

水资源保护

理论与实践

马永胜 刘东 王立坤 时秋月 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

水资源保护 理论与实践

马永胜 刘东 王立坤 时秋月 著



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书基于东北农业大学水环境课题组多年来研究工作,从水污染和水量两个方面探讨水环境非点源污染和水资源保护的理论知识。包括流域非点源污染预测预报模型、非点源污染生态治理方法、水资源时间序列变化规律和地下水恢复等内容。本书共分9章:第1章介绍水资源形势和存在的问题;第2章~第4章介绍流域水资源保护基础理论和非点源污染预测模型及应用实例;第5章为降水时间序列变化规律研究;第6章为流域水环境保护技术;第7章、第8章为地下水变化规律和地下水恢复方法;第9章为水资源保护管理对策和措施。

本书可供水利工程、水文水资源、环境水利、水土保持和流域管理科研人员及院校有关专业的教师、研究生和本科生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

水资源保护理论与实践 / 马永胜等著. —北京: 中国水利水电出版社, 2009

ISBN 978 - 7 - 5084 - 6144 - 1

I. 水… II. 马… III. 水资源-资源保护-研究 IV. TV213.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 035121 号

书 名	水资源保护理论与实践
作 者	马永胜 刘东 王立坤 时秋月 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www. waterpub. com. cn E-mail: sales@waterpub. com. cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市地矿印刷厂
规 格	184mm×260mm 16开本 12.75印张 302千字
版 次	2009年6月第1版 2009年6月第1次印刷
印 数	0001—1500册
定 价	42.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究



前言

水是生命存在的必要条件之一，由于地球上存在水，才孕育了地球上的生命；没有水，人类就无法生存，所以，保护水资源就是保护人类自己。

水资源是世界上分布最广，数量最大的资源。水覆盖着地球表面 70% 以上的面积，据统计地球表面的水总量达 15 亿 km^3 。其中，淡水资源只有 0.35 亿 km^3 ，在这有限的淡水资源中，仅有 0.34% 是人类可以利用的。地球上水资源的分布很不均匀，各地的降水量和径流量差异很大。全球约有 1/3 的陆地少雨干旱，而另一些地区在多雨季节易发生洪涝灾害。

我国是一个严重干旱缺水的国家。淡水资源总量为 28000 亿 m^3 ，占全球水资源的 6%，居世界第 4 位，但人均只有 2300 m^3 ，仅为世界平均水平的 1/4、美国的 1/5，在世界上名列 121 位，是全球 13 个人均水资源最贫乏的国家之一。扣除难以利用的洪水径流和散布在偏远地区的地下水资源后，我国现实可利用的淡水资源量则更少，仅为 11000 亿 m^3 左右，人均可利用水资源量约为 900 m^3 ，并且其分布极不均衡。到 20 世纪末，全国 600 多座城市中，已有 400 多个城市存在供水不足问题，其中比较严重的缺水城市达 110 个，全国城市缺水总量为 60 亿 m^3 。

我国水资源面临的形势严峻，存在的问题很多。不仅是水资源人均占有量很少，而且水资源的地区分布不均，水土资源组合不平衡；年内分配集中，年际变化大；连丰连枯年份比较突出。受气候和地形的影响，降水分布极不均衡，形成南涝北旱的局面。长江流域以南地区水资源占全国总量的 80% 以上，耕地面积只占全国总数的 1/3，由于水量大，降雨量集中，南方丰水地区经常发生洪涝灾

害；而北方地区干旱少雨，水资源占有量很少，耕地却占全国耕地的 60% 以上，旱灾已成为农牧业的主要灾害；在北方缺水地区，由于河道天然径流减少，引用水量增加，开发利用不尽合理，江河断流及平原地区河流枯萎已成为一个严重的水环境问题；这些特点造成了我国容易发生水旱灾害，水的供需产生矛盾，这也决定了我国对水资源的开发利用、江河整治的任务十分艰巨。

由于地表水资源贫乏和水污染加剧，一些地区对地下水进行掠夺式开发，地下水超采现象十分严重，以牺牲环境为代价维持工农业生产和人民生活的用水需求。据不完全统计，全国目前已形成地下水区域性降落漏斗 149 个，漏斗面积 15.8 万 km^2 ，其中严重超采面积 6.7 万 km^2 ，占超采区面积的 42.3%。多年平均超采地下水 67.8 亿 m^3 。

