



非点源污染过程机理 与控制管理

——以北京密云水库流域为例

王晓燕 著



科学出版社

非点源污染过程机理与控制管理

——以北京密云水库流域为例

王晓燕 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是关于北京市地表水源地——密云水库流域非点源污染研究的总结。全书共分 10 章,重点是不同空间尺度下流域农业非点源污染的过程特征及控制管理。本书全面、系统、综合地反映了当前国内非点源研究的最新进展和发展趋势。

本书可供从事地理科学、环境科学、水文学、水土保持、生态学、流域管理等专业的教学、科研人员使用,也可作为高等学校相关专业的教材或教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

非点源污染过程机理与控制管理:以北京密云水库流域为例 / 王晓燕著. —北京:科学出版社, 2011

ISBN 978-7-03-031214-3

I. ①非… II. ①王… III. ①农业环境 - 非点源污染 - 污染控制 - 研究 - 密云县 IV. ①X322.214

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 100248 号

责任编辑:朱 丽 唐保军/责任校对:刘亚琦
责任印制:钱玉芬/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>

双 青 印 刷 厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011 年 6 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2011 年 6 月第一次印刷 印张: 21 3/4

印数: 1—1 200 字数: 495 000

定价: 98.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

Preface

I congratulate Professor Xiaoyan Wang for this excellent treatise on the effect of nonpoint/diffuse pollution and its mitigation in watersheds providing potable water. Professor Wang provides a breath of knowledge on the inputs and mitigation of diffuse sources of pollution in the watershed and contributes to the understanding and development of integrated water quality management in such complicated water systems.

The main focus of the book is the watershed of the Miyun Reservoir. This water body is unique and has great importance for providing potable water to the Beijing capital region and two other regions located in a relatively dry part of China. Originally, Beijing received potable water from groundwater and three reservoirs (Myiun, Guanting and Huairou). However, because of the serious water quality problems in two watersheds and diminishing recharge of the groundwater aquifer, Miyun Reservoir, built fifty years ago, is the main source of potable water for the capital city, providing about 75% of its tap water needs. The Miyun reservoir is one of the largest man-made impoundment in Asia with an original water holding capacity of 4 billion m³; however, because of great demand on water by the capital region and extended drought period, the current stored water volume is much smaller. In an average year the inflow in the reservoir is about 400 to 800 million m³ but during the drought years of late 1990s the annual inflow was reduced to less than 100 million m³ while the reservoir supplies 600 million m³ in a year. The situation with water availability may improve after finishing the South to North transfer of water from the Yangtze River, at much greater cost and energy expenditures for transferring water for thousands of kilometers. The Miyun Reservoir water quality is better than that to be delivered to the capital region from the rivers more than thousand kilometers away.

The reservoir and its watershed is a very complex system with competing and conflicting uses. On one side of the issue are the Beijing and Tianjin megalopoli in need of water and on the other side are the people living in the watershed in their communities, relying on water from the tributaries for irrigation of their fields and their water supply. Until recently iron ore surface mining activities were conducted in the watershed without practicing pollution and erosion prevention. While the water quality in the reservoir is still relatively good, it is threatened by pollution inputs, both point from the communities and diffuse from agricultural operations, abandoned mines, land use changes and fishery operations. Also many new dams and reservoirs were built on the tributaries providing water for irrigation and some industries that, since the 1960s, reduced significantly the average inflow into the Miyun Reservoir.

The book focuses on nonpoint/diffuse pollution, which represents the major input of

pollutants to the reservoir, specifically nutrients (nitrogen and phosphorus) and toxic compounds. Nutrients, as the name implies, nourish the primary productivity of organic matter in every water body; however, when the inputs become excessive, severe problems related to excessive and harmful algal blooms may ensue, as it happened in many impoundments throughout the world, including some in China. Nitrogen and phosphorus are brought into tributaries both from point and nonpoint sources but lately, nonpoint sources have become dominant, which is the case of the Miyun Reservoir. The main source of nutrients are agricultural and urban runoff carrying both nitrogen and phosphorus and, to a lesser degree, groundwater contaminated by nitrates. Main sources of toxic compounds could be abandoned mines and also traffic.

