,劣于第四类海水水质标准的海域面积分别为 $52\,280\text{ km}^2$ 、 $41\,140\text{ km}^2$ 和 $57\,360\text{ km}^2$,主要分布在辽东湾、渤海湾、莱州湾、长江口、杭州湾、浙江沿岸、珠江口等近岸海域。春季、夏季和秋季,呈富营养化状态的海域面积分别为 $85\,710\text{ km}^2$ 、 $64\,400\text{ km}^2$ 和 $104\,130\text{ km}^2$ 。夏季,重度、中度和轻度富营养化海域面积分别为 $12\,800\text{ km}^2$ 、 $15\,840\text{ km}^2$ 和 $35\,760\text{ km}^2$ 。重度富营养化海域主要集中在辽东湾、长江口、杭州湾、珠江口等近岸区域。水利部报告目前全国有 3.2 亿农村人口喝不上符合标准的饮用水,其中约 6300 多万人饮用高氟水,200 万人饮用高砷水,3800 多万人饮用苦咸水,1.9 亿人饮用水有害物质含量超标。另外还有很大一部分城市人口的饮用水也不达标(戴丽,2015)。

虽然随着我国环境治理力度的加大,水质恶化的势头有所抑制,但从总体上来判断,水质恶化的趋势不可避免,从空间上,已从大陆向海洋、从城市向农村扩展,如果不采取有力的措施,一些城市、地区或流域甚至全国可能发生水质危机,可以说,水质危机危害远远超过水量危机,必须引起高度重视。与此同时,流域环境问题长期以来缺乏系统性、协同性和创新性的科学研究,水污染控制的技术支撑比较薄弱,水资源与水环境质量仍将是制约与胁迫我国经济社会发展的重大瓶颈。

流域环境系统模型从流域尺度出发,通过模拟污染物在流域范围内的迁移转

化过程,系统认识流域环境系统特征,研究各种污染形成机制,明确污染物运移的时空分布规律,是流域环境规划、管理、研究的重要工具。相对其他注重单一过程和注重小尺度或田间尺度的多个过程的模型而言,流域尺度环境模型在整个流域范围内整体模拟水文过程和环境动态,可以为治理和管理流域水环境提供有力支持。

根据不同的分类原则,流域环境模型可以分成不同的类型。

根据模型的空间表征方式,流域环境模型可以分为(半)分布式模型和集总式模型。前者将流域分成若干个小的单元或者亚流域,通过严格的数学物理方程和函数关系来表述流域的水文过程及地球物理和化学过程,参数具有明确的物理意义,可以通过连续方程和动力方程求解,并通过实测数据校准模型,获得空间化的参数系数,如 SWAT 模型和 EFDC 模型等;后者将流域视为一个整体单元,用抽象和概化的方程表达流域的水循环过程,具有一定的物理基础,模型结构相对简单,实用性较强,但在许多环节上一般借助于概念性元素或经验函数关系描述,缺乏明确的物理意义,模拟结果有时不够理想,包括 SPARROW 模型等。

根据模型输入数据或参数的特点,流域环境模型可以分为确定模型和随机模型。确定模型根据确定的数学关系来描述流域的水文过程及地球物理化学过程,而随机模型的输出结果在大多数情况下只是一个变化范围。尽管大多数模型都是确定模型,随机模型具有两大优势:第一,当流域空间或时间信息有限时,随机模型可以以简单的概念框架来描述空间或时间异质性;第二,可以使决策支持者明确预测的不确定性(Todini, 2004; Zheng and Keller, 2008; Daniel et al., 2011)。

根据时间尺度,流域环境模型还可以分成基于降雨事件型和连续型模型。降雨事件型模型只是模拟单次降雨事件的入渗、地表径流等过程,而连续型模型还考虑前后降雨事件发生之间土壤湿度等的变化。