我国是世界上水土流失最严重的国家之一，全国水土流失面积 367 万 km^2 ，占国土面积的 38%，其中水力侵蚀面积 179 万 km^2 。每年流失土壤 50 多亿 t，严重影响土壤肥力。全国每年因水土流失新增荒漠化面积 2100 km^2 ，土地利用价值和承载能力降低。每年因水土流失而损失的耕地面积达 7 万多 hm^2 。

水污染是我国面临的最主要的水环境问题。据水利部对全国 700 余条河流约 10 万 km 河长开展的水资源质量评价结果：46.5% 的河长受到污染（相当于 IV 类、V 类）；10.6% 的河长严重污染（劣 V 类），水体已丧失使用价值。90% 以上的城市水域污染严重。从地区分布来看，支流水质一般劣于干流，干流下游水质一般劣于上游，城市工矿区河段水质最差。南方河流水质整体上优于北方河流，中西部地区水质整体上优于东部发达地区。在全国七大流域中，太湖、淮河、黄河流域均有 70% 以上的河段受到污染；海河、松辽流域污染也相当严重，污染河段占 60% 以上。全国有 1/4 的人口饮用不符合卫生标准的水。

随着人口的增长和经济社会的快速发展，水资源问题，尤其是水资源短缺、水环境恶化问题会越来越严重，与经济社会发展的矛盾已经充分暴露出来。全国平均每年因旱受灾的面积约 4 亿亩。正常年份全国灌区每年缺水 300 亿 m^3 ，城市缺水 60 亿 m^3 。在缺水的同时，还存在着严重的用水浪费，全国农业灌溉用水利用系数大多只有 0.4，而很多国家已达到 0.7~0.8；我国工业万元产值用水量为 103 m^3 ，是发达国家的 10~20 倍，水的重复利用率我国为 50% 左右，而发达国家为 85% 以上；全国年排放污水总量近 600 亿 m^3 ，其中大部分未经处理直接排入水域。在全国调查评价的 700 多条重要河流中，有近

50%的河段、90%以上的城市沿河水域遭到污染。水污染不仅破坏了生态环境,而且使水资源短缺问题更为严重。

几年来,本课题组结合科研课题针对松嫩平原和三江平原两地水资源存在的问题,在流域非点源污染预测预报模型、地下水动态运动规律、人工湿地污染治理等方面进行了研究。在松嫩平原重点研究半干旱区干旱缺水和节水灌溉问题,实验研究经济作物抗旱节水灌溉模式和建立旱情预报系统;利用GIS和AnnAGNPS模型分析方法,研究流域农业非点源污染预测预报问题,建立了双阳河流域非点源污染预报系统、初步评价大庆、肇东和安达等地区非点源污染状况和未来发展趋势;在三江平原重点研究了井灌区地下水水资源变化规律及地下水修复重建问题。利用GIS、SWAT模型研究地面水非点源污染,分析评价回灌地下水的可行性及对地下水污染的影响;应用随机水文学小波理论和现代数学分析方法对地下水动态变化规律进行了深入地研究。

基于课题组研究工作,本书从水污染和水量两个方面探讨水环境非点源污染和水资源保护的理论技术。收录了几年来部分研究成果,包括流域非点源污染预测预报模型、非点源污染生态治理方法、水资源时间序列变化规律和地下水恢复等内容。同时注意吸收国内外相关最新研究成果。将国内外先进的预测模型和非点源污染治理技术引进来,通过参数修正和改进,在本土上应用。本书共分9章:第1章介绍水资源形势和存在的问题;第2章~第4章介绍流域水资源保护基础理论和非点源污染预测模型及应用实例;第5章为降水时间序列变化规律研究;第6章为流域水环境保护技术;第7章、第8章为地下水变化规律和地下水恢复方法;第9章为水资源保护管理对策和措施。

本书是流域水环境研究室几年来研究工作的总结。全体师生均为撰写工作作出了贡献,本书由马永胜、刘东、王立坤、时秋月、侯为军、谭秀翠和朱伟峰共同编写。其中马永胜编写第1、第6章;刘东编写第5、第7、第8章;时秋月、王立坤、侯为军、朱伟峰编写第3、第4章;谭秀翠编写第2、第9章。在撰写过程中参考了大量文献资料,借鉴了国内外水资源和水环境专家发表的科研成果和先进经验;得到了东北农业大学水利与建筑学院师生的热情支持和帮助;承蒙付强教授承担了全书的审稿任务。在此,向他们深致谢意。

