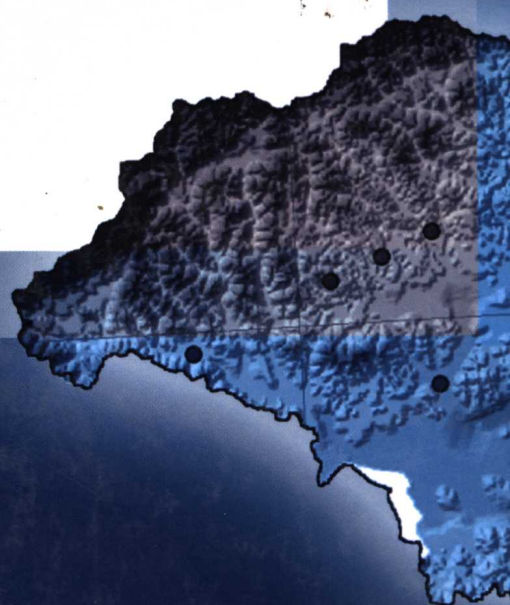


非点源 污染模型

——理论方法与应用

郝芳华 程红光 杨胜天 著



NON-POINT SOURCE POLLUTION MODEL

中国环境科学出版社

非点源污染模型

理论方法与应用

郝芳华 程红光 杨胜天 著

图书在版编目 (CIP) 数据

非点源污染模型: 理论方法与应用/郝芳华, 程红光,
杨胜天著. —北京: 中国环境科学出版社, 2006.10

ISBN 7-80209-351-1

I. 非… II. ①郝… ②程… ③杨… III. 非点源
污染-模型 IV. X501

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 074196 号

责任编辑 高速进
责任校对 刘凤霞
封面设计 龙文视觉

出版发行 中国环境科学出版社
(100062 北京崇文区广渠门内大街 16 号)
网 址: <http://www.cesp.cn>
联系电话: 010-67112765 (总编室)
发行热线: 010-67125803

印 刷 北京东海印刷有限公司
经 销 各地新华书店
版 次 2006 年 10 月第一版
印 次 2006 年 10 月第一次印刷
开 本 787×1092 1/16
印 张 29
字 数 659 千字
定 价 128.00 元

【版权所有。未经许可请勿翻印、转载, 侵权必究】

如有缺页、破损、倒装等印装质量问题, 请寄回本社更换

本书由国家自然科学基金项目“黄河流域内蒙古农业灌区非点源污染机理研究”(40471127)与国家重点基础研究发展规划(973)项目“黄河流域水资源演化规律与可再生性维持机理”(G19990436)共同资助。

序 言

水资源是经济社会发展的重要支撑和保障。“十一五”期间是解决我国水资源问题的关键时期，党中央、国务院高度重视解决水资源问题，采取了一系列重大政策措施，保障了人民群众生命财产安全，促进了粮食稳定增产和农民持续增收，亦为生态和环境建设提供了有力保障。然而，我国的水资源形势依然严峻，水资源的紧缺与用水的浪费并存，水体污染日趋严重，已影响到国家的经济发展和人民的用水安全。

随着近年我国农业的发展，化肥和农药施用量逐渐上升，其过量使用而造成大量化肥和农药随降水或灌溉水进入水域，由此产生的非点源污染负荷所占的比重逐年增加，对水体水质产生了严重影响。已有研究表明，许多水域的非点源污染负荷已超过点源污染负荷，在一些流域非点源污染已成为水体污染的主要来源；非点源污染的严重危害已经在我国很多城市和地区显现出来，限制了社会经济的进一步发展。因此，控制非点源污染已经到了刻不容缓的地步。