1.2 国外流域环境模型研究

国外流域环境模型研究经历了萌芽期(20 世纪 70 年代末之前)、快速发展期(20 世纪 80 年代初至 90 年代初)、完善应用期(20 世纪 90 年代中后期至今)(沈晔娜, 2010),由简单的统计分析向机理模型模拟、由平均负荷输出或单场暴雨分析向连续时间响应分析、由集总模型向分布式模型发展,耦合 GIS 和 RS 等实现最佳管理、标识关键源区,今后模糊理论、不确定性分析、风险评价和管理的引入将促进相关研究的开展(夏军等, 2012)。下面对目前应用比较广泛的几种流域尺度水文模型作简要回顾(表 1.1)。

1.2.1 ANSWERS/ANSWERS-2000

ANSWERS (Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation)

表 1.1 主要流域环境模型的比较研究

模型	适用性	主要模块		地表径流	地下水流	养分模拟	空间尺度	时间尺度	流域划分方式	是否公开
ANSWERS	适用于农业流域；为缺乏水文资料流域设计	地表径流，下渗，地下排水，土壤侵蚀、截留及地表泥沙输移	曼宁连续性方程	无	无	无	分布式	基于暴雨事件	方格网；一维模拟	是
ANSWERS-2000	适用于中尺度农业流域；为缺乏水文资料流域设计；有利于评价 BMP 的效果；能模拟氮在 4 个氮库之间的迁移转化	地表径流；下渗；河网汇流；排水；养分迁移	曼宁方程	达西方程	达西方程	氮，磷，泥沙迁移	分布式	连续	栅格	是
AGNPS	适用于农业流域	地表径流，下渗，土壤侵蚀/泥沙迁移	CN：洪峰流量为 TR-55	无	无	无	分布式	基于暴雨事件	同类土地区域	是
AmAGNPS	适用于农业流域；广泛应用于大量保护措施及其他 BMP 效果的评估	水文，泥沙，养分和农药迁移；由 DEM 产生河网	CN：洪峰流量为 TR-55	达西方程	达西方程	氮，磷，农药，有机碳	分布式	连续；以天或小于天计	同类土地区域，河道，水坝	是
GS2H/CASC2D	适用于农业或城市流域；可模拟于各种气候变化条件和复杂空间数据集下的流域	空间异质的降雨；降雨产流和二维汇流；土壤湿度，高地侵蚀，泥沙输移	二维扩散波方程	无	无	无	分布式	基于暴雨事件；连续	二维格网；一维河道	否
HEC-1/HEC-HMS	适用于城市流域；大量用于模拟洪水及其对土地利用变化的影响	降雨，损失，基流，地表径流转化和汇流	CN：运动波方程	无	无	无	半分布式	基于暴雨事件	树枝状网络或栅格	是
HSPF	适用于农业或城市流域；流域任一点的物质和泥沙输移	地表径流/水质组分，可渗透/不可渗透区域的模拟，河道/混合水库	经验外流	壤中流，外流，渗漏，地下水外流	壤中流，外流，渗漏，地下水外流	土壤温度，水温，溶解氧，二氧化碳，氮，氨气，有机氮/磷，农药	半分布式	连续	可渗透/不可渗透土地区域，河道，混合水库；一维模拟	是
KINEROS2	适用于城市环境，研究单个间断的或设计的暴雨事件；也可用于农业流域	分布式降雨输入，降雨产流，坡面漫流，河道汇流，泥沙输移，截留，入渗，地表径流以及侵蚀	动力波方程	无	无	无	分布式	基于暴雨事件	坡面及河道的连接；一维模拟	是