另外,本书的出版得到了省级重点学科“农业水土工程”,东北农业大学校级重点学科“环境水利”,黑龙江省科技计划项目(攻关)(GB06 B106—

2), 东北农业大学创新团队发展计划资助项目 (CXZ 009), 黑龙江省水利厅科研开发重点项目 (H SKY 2007—05) 联合资助。

由于笔者水平和科研试验条件所限, 本书不可避免地存在缺点、疏漏和不足, 诚恳地欢迎读者批评指正。

马永胜

2008 年 12 月于东北农业大学



目录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 流域非点源污染问题.....	1
1.2 非点源污染现状	3
1.3 国内外流域管理科学进展	5
1.4 非点源污染治理研究目的意义和研究内容	8
第 2 章 流域水资源保护基础理论	11
2.1 流域水文、水资源系统	11
2.2 非点源污染类型及组成	16
2.3 非点源污染的形成	17
2.4 非点源污染的迁移及转化	17
2.5 河流中污染物的运动规律	22
2.6 非点源污染的模拟	23
2.7 本章小结	33
第 3 章 流域非点源污染预测模型	35
3.1 河流污染模型（河流湖泊水质模型）	35
3.2 AnnAGNPS 模型.....	43
3.3 SWAT 模型	52
3.4 本章小结	59
第 4 章 模型应用实例	60
4.1 AnnAGNPS 应用实例——双阳河流域非点源污染预测	60
4.2 SWAT 模型应用实例——三江平原蛤蟆通河流域非点源污染预测	74
4.3 水质污染评价的物元模型	89
第 5 章 降水时间序列变化规律研究	94
5.1 小波消噪的时间序列模型在井灌区年降水预测中的应用	94

5.2	小波随机耦合模型在井灌区年降水预测中的应用	100
5.3	小波最近邻抽样回归耦合模型在井灌区年降水预测中的应用	105
5.4	八五三农场年降水预测模型对比分析	106
5.5	井灌区降水时间序列多时间尺度变化特征分析	107
5.6	本章小结	115
第 6 章	流域水环境保护技术	117
6.1	流域水土保持	117
6.2	流域综合治理	123
6.3	人工湿地污水处理系统	126
6.4	生物处理新技术	131
6.5	人工湿地污水处理系统设计	133
6.6	污染排放口人工湿地缓冲带	134
6.7	湿地修复措施与生态环境保护	137
6.8	地下水污染治理	139
6.9	污染防治工程方案的筛选	140
6.10	本章小结	141
第 7 章	三江平原井灌区地下水动态变化规律研究	142
7.1	时间序列模型在井灌区地下水动态变化预测中的应用	142
7.2	BP 神经网络模型在井灌区地下水动态变化预测中的应用	150
7.3	小波神经网络模型在井灌区地下水动态变化预测中的应用	154
7.4	小波随机耦合模型在井灌区地下水动态变化预测中的应用	158
7.5	小波最近邻抽样回归耦合模型在井灌区地下水动态变化预测中的应用	164
7.6	八五三农场地下水埋深预测模型对比分析	167
7.7	本章小结	167
第 8 章	三江平原井灌区地下水补给研究	168
8.1	地下水补给方法简介	168
8.2	三江平原井灌区地下水补给量匡算	170
8.3	基于改进 AHP 的三江平原井灌区最佳地下水人工补给方法研究	173
8.4	本章小结	180
第 9 章	水资源保护管理对策和措施	182
9.1	国内外水资源保护管理政策法规	182
9.2	水资源保护法规与管理措施	185
9.3	水污染治理及污水资源化	187
9.4	水资源保护管理决策支持系统	189
参考文献		193

第 1 章 绪 论

1.1 流域非点源污染问题

1.1.1 非点源污染概念

随着人们对点源污染控制的重视，点源污染已经得到较好的控制和管理，而非点源污染（non-point source pollution）逐渐成为或已成为影响水体质量的主要污染形式。它是与降水过程伴随进行的地表径流污染，指溶解的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）所引起的水体污染，一般也称之为面源污染。其污染物类型主要有泥沙、盐分、重金属和有机物。由于非点源污染起源于分散、多样的地区，其地理边界和位置难以识别和确定。按照美国联邦水污染控制法（1972）的解释，水环境非点源污染通常是在不确定的时间内，通过不确定的排放途径，向水系排放不确定量的污染物质。