《非点源污染模型——理论方法与应用》一书是作者在近十年的研究工作基础上，借鉴和吸收当前非点源污染研究的最新成果，归纳总结而成的一部高水平专著。作者自 20 世纪 90 年代末首次将 RS 和 GIS 技术应用到北京官厅水库非点源污染的机理与改善技术的研究中，从流域水文过程出发，结合 RS 和 GIS 技术，开展了非点源污染负荷分布式模拟的探索性开发与应用研究，继而在黄河流域的洛河流域、黑河流域及其上游地区进行了典型流域的案例研究，为进一步完善和丰富非点源污染负荷的分布式模拟积累了大量的经验，同时也获得了可贵的第一手资料。典型案例的研究不仅丰富了我国非点源污染模型的理论方法，解决了资料匮乏地区非点源污染研究的难点，亦为开展全国范围内的非点源污染研究奠定了坚实的基础。

该书全面介绍了基于分布式概念的 SWAT 模型的原理，较为详细地阐述了其应用途径，系统分析了影响非点源污染模拟的敏感性因子，提供了农业灌

区、河流源区、畜牧业区以及典型小流域的应用研究案例，在非点源污染模拟、机理分析和实际调查等方面提供了具有较高参考价值的研究方法。该书的另一突出特点是借鉴统计性经验模型和机理型过程模型的优势，结合我国在非点源污染调查工作中的实际，以满足规划层次需求为目的，建立了基于非点源污染产生、迁移转化机制的大尺度非点源污染负荷估算方法体系；首次匡算出我国长江、黄河、淮河、海河、松花江、太湖、珠江等流域的非点源污染负荷，获取了全国范围内非点源污染负荷总量、空间及时间分布、污染物类型比率等关键参数；在全国非点源污染研究方面做出了开创性的工作，初步掌握了全国非点源污染的现状，为经济、快速、有效地开展大尺度非点源污染负荷调查提供了一套实用而有效的方法。

总之，非点源污染是我国水资源管理中面临的重要问题，在建设“节水型社会”、落实科学发展观、构建人与自然和谐关系的过程中，应高度重视非点源污染的防治。《非点源污染模型——理论方法与应用》一书正是面向上述国家战略需求、立足于水资源与水环境科学发展前沿而撰写的一本具有一定理论深度和实用价值的学术力作。



2006年10月16日

前 言

非点源污染亦称面源污染 (Non-point Source Pollution), 它是指溶解性或固体污染物在大面积降水和径流冲刷作用下, 汇入受纳水体而引起的水体污染, 其主要来源包括水土流失、农业化学品过量施用、城市污水、畜禽养殖和农业与农村废弃物等。非点源污染造成大量泥沙、氮磷营养物、有毒有害物质进入江河、湖库, 引起水体悬浮物浓度升高、有毒有害物质含量增加, 溶解氧减少, 水体出现富营养化和酸化趋势, 不仅直接破坏水生生物的生存环境, 导致水生生态系统失衡, 而且还影响人类的生产和生活, 威胁人体健康。因此, 在点源控制技术相对成熟之后, 对控制非点源污染技术和措施的研究, 成为当前面临的主要环境问题。

由于非点源污染的随机性、污染物排放及污染途径的不确定性, 负荷的时空差异大, 范围可小到实验室内的模拟, 大到全球范围的土壤圈层, 从而决定了对其进行监测、模拟与控制是很困难的。非点源污染往往与流域水文过程具有不可分割的关系, 在进行非点源污染的量化研究以及影响评价和污染治理时, 最为有效和直接的研究方法是建立模拟模型, 进行时间和空间序列上的模拟。数学模型方法不仅可以模拟各类非点源污染负荷的形成和迁移转化, 还可作为非点源污染控制和管理的定量化提供有效的技术手段。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, 帮助分析非点源污染产生的时间和空间特征, 识别其主要来源和迁移路径, 预测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、不同的管理与技术措施等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, 因此, 对非点源污染模型进行研究具有十分重要的意义。