There is an urgent need to study the problem of the nonpoint pollution loads, understand what their sources are, define hazardous lands and land use practices, and develop and implement a hierarchical solutions for prevention, attenuation, and mitigation of this type of pollution that would become a part of an integrated regional plan to keep the water quality in the Miyun Reservoir good and healthy. However, this book is not limited to one water body and one watershed, no matter how important they are. Being one of the first treatises on nonpoint pollution published in China by a Chinese scientist¹, this book covers the latest state of the art and fundamentals of the nonpoint pollution generation, transport from the source to the receiving water bodies and NP abatement. It focuses on agricultural sources, both crop growing and animal breeding, but the same principles can be applied to other sources of nonpoint pollution such as orchards and forestry activities, land use changes (including construction), and modeling source emissions, transport and attenuation. This information is indispensable for planners and government officials to define (redefine) protective zones and permit or restrict activities within these zones. The more we know about nonpoint pollution the better we can delineate the zones and the activities and link them to the assimilative capacity of the landscape and the water body itself. An entire chapter is devoted to phosphorus which is the limiting nutrient for determining the loading (assimilative) capacity to prevent eutrophication and even eliminate the risk of hyper-eutrophication characterized by Cyanobacteria harmful algal blooms (Cyano-HABs) that would be devastating to the reservoir ecology and water supply because these microorganisms produce harmful toxins, bad taste, clog filters, cause anoxia and severely damage fishery in the reservoir. Other chapters define and explain nutrient cycles in the watershed generally and specifically in the Miyun Reservoir as well as models that describe them.

Of note is the chapter on economic policies and tools for combating agricultural pollution. Nonpoint pollution is not only a technological problem, it is more a problem of the way people

1 A book by V. Novotny and G. Chesters with a title *Handbook of Nonpoint Pollution: Sources and Management* was translated into Chinese and published in 1989 in China. See also C.Q. Yin (2009) *Urban Diffuse Pollution Control: Principle and Technologies* add Chinese title and Publisher

use the land, grow the crops and extract resources. The society on both sides of the issue, people drinking and using water from the reservoir and the people in the watershed using the land, must be fully involved and change the ways water is used (water conservation and reuse) and land is managed, and assess and reduce the use of chemicals on the land and in households and industries. This chapter describes the important change from the top down economic command policies before the economic reforms in China in the 1980s to the modern and efficient win-win economic incentives, taxation, and pollution rights trading that have proven successful in the US and western European countries. Implementing such policies requires education of the public and government officials and development of successful and acceptable local and regional policy mechanisms. Research on “willingness to pay” for abatement and pollution reduction by village people and agro-businesses that would also be economically beneficial to them, such as reduction of fertilizer application rates by erosion control practices and safe storage of manure, is very important as well as knowing the parameters that affect it, so they can be improved by education and incentives.

Finally, the book describes the technologies for reducing nonpoint pollution loads known in worldwide literature as “best management practices” or BMPs. It is a known fact that rarely one BMP would suffice to control nonpoint pollution loads; generally researchers and planners must develop a “train” of BMPs that would do the job starting with on site emissions, and continuing to improve attenuating the pollutant loads during the transport from the source area to the receiving water body and developing barriers to the transport. This may lead to the concept of the entire “ecoregion” where judicious application rates of fertilizers, landscape and land uses, barriers to pollution flow and proper selection of BMPs keep the loads below the safe assimilation limits and the water body healthy and sustainable.

The book by Professor Xiaoyan Wang is a great contribution towards this worldwide sustainability goal. Professor Wang has been involved in the nonpoint pollution research for many years and is known internationally for her research work, publishing, and leadership as a Chinese representative on the governing board of the Specialist Group for Diffuse Pollution and Eutrophication of the International Water Association (IWA). I am pleased to have worked with her and other Chinese experts for many years in IWA and also as visiting professor at her university.



Boston, Massachusetts, USA

前言

当前,非点源污染已成为国际水环境研究的热点之一。非点源也已成为我国湖泊、水库富营养化的主要污染源。由于我国的水污染控制重点仍放在点源上,对于非点源污染的研究尚处在起步阶段。非点源污染机理及其控制管理的研究,对我国水环境状况的改善具有重要的指导意义。本书是作者十多年研究成果的积累。书中内容在学术上紧跟国际相关领域的前沿进展,以大量实地监测获取的原始资料为论据,在非点源污染的过程机理、非点源污染控制的经济管理措施体系以及最佳管理措施成本效益评价方法等方面取得了新认识。相关研究得到了北京市科学技术新星计划、北京市科技项目、国家自然科学基金、中德国际合作项目国家重大水专项的资助。