非点源污染相对于点源而言，具有不同的污染的特征，具体的表现在以下几个方面：

（1）随机性。从非点源污染的起源和形成过程分析，非点源污染与区域的降水过程密切相关。无论是城市地表径流、矿区地表径流、还是土壤侵蚀，其规模和强度均与降水过程密切相关。此外，非点源污染的形成与其他许多因素，如土壤结构、农作物类型、气候、地质地貌等密切相关。由于降水的随机性和其他影响因子的不确定性，决定了非点源污染的形成具有较大的随机性。

（2）广泛性。非点源污染的污染源众多，分布范围广，污染途径多样。非点源污染涉及的范围不受行政边界及国界的限制，且无固定边界，其所产生的生态环境影响更是深远而广泛。目前，非点源污染问题已引起了全球的关注。

（3）滞后性。农田中农药和化肥施用造成的污染，在很大程度上与降雨和径流立即发生密切相关，同时也与农药和化肥的施用量有关。研究显示，当刚刚施用化肥后，若遇到降雨，造成的非点源污染将会十分严重。研究还显示，农药和化肥在农田存在的时间长短也将决定非点源污染形成的滞后性的长短。通常，一次农药或化肥的使用所造成的非点源污染将是长期的。

（4）模糊性。影响非点源污染的因子复杂多样，由于缺乏明确固定的污染源，在判断污染物的具体来源时存在一定的难度。以农业非点源污染为例，农药和化肥的施用是非点源污染的主要来源，但不同的农药施用量、在生长季节、农作物类型、使用方式、土壤性质和降水条件不同时，所导致的农药和养分的流失将会有巨大的差异，而不同因子之间又相互影响，因而使得非点源污染的形成机理具有较大的模糊性。

（5）潜伏性。以农药、化肥施用为例，使用之后，在无降水或灌溉时，形成的非点源污染十分微弱，在更多的情况下，农业非点源污染直接起因于降水和灌溉的时间。城市地表径流污染也有同样的特点，在无降水条件下，散落在城市空间的许多固体污染物、垃圾

对水体的危害十分有限，但在降水时，随着径流进入水体将会形成严重的非点源污染。城市中的垃圾或其他附着于建筑物表面的污染物均是潜在的非点源污染源。

(6) 空间相关性。非点源污染具有多维的空间特性，如污染物在土壤中及地下水中的分布就是一个三维空间 (x 、 y 、 z) 分布关系，如果要表示污染物质的迁移过程、对污染事件进行模拟或研究河流的环境容量，则还需要考虑时间变量，四维模型 (x 、 y 、 z 、 t) 就成为必要手段。

(7) 研究和控制难度大。由于非点源污染来源的复杂性、机理的模糊性和形成的潜伏性，在研究和控制非点源污染方面具有较大的难度。

1.1.2 非点源污染危害

1. 淤积水体

水土流失是指由水或风所引起的土地表面物质的移动。指在降雨、径流作用下水土剥离、迁移的自然现象，泥沙流经沟谷、河道，所含的化学物质必然进入各种水体，从而对水资源形成污染。水土流失发生范围大，对水资源的污染是一种非点源污染，有的学者称为水土流失型非点源污染。水土流失发生后，大部分被侵蚀掉的土壤在到达河流或其他水体以前沉积下来，但仍有一部分进入水体，造成水体淤积，重量较轻的颗粒悬浮在水中，增加水的浑浊度。黄河由于黄土高原强烈的水土流失，大量泥沙进入，平均含沙量高达 $37.60\text{kg}/\text{m}^3$ ，造成水质污染，使水质下降，清淤困难，成本增高，开发利用难度加大。

2. 引起水体的富营养化

水体富营养化通常是指湖泊、水库和海湾等封闭性或半封闭性的水体，以及某些滞流水体的氮、磷和碳等营养元素的富集，导致某些特征性藻类、绿藻等的异常增殖，使水体透明度下降，溶解度降低，水生生物随之大批死亡，水味变的腥臭难闻。

水体富营养化是困扰发达国家的水污染问题之一，也是发展中国家面临的现实环境问题。水体富营养化不仅使水体丧失应有的功能，而且使水生生态环境向着不利于人类的方向演变，最终势必影响经济建设和社会发展。

工矿业排放的废水和城镇居民的生活污水，是造成水体富营养化的主要原因。近年的研究已经证明，农业非点源污染物质的排放，亦是水质富营养化的主要原因之一。因此，目前世界上不少国家和地区已经把控制农业非点源污染作为水质管理的必要组成部分。