20 世纪 70 年代以来, 国内外学者针对非点源污染估算开发了大量的数学模型, 对非点源污染负荷的估算已从简单的经验负荷估算模型发展到机理模型, 从对农田集水区的估算扩大到对大流域的估算。目前的非点源污染模型主要分为两大类: 一类是统计型经验模型; 另一类是机理型过程模型。统计型经验模型通过典型样区的监测实验提取数据, 在水质参数、水文参数和景观参数间建立经验关系式, 此类模型多以“黑箱”研究方法为主导, 应用简单。机理

型过程模型综合了水文模型、土壤侵蚀模型和污染物迁移转化模型，形成相对完整的系统模型，能够定量描述非点源污染发生的连续过程，此类模型以“白箱”研究方法为主导，模型应用的优势是计算时间序列性强、空间分布特征清晰。SWAT 模型就是机理型模型中最具有代表性，也是使用最为广泛的一类模型。本书以 SWAT 模型为对象，通过介绍 SWAT 模型的原理、使用以及实际应用案例，系统全面地展示机理型模型在非点源污染研究中的应用。

上述各种非点源污染负荷计算模型在过去三十多年实践中得到了广泛应用，并推动了非点源污染负荷计算方法的发展，但针对地理特征迥异及水文过程复杂的区域，其非点源污染产生、迁移和转化过程的不确定性明显，加之基础数据有限等原因，现有的非点源污染负荷计算模型很难满足大尺度非点源污染负荷估算的需求。为此，本书在充分借鉴统计型经验模型和机理型过程模型优势的基础上，结合我国在非点源污染调查工作中的实际情况，以满足宏观规划需求为目的，建立了全国非点源污染分区分级体系，构建了大尺度非点源污染匡算模型，完成了反映非点源污染产生、迁移转化机理的大尺度非点源污染负荷估算方法体系。

本书由郝芳华、程红光、杨胜天撰写；张建云、雷阿林、熊文、雷少平、毛学文、张建永、罗晓勇、张雪松、任希岩、杨桂莲、陈利群、步青松、郑玲芳、岳勇、欧阳威等做了大量研究工作，完成了部分章节的撰写；刘昌明、杨志峰、朱党生、李原园、郦建强、赵卫民、刘九玉、史晓新、黄火键、吴险峰、李道峰等为本书的完成提供了帮助；韩国义、齐晔、张利田为书稿的撰写提出了宝贵意见，使本书得以顺利完成；张敏霞、李鹏、王雪蕾、郑小康、付永硕、赵成、王晓、姚华萍、张嘉勋、周丽娜、曾阿妍、师旭颖、孙雯、张璇、盛浩然、李茜、温志群、王丹等同学为本书的校对工作付出了辛勤劳动。在项目研究和书稿的撰写过程中，得到国家水利部、水利部水利水电规划设计总院、黄河水利委员会、长江水利委员会等部门的大力支持。同时，本书的出版得到了国家自然科学基金委员会和国家科技部的资助。

本书的撰写还得到了美国农业部农业科学研究院（USDA-ARS）和美国得克萨斯农业工程大学（Texas A & M University）的大力协助，作者特别感谢 Raghavan Srinivasan 教授、Jeff Arnold 教授和 Charles Allan Jone 教授对我们的帮助和支持。

全书从非点源污染模型的科学性和实用性角度，在总结我们已经完成的非点源污染研究工作基础上，阐述了非点源污染机理模型和大尺度非点源污染模型的理论、方法和应用，供广大生态与环境保护工作者借鉴和批评。