本书共分 10 章,总结了作者围绕北京市地表水源地——密云水库流域非点源污染的研究成果,以长期实测数据为基础,从流域景观格局出发,研究不同空间尺度下流域农业非点源污染的特征及其变化规律;对非点源污染模型的应用进行了比较研究;运用物质流方法,对流域氮磷物质在不同系统的输入输出以及在系统内的代谢特征进行分析,把握污染特征与区域经济社会发展结构的关联;在总量控制的背景之下,构建非点源污染控制管理的经济措施体系,并从环境经济学角度,探讨流域最佳管理措施的设计以及最佳管理措施的效果评价和应用前景;通过对村民环境意识调查与公众参与途径研究,对流域最优开发和管理模式进行了可达性分析。

全书由王晓燕负责统稿和定稿,王秀英、欧洋、李明涛、李雨芯、于洋、张质明、张玥等博士、硕士研究生参与了部分章节的整理工作。感谢本人所指导的研究生们这些年来完成的与本书相关课题的研究工作。国际知名学者、美国东北大学终身教授 Vladimir Novotny 先生特为本书撰写了序言,并对中国非点源污染研究给予了积极评价,在此对他表示衷心感谢。感谢科学出版社朱丽编辑在本书出版过程中付出的辛勤努力。

作者殷切期望本书得到广大读者的关注和指正。

王晓燕

2011 年 3 月于北京

目 录

Preface

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 非点源污染概述	1
1.1.1 相关概念	1
1.1.2 基本特征	1
1.1.3 影响因素	2
1.2 国外非点源污染研究进展	3
1.2.1 概述	3
1.2.2 模型应用研究	4
1.2.3 污染控制技术措施	5
1.2.4 污染控制管理政策	6
1.3 我国农业非点源污染研究现状	9
1.3.1 农业非点源污染的影响	9
1.3.2 我国农业非点源污染的成因和特征类型	11
1.3.3 研究进展	16
1.3.4 管理中存在的问题	17
参考文献	18
第 2 章 研究区概况	22
2.1 密云水库流域概况	22
2.1.1 自然特征	22
2.1.2 社会经济特征	26
2.1.3 水环境特征	27
2.2 典型流域概况	32
2.2.1 石匣小流域概况	32
2.2.2 径流试验小区概况	33
参考文献	35
第 3 章 流域非点源污染类型特征及风险评估	36
3.1 污染特征与负荷估算	36
3.1.1 畜禽养殖	36
3.1.2 农田种植	39
3.1.3 农村生活	45
3.1.4 林草地	60
3.2 非点源污染风险评估	63
3.2.1 畜禽养殖污染的风险评价	63
3.2.2 土壤养分流失风险	69
3.2.3 流域非点源污染风险识别	74

参考文献	80
第4章 坡面径流小区磷流失规律	83
4.1 土壤磷素和水体非点源污染	83
4.1.1 土壤磷素的存在和转化	83
4.1.2 土壤磷素累积现状及对水体污染的贡献	84
4.1.3 相关研究进展	87
4.2 坡地土壤侵蚀的起动过程	89
4.2.1 坡面土壤机械组成的变化	90
4.2.2 迁移泥沙的机械组成变化	94
4.2.3 坡面产沙机械组成变化的影响因素	94
4.2.4 小结	99
4.3 坡地土壤磷素的迁移特征	99
4.3.1 研究方法	100
4.3.2 降雨对磷流失的影响	100
4.3.3 不同土地利用方式对磷流失的影响	102
4.3.4 植被覆盖对磷流失的影响	105
4.3.5 坡度对磷流失的影响	106
4.3.6 土壤特性对磷流失的影响	108
4.3.7 径流过程中磷流失量	110
4.3.8 小结	111
参考文献	112
第5章 流域景观特征与非点源污染	116
5.1 引言	116
5.1.1 景观组成对河流环境的影响	116
5.1.2 景观空间格局对河流生态系统的影响	119
5.2 密云水库上游流域地表水质的时空变化特征	120
5.2.1 研究方法	120
5.2.2 氮、磷流失的空间变异特征	122
5.2.3 氮、磷污染物的流失形态	126
5.2.4 氮、磷流失的时空变异	127
5.2.5 迁移过程中氮、磷浓度变化	129
5.2.6 小结	130
5.3 密云水库上游流域景观特征	130
5.3.1 DEM来源与精度	130
5.3.2 流域河网的生成	131
5.3.3 子流域的划分	133
5.3.4 流域景观信息获取	134
5.4 密云水库上游流域景观与氮污染关系	136
5.4.1 景观因子的主成分分析	136
5.4.2 流域景观特征对氮污染的影响	139
参考文献	139