研究表明，对于湖泊、水库等封闭性水域，当水体内无机态总氮含量大于 $0.2\text{mg}/\text{L}$ ，磷酸态磷的浓度达到 $0.015\text{mg}/\text{L}$ 时，就有可能引起藻华现象的发生。从土壤学的观点来看， $0.2\text{mg}/\text{L}$ 的氮素和 $0.015\text{mg}/\text{L}$ 的磷素是微不足道的，可是在水生生态系统中，它却可能造成意想不到的灾难。

3. 污染饮用水源

农田中施用的化肥、农药及人畜粪便等，其中的有机物、无机养分及其他污染物经淋溶作用进入地下水或经地表径流进入饮用水源区，可造成饮用水源的污染，影响人体健康。据报道，饮用水中的亚硝酸盐可引起高铁血红蛋白症，亚硝基化合物具有明显的致癌、致突变、致畸的性质，尤其在缺乏维生素 C 之类的水域。我国湖泊富营养化现象十分严重，富营养化原因制剂时作用更明显。

4. 造成地下水污

造成地下水污染的原因比较复杂,但调查表明,农业生产活动是污染的主要原因之一。同时与生活污水及农业生产活动有密切的关系,主要是由于降雨径流携带的可溶性污染物下渗造成的。来自肥料和农药的氮、磷、钾及其化合物以及各种重金属元素,由于溶解度较低,活动性差,因此在土壤和非饱和带中逐渐积累,成为地下水的潜在威胁,而土壤中大量氮的淋失和下渗,使地下水中硝态氮含量严重超标。此外,灌区农药的大量使用也使其随水迁移到地下水的危险增大。关于 1992 年太湖地区 38% 水井硝态氮浓度超标的报道,农业非点源污染应该是主要原因。

非点源的危害日趋严重,造成的环境污染与城市的发展越来越不协调,开展非点源污染研究具有重大意义。

1.2 非点源污染现状

1.2.1 非点源污染负荷在水体污染负荷中的比例呈上升趋势

非点源已成为水环境的一大污染源或首要污染源。它自 20 世纪 70 年代被提出和证实以来,非点源污染对水体污染所占比重随着对点源污染的大力治理呈上升趋势,其中,农业非点源污染是非点源污染的重要组成部分。

据统计,美国的非点源污染量占污染总量的 2/3,其中农业的贡献率为 75% 左右,美国 60% 的水体污染起源于非点源。欧洲国家也得到了相似的结论,据统计,奥地利北部地区进入水环境的非点源氮量远比点源大,丹麦 270 条河流 94% 的氮负荷,52% 的磷负荷由非点源污染引起,日本的稻田是 Biswa 湖的最大污染源,荷兰农业非点源提供的总氮、总磷分别占水环境污染总量的 60% 和 40%~50%,德国一流域也因过量施用化肥导致河流中的磷浓度超过 0.2mg/L。

在我国河湖的非点源污染也很严重,北京密云水库、天津于桥水库、安徽巢湖、云南洱海、上海淀山湖等水域,非点源污染比例超过点源污染。例如,密云水库污染年总负荷量中,化学需氧量的 64%,五日生化需氧量的 61%,硝态氮的 85%、总氮的 66% 及总磷的 86% 来自于非点源污染;每年进入云南洱海的总氮约 989.1t、总磷 108.1t,其中非点源污染分别占 97.1% 和 92.5%,点源仅占 3% 和 7.5%;滇池在丰水年总氮的 50.4%,总磷的 57.9% 来自于非点源,平水年总氮的 37.7%,总磷的 45% 来自于非点源,枯水年总氮的 31.2%。总磷的 44.9% 来自于非点源污染。

1.2.2 非点源与地表水污染

非点源来源面广,它夹带着大量的泥沙、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、水体富营养化等,对农业生产、水资源、水生生物栖息地和流域水文特征均有着严重影响。对地表水环境而言,非点源的危害大致可归纳为以下两方面。

淤积水体,降低水体的生态功能。由于水土流失,大量泥沙进入水体,一方面河床、湖泊水面升高,降低了水体的容纳水量。另一方面由于径流携带的大量泥沙及其有害物质,将会对水体的水质产生严重的影响,破坏水生生物的生存环境。

引起水体的富营养化,破坏水生生物生存环境。由于过量施用化肥和农药,大量的氮

磷元素进入地表和地下水体，导致水体的富营养化，破坏水生生物的生存环境。

污染饮用水源，影响人体健康。USEPA 2000 年调查显示，全美农村 1% 公用供水井显示出硝态氮的存在，53% 的家庭用水井显示硝态氮的存在，2% 饮用水井的硝态氮含量超过安全用水标准规定的硝态氮含量。氮、磷等营养元素是污染河流和湖泊的 3 大污染物之一。由于家畜粪便中常常包含大量细菌，尤其含有大量的大肠杆菌，随着径流进入水体形成大面积的非点源污染，并会造成疾病的广泛传播。1994 年全美有 2000 多个海滩因水体细菌含量过高而关闭。