目 录

第一篇 非点源污染机理模型

第一章 非点源污染研究概述	3
1.1 非点源污染特点与类型	4
1.1.1 非点源污染特征	4
1.1.2 非点源污染分类	5
1.2 研究进展	6
1.2.1 产汇流研究	7
1.2.2 土壤侵蚀研究	9
1.2.3 非点源污染模拟研究	10
1.3 非点源污染负荷计算模型	15
1.3.1 农田非点源污染模型	15
1.3.2 城市非点源污染模型	17
1.3.3 流域非点源污染模型	18
1.4 存在问题与趋势	21
1.4.1 存在问题	21
1.4.2 研究趋势	23
第二章 SWAT 模型	24
2.1 SWAT 模型概述	24
2.1.1 SWAT 模型开发	24
2.1.2 SWAT 模型特点	25
2.1.3 空间决策支持系统——AVSWAT	26
2.1.4 SWAT 模型应用及局限	27
2.2 SWAT 模型原理	28
2.2.1 产汇流模型	28
2.2.2 土壤侵蚀模型	36
2.2.3 污染负荷模型	39
2.2.4 流域非点源污染模拟	42

第三章	SWAT 模拟关键技术	62
3.1	影响因素	62
3.1.1	DEM 分辨率	63
3.1.2	降雨空间分布不均匀性	63
3.1.3	亚流域划分	64
3.2	数据准备	64
3.2.1	研究区概况	64
3.2.2	数据库构建	66
3.3	DEM 分辨率	72
3.3.1	敏感性分析	72
3.3.2	影响分析	75
3.4	降雨空间分布不均匀性	78
3.4.1	研究方法	78
3.4.2	降雨空间分布不均匀性指标	79
3.4.3	不均性影响分析	80
3.5	亚流域划分	83
3.5.1	亚流域划分方法	84
3.5.2	合理的亚流域划分	85
3.6	其他影响因素	93
3.6.1	土壤可利用水量	93
3.6.2	土壤蒸发补偿系数	93
3.6.3	作物管理因子	94
3.6.4	浅层地下水再蒸发系数	94
3.6.5	径流曲线数	95
3.6.6	平均坡度与平均坡长	95
3.6.7	参数敏感性分析	96
3.7	参数率定与验证	97
3.7.1	径流量	98
3.7.2	泥沙负荷	102
3.7.3	氮负荷	104
3.7.4	磷负荷	105
3.7.5	参数确定	105
3.8	情景分析技术	106
3.8.1	情景设计与分析	106
3.8.2	不同控制措施影响分析	118
第四章	SWAT 应用案例——库区	121
4.1	官厅水库流域现状	121
4.1.1	自然概况	121

4.1.2	农业种植概况	125
4.1.3	典型小区非点源污染现状	125
4.2	官厅水库流域非点源污染数据库	126
4.2.1	空间数据库	126
4.2.2	属性数据库	129
4.3	官厅水库流域非点源污染模拟与验证	133
4.3.1	流域划分	133
4.3.2	水文响应单元	136
4.3.3	气象输入文件	139
4.3.4	水库输入数据	139
4.3.5	农业管理模拟	141
4.3.6	典型水文年计算	142
4.3.7	SWAT 模型校准与验证	143
4.4	官厅水库流域非点源污染负荷计算结果	148
4.4.1	污染负荷空间分布	148
4.4.2	水系非点源污染负荷	148
4.4.3	县区非点源污染负荷	152
4.4.4	典型水文年非点源污染负荷	158
第五章	SWAT 应用案例——牧区	160
5.1	黑河流域牧区发展现状	160
5.1.1	若尔盖县概况	160
5.1.2	红原县概况	161
5.2	黑河流域非点源污染数据库	162
5.2.1	属性数据库	162
5.2.2	空间数据库	164
5.3	黑河流域牧区氮磷污染负荷模拟计算	169
5.3.1	污染源调查	169
5.3.2	氮磷污染负荷评价方法	170
5.3.3	模型校正	170
5.3.4	氮磷污染负荷计算	177
5.3.5	氮磷污染现状评价	180
5.4	黑河流域不同畜牧政策情景分析	181
5.4.1	不同载畜量	181
5.4.2	坡度与降水的影响	192
5.4.3	污染负荷入河量研究	194
5.4.4	畜牧场空间变异研究	196