第 6 章 基于 GIS 的流域非点源污染模拟	143
6.1 基于 GIS 和经验模型的流域非点源污染模拟	143
6.1.1 石匣小流域基础数据	144
6.1.2 经验模型	144
6.1.3 污染负荷空间分布与特征分析	150
6.1.4 小结	151
6.2 基于机理模型的流域非点源污染模拟	152
6.2.1 潮白河流域非点源污染数据库	152
6.2.2 SWAT 模型在密云水库流域的应用	158
6.2.3 HSPF 模型在潮河流域的应用	178
6.3 影响模型模拟效率的关键问题	193
6.3.1 研究区概况	194
6.3.2 研究方法	195
6.3.3 CSA 取值对 AnnAGNPS 模型模拟的影响	195
6.3.4 DEM 分辨率对 AnnAGNPS 模型模拟的影响	197
6.3.5 小结	199
6.4 非点源污染模型比较	200
6.4.1 流域非点源模型结构及其算法	200
6.4.2 非点源模型的应用效果分析	202
6.4.3 小结	206
参考文献	206
第 7 章 流域养分循环	211
7.1 氮素循环特征	212
7.1.1 氮素循环	212
7.1.2 流域中氮输入	213
7.1.3 流域中氮输出	214
7.2 磷素循环特征	217
7.2.1 磷素循环	217
7.2.2 流域中磷的迁移转化	217
7.3 养分循环的研究方法	219
7.3.1 养分平衡模型	219
7.3.2 物质流分析	224
7.4 基于物质流分析的密云水库上游流域磷循环特征	226
7.4.1 研究区域概况	226
7.4.2 流域磷循环框架的建立	226
7.4.3 流域磷循环分析	235
参考文献	244
第 8 章 农业非点源污染控制管理的经济政策体系	248
8.1 经济政策目标的确立	248
8.2 经济政策的设计原则和标准	248
8.2.1 基本原则	249

8.2.2 设计标准	250
8.3 控制农业非点源污染的经济政策体系的构成	250
8.3.1 控制农业非点源污染的税费政策	250
8.3.2 控制农业非点源污染的补贴政策	263
8.3.3 排污权交易	267
8.4 潮河流域农业非点源污染控制的经济政策初探	278
8.4.1 研究区非点源污染特征	278
8.4.2 流域农业非点源污染控制的经济政策建议	279
8.4.3 经济手段运用的可行性	281
参考文献	284
第 9 章 最佳管理措施及其成本效益分析	287
9.1 概述	287
9.1.1 非工程性最佳管理措施	287
9.1.2 工程性最佳管理措施	290
9.2 非点源污染控制措施效果的预测评价	293
9.2.1 非点源污染控制措施的选择	293
9.2.2 非点源污染负荷估算方法	295
9.2.3 非点源污染损失价值估算	299
9.2.4 流域非点源污染控制措施的效果预测及价值估算	301
9.2.5 小结	306
9.3 非点源污染控制措施的经济评价与优选	307
9.3.1 经济评价方法	307
9.3.2 费用、效益统计	309
9.3.3 敏感性分析	311
9.3.4 污染控制措施经济分析与评价	311
9.3.5 流域非点源污染控制方案比较	317
参考文献	319
第 10 章 公众环境意识与参与途径	321
10.1 村民环境意识调查	321
10.1.1 调查问卷设计与数据处理方法	321
10.1.2 村民社会经济情况统计	321
10.1.3 环境意识调查	322
10.1.4 社会经济变量对环境意识的影响分析	325
10.2 村民环境保护支付意愿调查	326
10.2.1 环境保护支付意愿金额	326
10.2.2 支付意愿的影响因素分析	327
10.2.3 支付意愿的地域差异分析	329
10.3 公众参与途径	332
10.3.1 环境保护宣传教育	333
10.3.2 环境友好的生活方式	333
10.3.3 经济激励手段	334
参考文献	334