续表

模型	适用性	主要模块	地表径流	地下水流	养分模拟	空间尺度	时间尺度	流域划分方式	是否公开
MIKE SHE	空间和时间尺度较大; 标准组件的设计; 高水平的水质, 参数估计和水量分析	截留, 坡面/河道流, 不饱和/饱和区域, 融雪; 含水层/河道交换, 溶质的水平对流/离散, 地球化学过程, 植物生长, 土壤侵蚀及灌溉	二维扩散波方程	三维地下水流	地表, 土壤及地下水中溶解的物质	分布式	基于暴雨事件; 连续; 可变的; 时间步长	二维矩形/正方形坡面栅格; 一维河道; 三维不饱和和/三维饱和流	否
SWAT	较适用于农业流域; 在计算 TMDL 和模拟大量保护措施以及其他 BMP 方面非常强大; 成功应用于许多国家的流域	水文, 气候, 泥沙, 土壤温度和性质, 作物生长, 养分, 农药, 农业管理, 河道和水库汇流	地表径流的计算采用 CN; 洪峰流量的计算采用 SCS TR-55	侧向壤中流/地下水流	氮, 磷, 农药, 碳	半分布式	连续; 以天为时间步长	基于气候的亚流域, 水文响应单位, 池塘, 地下水, 以及主河道	是
WEPP	较适用于农业流域, 分析小流域水文和土壤侵蚀	气候产生, 冻土, 积雪及融雪, 灌溉, 入渗, 坡面流水力学, 水量平衡, 植物生长, 侵蚀, 沉积及残留物分解	动力波方程	Green-Ampt 公式	无	分布式	连续	河段及水坝	是

是美国普渡大学开发的基于单次事件的分布式参数模型 (Beasley et al., 1980)。20 世纪 90 年代, Bouraoui 和 Dillaha (1996) 基于原模型开发了连续模拟版本 ANSWERS-2000, 以方格划分流域, 网格内所有的水文参数 (土壤特性、地表状况、植被、地形等) 一致。雨期和无雨期的模拟步长分别为 30 s、24 h。ANSWERS 和 ANSWERS-2000 可以用于模拟水文资料缺乏的流域, 评估农业和城市流域最佳管理措施 (BMP) 在地表产流过程中降低泥沙和养分流失的有效性。

夏军等 (2012) 指出, 由于该模型采用经验性的侵蚀模块, 仅可以模拟总泥沙迁移过程, 而不能模拟如地表径流的饱和度、地下水等许多子过程; 因未考虑不稳定水流运动、土壤中污染物运移、土壤与地表水之间的交换等, 导致非点源污染模拟具有不确定性, 不能很好地用于 BMP 规划; 江河中水流和泥沙输移运动与耕地上坡地流的特性不同, 需修改输移方程; 不适于壤中流为主的流域。Oogathoo (2006) 指出 ANSWERS 的主要缺点是不能模拟壤中流, 也不能模拟地下水对基流、积雪和融雪的贡献。这表明, 该模型不适用于基流、积雪和融雪很大的流域。Borah 和 Bera (2003) 也指出, ANSWERS 不宜模拟高强度的单次暴雨事件, 在求解方程时会出现数值问题。他们也指出 ANSWERS-2000 没有河道侵蚀和泥沙输移过程, 因此泥沙和化学组分模块不适用于流域尺度的分析。

1.2.2 AGNPS/AnnAGNPS

AGNPS 模型 (Agricultural Non-Point Source Pollution Model) (Young et al., 1995) 是 1986 年由 USDA-ARS 与明尼苏达污染防治局研制的流域分布式事件模型, 步长为暴雨历时, 适于 $1 \sim 20\,000\text{ hm}^2$ 的流域, 以方格划分流域, 包括水文、侵蚀、泥沙和化学物质传输模块。AnnAGNPS (Annualized AGNPS) (Bosch et al., 2001) 是 1998 年研发的可以暴雨事件、月或年为步长的半经验、分布式、连续模拟、地表径流污染物负荷模型, 适合 $1 \sim 300\,000\text{ hm}^2$ 的流域。该模型可以通过成本-效益分析实现流域地表径流、水土流失和养分迁移的管理。它可以模拟池塘、植被过滤带、河岸缓冲区等最佳管理措施 (BMP) (Kalin and Hantush, 2003)。Borah 和 Bera (2003) 指出, AnnAGNPS 模型可以用来分析水文变化和流域管理措施尤其是农业措施的长期影响。Baginska 等 (2003) 研究表明 AnnAGNPS 对暴雨产流的预测效果基本满意, Das 等 (2004) 以可接受的精度模拟安大略湖西南的 Canagagigue Creek 流域的地表径流, 而 Suttles 等 (2003) 和 Yuan 等 (2001) 研究表明该模型可以预测长时间的月均或年均地表径流量。