第六章 SWAT 应用案例——小流域	200
6.1 洛河流域概况	200
6.1.1 自然地理	201
6.1.2 社会经济	203
6.2 洛河流域非点源污染数据库	204
6.2.1 土地利用	204
6.2.2 土壤数据	206
6.2.3 DEM 数据	209
6.2.4 气象资料	209
6.2.5 农业管理	211
6.2.6 水文特征	211
6.2.7 亚流域	213
6.2.8 水文响应单元	214
6.3 洛河流域非点源污染负荷计算	214
6.3.1 模型参数率定与验证	214
6.3.2 模拟结果分析	223
6.3.3 不同控制措施效果分析	231
6.4 洛河流域 COD 非点源污染负荷计算	235
6.4.1 平均浓度法模型	236
6.4.2 数据输入与参数	237
6.4.3 模拟结果	239

第二篇 大尺度非点源污染模型

第七章 非点源污染分区分级体系	245
7.1 分区分级方法与体系	245
7.1.1 分区分级原则	245
7.1.2 分区分级方法与标准	246
7.1.3 分区分级编码方法	249
7.1.4 分区分级体系	250
7.2 非点源污染一级与二级分区特征	252
7.2.1 松花江区	252
7.2.2 辽河区	253
7.2.3 西北诸河区	255
7.2.4 海河区	256
7.2.5 黄河区	258
7.2.6 淮河区	260
7.2.7 东南诸河区	261
7.2.8 珠江区	263
7.2.9 长江区	264

7.2.10	西南诸河区	266
7.3	非点源污染三级分区特征	268
7.3.1	东北温带多水区	268
7.3.2	华北暖温带平水区	269
7.3.3	秦巴山地北亚热带多水区	271
7.3.4	东南亚热带、热带多水区	272
7.3.5	西南亚热带多水区	273
7.3.6	滇西亚热带、热带多水区	275
7.3.7	西北暖温带、温带少水区	276
7.3.8	西北暖温带、温带干枯区	277
7.3.9	青藏高寒少水区	277
第八章	大尺度非点源污染负荷匡算原理	279
8.1	大尺度非点源污染模型构建	279
8.1.1	匡算原理	279
8.1.2	溶解态污染负荷计算方法	281
8.1.3	吸附态污染负荷计算方法	285
8.2	非点源污染物入河系数计算模型	287
8.2.1	污染物入河过程	287
8.2.2	坡面汇流过程	288
8.2.3	河网汇流过程	288
8.2.4	入河系数计算方法	289
8.2.5	入河系数计算	291
8.3	非点源污染匡算数据库	296
第九章	非点源污染调查	298
9.1	非点源污染调查方法	298
9.1.1	统计调查方法	298
9.1.2	抽样调查方法	299
9.1.3	遥感调查方法	303
9.1.4	调查步骤	308
9.2	农村居民点污染调查	309
9.2.1	调查方案	309
9.2.2	调查技术表	310
9.2.3	调查表填报	314
9.3	农业径流污染调查	315
9.3.1	调查方案	315
9.3.2	调查技术表	316
9.3.3	调查表填报说明	324

9.4	畜禽养殖污染调查	326
9.4.1	调查方案	326
9.4.2	调查技术表	327
9.4.3	调查表填报	328
9.5	城市径流污染调查	329
9.5.1	调查方案	329
9.5.2	调查技术表	329
9.5.3	调查表填报	330
9.6	土壤侵蚀调查	331
9.7	非点源污染调查空间特征	332
第十章	大尺度非点源污染模型验证	334
10.1	泥沙模拟验证	334
10.1.1	空间分布验证	334
10.1.2	实测数据	334
10.2	污染负荷模拟验证	335
10.2.1	三级区验证	335
10.2.2	调查验证	337
10.2.3	实测验证	338
10.2.4	对比验证	341
第十一章	大尺度非点源污染负荷匡算及控制对策	343
11.1	全国非点源污染负荷匡算	343
11.1.1	全国非点源污染负荷产生量与入河量	343
11.1.2	一级分区非点源污染产生量与入河量	345
11.2	全国一级分区非点源污染状况	347
11.2.1	松花江区	347
11.2.2	辽河区	355
11.2.3	海河区	364
11.2.4	黄河区	373
11.2.5	淮河区	382
11.2.6	东南诸河区	392
11.2.7	珠江区	401
11.2.8	长江区	410
11.2.9	西南诸河区	418
11.2.10	西北诸河区	425
11.3	非点源污染控制对策与建议	431
11.3.1	松花江区	431
11.3.2	辽河区	432