第1章 绪 论

1.1 非点源污染概述

1.1.1 相关概念

随着人类经济活动的不断加剧，水环境污染已成为全球性问题。传统上按污染的发生类型，把水环境污染源分成点源(point source)和非点源(nonpoint source)。点源是指工业废水以及城市生活污水等集中、固定的排污口。过去点源一直被认为是造成水污染的主要原因。在投入大量人力、物力治理工业和生活污水后，发现单纯控制点源污染，仍然不能避免水体污染，因为除了点源之外，还有量大面广的非点源存在。随着点源污染的进一步治理，非点源污染的严重性进一步凸显出来，成为目前大部分地区水环境污染的主要原因。

非点源污染(nonpoint source pollution, NPS)又称为面源污染，指溶解或固体污染物从非特定的地点，在降水和径流冲刷作用下，通过径流过程而汇入受纳水体(如河流、湖泊、水库、海湾等)，引起的水体污染(Line et al., 1998)。美国清洁水法修正案将非点源污染定义为：污染物以广域的、分散的、微量的形式进入地表及地下水体。也就是说，不是通过固定的排污管道和排污口造成的水环境污染，就是非点源污染。

根据非点源发生区域、发生过程及发生源不同，可以将非点源污染分为城市、农田、畜禽养殖、林业、矿山等多种类型的非点源污染。在不同地区，起主导作用的非点源污染类型不同。比如，城市范围内城区地表径流、建筑工地、高速公路等是主要的污染源，而在矿山集中地区，矿区污染会占主导地位。相对而言，农业非点源污染是目前最主要的非点源污染类型。

1.1.2 基本特征

一般认为非点源污染有以下特点：

(1) 污染主要发生在与气象事件密切相关的间歇时段，以扩散方式进入水体，即污染物的来源和排放点不固定，排放具有间歇性，发生具有随机性。因为非点源污染主要受水文循环过程(主要为降雨及降雨形成径流过程)的影响和支配，而降雨径流具有随机性，所以由此产生的非点源污染必然具有随机性。

(2) 非点源污染物在进入地表水或下渗到地下水之前，主要产生在广阔的土地上并在地面迁移。

(3) 非点源污染很难或者几乎不可能在其起源处监测。与点源相比，非点源污染的监测更为困难、复杂和昂贵。过程监测是在地面进行而不是水中，无法用排放标准进行限制。

(4) 非点源污染的范围与不可控的气候事件和地质地理条件相关,污染负荷的时间变化(降雨径流过程、年内不同季节及年际间)和空间(不同地点)变化幅度大。

(5) 非点源的治理集中在土地和径流管理措施,而不是污水处理。

(6) 非点源污染物可能是由大气污染物沉降或输送形成的。受关注的主要污染物为泥沙、营养物、有毒物质等。

(7) 点源的最严重危害发生在枯水期,而非点源却发生在暴雨之后。

由于非点源污染形成过程受区域地理条件、气候条件、土壤条件、土壤结构、土地利用方式、植被覆盖和降水过程等多种因素的影响,故具有随机性大、分布范围广、形成机理模糊、潜伏性强、滞后发生和管理控制难度大的特点(王晓燕, 2003)。

1.1.3 影响因素

流域的水循环过程是流域非点源污染的载体和驱动力,随着人类活动的逐渐加剧,比如,森林砍伐导致水土流失严重;农田肥料过量及不合理施用致使农田养分大量流失;畜禽养殖规模逐渐增多,但缺少相应的废弃物处理措施,导致大量畜禽粪便未经任何处理直接进入水体;农村及城镇人口增加,生活污水随意排放。许多流域非点源污染表现越来越明显。非点源污染是一个复杂的过程,它的发生过程及发生量受气象、土地利用、土壤地形地貌等众多因素的影响(林青慧, 2007)。

1.1.3.1 气象水文

污染物主要靠地表径流运输和转移,降水量的大小及时空分布对地表径流影响很大。一般年降水量越大,地表径流及水土流失就越严重。另外,降水持续时间越长,地表径流及水土流失就越严重。实际上,降水强度对水土流失起到决定性作用,并与营养物流失量正相关。暴雨次数越多、频率越高,洪水面积越广,污染物产生总数量和污染范围就越大。

1.1.3.2 土地利用

土地利用方式一方面取决于一些重要的自然与社会经济因素,如气候、水文、土壤等;另一方面又反过来影响诸如化学物质输入输出、径流、植被类型、耕作方式等。因此,这些与土地利用方式相关联的因子共同决定了非点源污染的差异;不适当的土地利用方式、管理模式会导致土壤侵蚀和过量氮、磷随地表径流流失,形成非点源污染。