但是 AnnAGNPS 模型主要有以下局限性: ①不能模拟基流或在冻土条件下进行模拟; ②模型没有考虑流域内降雨的空间分布不均匀性, 因此忽略了流域内的水量平衡计算; ③径流模拟并非全部基于物理定理 (Oogathoo, 2006)。

1.2.3 CNMM

流域生源要素管理模型 (Catchment Nutrients Management Model, CNMM) 是以我国亚热带小流域为研究区域的一种分布式数学物理流域环境模型 (Li, 2015), 用于农田生态系统水-碳-氮等物质循环的模拟, 进而可研究区域气候变化对农业的影响, 揭示地球表层物质生源要素比率与农业生产力的关系。其前身为水-氮管理模型 (WNMM 模型), CNMM 完善并扩展了 WNMM 模型的结构和功能。该模型与分布式 DHSVM 水文模型进行无缝耦合, 增加了水文循环模块, 将流域水量平衡和能量平衡联立起来。CNMM 模型基于物理空间网格进行架构和运行, 以数字高程模型 (DEM) 网格节点为中心, 计算时把流域划分为若干栅格单元, 在各网格上根据质-能平衡方程求解。CNMM 模型具有三维的溶质迁移模块和水文模块。其中溶质迁移模块涉及植物生长、植物-土壤-水体系统中的水-碳-氮循环 [包括新鲜有机物质分解、土壤有机质分解与积累、干湿沉降、硝化和反硝化、碳氮气体 (CO_2 、 NH_3 、 N_2O 、 NO 、 N_2) 排放等]、水土及碳氮迁移与流失、农业管理措施 (包括播种、收获、耕作、施肥、灌溉、水渠植草、废弃物管理等) 等子过程; 水文模型涉及降雨及蒸发散、地表径流汇流、不饱和区和地下水饱和和流汇流、渠道水流汇流、融雪等子过程。

该模型的新颖之处在于它是基于栅格和水系网络的, 可作用于任意时空尺度, 对时间做一维剖分, 对空间做三维立体剖分。CNMM 可以应用于开展长期连续地模拟多种养分管理措施、耕作措施、自然保护措施、替代农作系统和其他农业管理措施对地表径流和养分流失的影响。

1.2.4 GSSHA/CASC2D

CASC2D (Julien and Saghaian, 1991) 是基于半干旱流域开发的用于预测地表径流的分布式水文模型, 其水和泥沙是在二维地面栅格和一维渠道中进行模拟的。该模型既可以模拟单次降雨事件, 也可以进行长期连续模拟。GSSHA (Downer and Ogden, 2004) 是 CASC2D 的加强版, 在保持 CASC2D 所有功能的基础上, 提高了模型的稳定性和运行效率, 可以模拟饱和/非饱和地下水, 允许模型在各种气候下和流域内的应用。GSSHA 可以用于城市化区域的径流模拟、洪水预测及城市规划等。相比 CASC2D, GSSHA 可以模拟水文储存单元如湖泊、湿地、水库等, 并且在河道内泥沙输移的预测方面有所改进, 尤其是在强降雨事件发生时 (Downer and Ogden, 2004)。CASC2D 和 GSSHA 在密西西比的 Goodwin Creek 实验流域都得到了测试, 结果表明, GSSHA 在选定的暴雨事件中模拟泥沙输出的精度优于 CASC2D (Ogden et al., 2001; Downer and Ogden, 2004)。

Kalin 和 Hantush (2003) 的研究表明, 该模型存在一些明显的局限性, 如对