11.3.3 海河区 433

11.3.4 黄河区 433

11.3.5 淮河区 434

11.3.6 东南诸河区 435

11.3.7 珠江区 436

11.3.8 长江区 437

11.3.9 西南诸河区 438

11.3.10 西北诸河区 438

参考文献 440

第一篇

非点源污染机理模型

流域非点源污染主要来自于土壤侵蚀、农药与化肥施用、农村家畜粪便及垃圾、农田污水灌溉、城镇地表径流、林区地表径流和大气干湿沉降等。非点源污染模拟模型的主要目的是评价泥沙和营养物质等对地表和地下水体水环境质量的影响。模型中既有基于经验和统计建立起来的黑箱模型,也有包含了污染物输移转化物理和化学过程的机理型模型。黑箱模型一般比较简单,只需要一个方程,利用代表性区域的水质和地貌参数之间的关系,从而构建方程,估计非点源污染负荷的年平均值。但黑箱模型移植性很差,一个流域内所建立的模型,很难用于其他地方。机理型模型则基于对非点源污染产生和迁移转化过程的分析,通过对非点源污染物输出的三个重要环节——降雨径流、水土流失和污染物迁移进行模拟,并构建流域模型,进行时间和空间上的模拟。因此,机理型模型通常比较复杂,模型中考虑到了非点源污染过程中各个因子的空间异质性。随着分布式水文模型的逐渐成熟,机理型模型取得了很大的进展。

非点源污染的产生一方面取决于地表污染物质的数量及赋存特征,另一方面受到降雨径流过程的影响,因此非点源污染同水文过程密不可分。机理型模型是建立在因果关系上的水资源系统近似模拟,例如通过模拟和分析地形、土壤、土地利用/植被覆盖、降雨和人类活动情况估计污染物输出量。为解决水环境空间上的差异性,一个流域通常被分成很多属性相对单一的子流域,通过对于流域进行有机集总来对整个流域进行综合评价。

通常,机理型模型主要由三部分组成:径流模拟,这是非点源污染的基础;泥沙模拟,主要反映迁移机理;最后模拟污染物与径流和泥沙的关系(朱党生、王超、程晓冰,2001)。模拟主要分为陆地过程和河道演算两个阶段进行。陆地过程的模拟主要应用坡面模型,包括三个方面的模型:降水径流模型,水土流失模型和非点源污染水质模型;在河道演算阶段,主要应用河道水动力模型、河网输沙模型和河道水质模型。

由于机理型模型需要输入大量参数,而在编辑输入文件过程中要花费大量的时间,因而使模型的应用受到了限制。将模型和GIS整合可以明显缩减处理时间,提高模型运行效率。GIS提供了表达地表空间特征的能力,可以为模型提供快捷的数据输入和空间模拟能力。利用RS和GIS技术获取流域内高程、水文、坡向、土地利用、土壤类型、植被类型、覆盖率等数据,并与流域气象、水质等监测数据结合。SWAT模型就是其中最具有代表性也是使用最为广泛的一类模型。本书的第一篇以SWAT模型为对象,通过介绍SWAT模型的原理(第三章)、SWAT模型的使用(第四章)以及SWAT模型的一些具体应用案例(第五章至第八章),系统全面地展示机理型模型在非点源污染研究中的应用。