1.1.3.3 地形土壤

地形地貌和土壤主要通过降水和地表径流影响非点源污染。地形有坡长和坡度两方面,水土流失随坡度的增加而增大,但存在径流退化现象。

土壤类型、结构、物理和化学性质都会影响地表径流量和污染物迁移,从而对农业非点源污染产生影响。例如,透水性强的砂土就比其他土壤类型难以产生地表径流,但可使可溶性污染物渗入地下水层。土壤质地影响土壤肥力,保肥性能强的土壤能够较多地固定营养元素,因而可以减少化肥径流流失量。

1.1.3.4 植被覆盖

植被对降水有截持作用,可以改变降水性质和土壤表层结构,缓和雨水对土壤冲击力,从而减少农田非点源污染。研究表明:植被覆盖可以有效减少径流中悬浮物质含量,并且,森林覆盖率高的流域水质明显优于覆盖率低的流域。对于农田生态系统而言,当植被覆盖度较大时,对水土和养分流失有一定的遏制作用。森林植被和土壤系统联合作用,将大量地表快速径流转化为慢速径流,从而减少土壤侵蚀,降低固体悬浮物产生量。植被还可以吸收慢速径流中大量营养物质,减轻水体营养物的负荷量。

1.1.3.5 社会经济及其他因素

一定程度上,所有污染影响因素都与社会经济有关。经济水平决定人的生产生活方式,影响土地利用方式、农业生产方式及管理水平、农村庭院养殖集中程度和规模、居民环境保护意识等。影响农业非点源污染的主要社会经济因素有人口、生活方式、用水习惯、粪便及废水的处理排放方式、耕作制度、畜禽养殖状况、肥料施用等。

1.2 国外非点源污染研究进展

1.2.1 概述

美国是世界上少数几个较早对点源和非点源污染进行全国性系统研究控制的国家之一。本节主要介绍美国非点源污染的研究进展。

农田土壤侵蚀、水土流失是人类很早以前就认识到的问题。美国对非点源污染与暴雨事件关系的研究始于1930年。20世纪70年代,美国颁布了清洁水法案(clean water act, CWA),要求评价非点源污染对水质的影响。这期间,美国和加拿大对整个大湖地区进行了点源和非点源污染的调查研究,分析不同土地利用方式与农业非点源污染之间的内在关系,并根据土地利用或径流量与非点源污染负荷的相关关系,建立起了简单的经验统计模型,主要是计算污染负荷量。在非点源污染特征、影响因素、单场暴雨和长期平均污染负荷输出等方面,提出了基于土地利用的输出系数模型,在理论和方法上均已取得长足进步。70年代末期,为了满足水质规划的目的,开始使用数学模型进行定量评价农业污染水质现状,并对生产条件的改变对水质的影响程度进行预测。非点源污染研究有了很大发展,由相关因素分析和时空分异的研究转向与非点源污染控制密切相关的主控因子和关键区域的空间分析,对截留、填洼、下渗等降雨-径流及污染物迁移转化等过程进行数学模型研究。

20世纪80年代,非点源污染研究地域范围扩大、类型增多,污染物迁移机理研究更加深入。在非点源污染的负荷计算,控制措施效果评价,营养元素在土壤、地表的迁移规律研究和非点源的管理、政策制订方面,提出了一些非点源污染扩散与负荷的模型,如农业管理系统中的化学污染物径流负荷和流失模型(CREAM)、用于农业非点源管理和政策制订的农业非点源污染模型(AGNPS)、农田尺度的水侵蚀预测预报模型(WEPP)、流域

非点源污染模拟模型(ANSWERS)等。

20 世纪 90 年代,非点源污染的研究更加活跃。计算机技术和卫星遥感技术的发展为非点源污染研究提供了崭新的数据获取方式。通过卫星图片解译,可获取土壤、植被、地形地貌、土地利用方式及水质的数字化信息,具有便捷、量大、可视性强、便于与地理信息系统(GIS)结合等优点。地理信息系统分层处理数据的功能极大地方便了非点源污染的模拟、预测和管理决策。以陆地卫星数据库、航空摄影、GIS 和陆地资源信息系统为代表的 3S 技术(遥感 RS、全球定位系统 GPS、地理信息系统 GIS)与非点源污染模型结合广泛用于非点源污染预测、管理措施改变对农业非点源污染的影响评价。细菌、病毒等微生物、毒性污染物,尤其是大气中挥发性有机物(VOCs),成为受到关注的新的非点源污染物;海岸带、地下水的反补给也被列为地表水源的重要非点源,探讨不同种类、来源、迁移转化机制的污染物对地表、地下水体的影响,建立了相关的污染物模型。与非点源污染负荷估算相关的流域开发方向、非点源污染管理模型和非点源污染风险评价成为此时期应用模型研究的最新突破点(王晓燕,2003)。

1.2.2 模型应用研究

在进行非点源污染的量化研究以及影响评价时,最有效和直接的方法是建立模型,进行时间和空间序列上的模拟。数学模型不仅可以模拟各类非点源污染的形成、迁移转化,还可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,为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、估算非点源污染产生的负荷及其对水体的影响提供帮助,并可以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。具体研究内容包括以下几点。

1.2.2.1 确定关键区域与重点控制区域

由于非点源污染的分散性,流域的所有区域对非点源污染的贡献率也不尽相同,因此,确定污染的关键区域或重点控制区十分重要。目前国内外已经进行了很多相关研究(Sharpley,1995;王飞儿等,2003;张淑荣等,2003;Ou yang and Wang,2008)。

1.2.2.2 非点源污染管理措施的选择

对非点源进行大面积的监测需要大量的人力、物力,而利用模型模拟的定量化方法具有费用低、评价周期短、简便易行等优点,因而被广泛用于不同管理措施的长期效果评价中,其中应用最多的有 ANSWERS 模型、AGNPS 模型、AnnAGNPS 模型和 SWAT 模型等。国外非点源污染模型与大型分布式模型结合进行流域最佳管理措施的制订是一个新的研究热点。比如美国科学家 Srivastava 等(2002)运用 AnnAGNPS 与 BMPs 相结合对美国 USDA 的试验流域(Mahantango Creek, 725 hm²)非点源污染情况进行了分析,并且结合最佳管理措施的原则,对研究区域中不同的管理措施进行了对比分析,给出了符合不同要求的流域最佳管理措施。

土地利用方式改变后对环境会产生很大的影响,非点源模型能够为这种措施提供定

量化的依据。通过改变土地利用方式参数得出不同的结果,从而可以比较不同方案的控制效果,选取最佳方案(Mohammed et al., 2004; 洪华生等, 2005; 刘瑞民等, 2006; 庞靖鹏, 2010)。

1.2.2.3 流域非点源污染控制规划的决策支持

根据研究流域特征,结合流域经济布局,设计不同的水土流失及非点源污染控制情景方案,并对各种设计情景方案进行模拟和分析,逐渐成为模型在水土流失及非点源污染模拟过程中新的研究方向,关于这方面国内外许多学者进行了一些探索性研究(León et al., 2000; 黄金良等, 2004)。基于 GIS 和模型的流域设定情景模拟分析不仅可以更好地探讨流域水土流失及非点源污染的影响特征、影响因素及各因素的影响程度,同时可以为流域水土流失及农业非点源污染控制规划提供科学的决策支持(林青慧, 2007)。

1.2.2.4 模型适宜性及不确定性

近十余年来,无论是简单的经验模型,还是复杂的机理模型,都被广泛地用于非点源污染的模拟。由于非点源污染行为过程和流域生态过程的复杂性,模型仅能利用参数变量对其进行简单表达,这导致了模型的不确定性。这是目前模型应用中的热点和难点。

1.2.3 污染控制技术措施

最佳管理措施(best management practices, BMPs),是防治或减少农业非点源污染最有效和最实际的措施。美国农业部水土保持局把 BMPs 定义为:“任何能够减少或预防水资源污染的方法、措施或操作程序,包括工程、非工程措施的操作和维护程序。”因其高效、经济、符合生态学原则,在非点源污染控制中日益受到重视,目前在全世界得到广泛运用。

非点源的管理措施可以分为源头减少控制措施和控制迁移路径管理措施。源头控制措施是从源头上控制污染物的来源,通过减少污染物的种类和数量来控制;控制迁移路径管理措施是通过控制污染物迁移转化的路径来控制使得进入水体污染物的数量大大减少来保护水资源。源头控制措施有保护性耕作、街道地表清除污染物、条状种植、保护性作物轮作、营养物管理、肥料储存设置、综合有害物质管理、植被草路等;通过控制迁移路径的管理措施包括人工湿地、河边缓冲带、过滤条带等。

根据 BMPs 原则和实际情况,因地制宜,以一项或几项技术为主,多项技术有机结合,通过管理手段来统筹全局,对非点源污染控制成效显著。国内外的学者进行了大量的研究,表明 BMPs 确实能够有效地控制农业非点源污染。而我国在农田非点源污染对地表水环境的影响研究方面基础薄弱,在控制管理研究方面基本上处于空白状态(仓恒瑾, 2005)。目前农业非点源污染的研究日益被重视,现在有许多研究方法和治理措施,但是目前的措施主要是针对非点源污染本身制订的,这些措施是否具有可行性、付出的经济代价又将如何,却很少在农业非点源污染的研究过程中得到考虑。2005 年,法国、芬兰、澳大利亚、意大利、挪威等国家的几十位科学家共同提出了 AgriBMPWater 工程,即为减轻农业非点源污染,制订环境友好的农业措施,对已经存在的或模拟的 BMP 措施

进行比较分析。它从环境效应, 经济效应和社会、农民或土地拥有者的可接受程度等 3 个方面综合评价农业非点源污染管理措施。利用 AgriBMPWater 方法对法国西部的 Don 流域进行了示范性研究。主要采取的措施有: 减少氮素化肥用量、减少有机肥用量、配方施肥、肥料使用纳税政策、减肥津贴政策等, 并对各项农业非点源污染措施及不同措施的组合进行了系统的分析, 并从环境、经济以及措施在当地的可接受程度几个方面对各种农业非点源污染管理措施进行了综合评价(Turpin et al., 2005)。充分利用各种 BMPs 手段, 探寻不同 BMPs 措施的组合手段, 提高其对农业非点源污染的控制作用, 将非点源污染模型与 GIS、RS 等先进技术手段结合, 对 BMPs 在控制农业非点源污染中的应用效果和价值性进行模拟研究, 将是未来发展的方向。

1.2.4 污染控制管理政策

非点源污染由于随机性强、成因复杂、潜伏周期长, 因而防治十分困难。美国、欧洲等一些发达国家自 20 世纪 60 年代开始关注水体的非点源污染, 70 年代后随着点源污染治理水平的逐步提高, 人们开始从不同角度认识和研究非点源污染问题。近年来各国逐渐趋向于控制方法与管理政策的研究, 涉及环境经济、农业经济、水文学、环境化学等多学科。同时制订、颁布实施了有别于点源污染的非点源污染控制管理政策法规和行动计划, 在运用行政法律、经济、教育动员公众积极参与等手段进行非点源污染控制和管理方面取得了成效。

1.2.4.1 行政法律

法律是其他环境保护手段发挥作用的前提和基础, 只有在相应的法律保障之下, 其他手段才具有合法性和权威性, 才能强有力地得以实施。

1) 美国非点源污染控制与管理法规

美国是最早关注非点源污染治理的国家, 1972 年颁布的《水污染控制法修正案》首次将非点源污染纳入国家法规, 并提出了著名的“最大日负荷量(TMDL)计划”; 1977 年, 《水污染控制法》更名为《清洁水法》(CWA), 制订颁布了土地利用计划。1987 年美国国会通过了《清洁水法修正案》, 建立了控制非点源污染的国家计划。该计划中联邦政府首次对非点源污染控制进行资助。这些资金用于该计划的各项活动, 如计划的推行、立法或非立法活动、技术支持、财政支持、教育培训、技术转让、试点工程、监测和评价特殊的非点源污染控制工程的成功性。1996 年 5 月, 美国国家环境保护局(EPA)出台了修改的《非点源计划指南》, 该指南是 EPA 改革非点源计划所采取的一个重要步骤, 提供了未来非点源计划的框架, 旨在实现或维持水的有益作用。

《联邦水污染控制法》倡导以土地利用方式合理化为基础的“最佳管理措施”; 之后《安全饮用水法》及修正案、《海岸带管理法》及修正案、《食品安全法》、《总统水质动议法》、《联邦环境杀虫剂控制法规》、《洪水控制法》及修正案、《农业农村发展法案》、《露天采矿管理及开发法案》、《联邦土地政策及管理法案》等都有明确针对各类非点源污染的条款和规定。