老百姓普遍了解非点源对于环境的危害却是从 1962 年莱切尔·卡逊出版了著名的《寂静的春天》一书开始的。就在这一时期，在农业径流中发现了磷，这是农业非点源污染水体的明显证据。非点源磷和点源生活污水都是造成湖泊、河流富营养化的根源。

20 世纪 70 年代初期，美国开展了对湖泊富营养化调查和重要水体的研究，如对加利福尼亚州的塔台湖和北部五大湖进行的研究。富营养化调查发现，在许多水体中有由土壤侵蚀和径流以及牲畜废水径流携带进来的非点源磷，在农业区一些河流和水井中发现有由地表径流和径流下渗携带的化肥和牲畜废物产生的很高的含氮量，在农业径流的沉积物中发现含有大量难以分解的氯化物农药，如 DDT、狄氏剂、艾氏剂等，这些沉积物对环境造成污染。通过这一系列调查研究，到 70 年代末，已经弄清了农业非点源沉积物和营养物（如化肥、牲畜废物、植物腐殖质等）造成地表水污染的原因和范围。80 年代初，美国环保局根据公众强烈关心地下水污染的情绪，发布了几份关于地下水污染情况的报告。并组织对全国饮水井进行氮和农药的调查测验，结果在 23 个州的农业区水井中至少检出了 17 种农药，2.4% 的农村私人井、1.2% 的农村社区井含氮量超过最大允许值 10mg/L。同时发现地下水的高含氮量有明显的季节性，集中在晚冬到早夏一段时间内，这正是粪肥集中施用期，表明粪肥是引起水体氮污染的主要根源。除了农业非点源污染外，还有城市非点源（如城市下水道污泥、淤泥沉积物、庭院废物、城市固体废弃物和食品加工的废物等）污染水体和环境。

在我国，湖泊、水塘及缓慢流速的河流所发生富营养化的主要原因是农业非点源的污染。五大淡水湖之一——巢湖，从 20 世纪 60 年代始至 80 年代，由于湖水的富营养化，导致湖内 100 多种水藻大量繁殖。巢湖目前主要受到氮、磷营养盐与有机物的污染，这些污染物质主要来自于沿湖城市大量工业废水和生活污水排入。另外，沿湖农田化肥和农药的使用量逐年增加，农业非点源污染对巢湖的污染量越来越大。巢湖沿湖四周均是农田，是安徽省的重要产粮区。近年来，农民施用化肥量平均每公顷 1200kg。比 10 年前增加 8 倍，因肥料结构和施肥方法不当造成化肥大量流失，成为巢湖水质总氮、总磷超标的重要原因。

我国第 3 大淡水湖——太湖，97% 面积的水体已经呈中富营养状态，富营养化使近几年大面积蓝藻爆发。1995 年 7 月，无锡梅园水厂蓝藻泛起，堵塞取水管，水厂被迫关停数日，1/5 的居民为此断水。据研究，进入太湖的污染物中，总氮排放量最多的是来自农业非点源污染，总磷排放量最多的是来自城镇居民，湖区农田水几乎直接进入太湖。沿太湖地区农业集约化程度高，以浙江省为例，全省平均施氮肥 1125kg/hm² 以上，嘉兴高达 1800kg/hm²。而浙江省农科院主持完成的“稻田中氮素淋失规律及其数量模拟研究”

课题,提出每季施氮素以 $150\text{kg}/\text{hm}^2$ 左右为宜。1994 年召开的江苏省环境科学学会也建议苏南太湖地区单季晚稻施氮不超过 $195\text{kg}/\text{hm}^2$ 为宜。过量施肥、施肥结构不合理(苏南太湖地区缺钾)、农田排水直接进入湖中等一系列因素,加剧了太湖富营养化。

1.2.3 非点源与地下水污染

农业肥料施入土壤后,不能被作物吸收和不能被土壤微粒吸附的部分随水往下淋溶,通过土层进入地下水,造成地下水污染。据张玉良估计,全世界施入土壤中的肥料大约 30%~50% 经土壤淋溶而进入地下水。在国外,影响地下水中硝态氮含量的因素主要来自农场牲畜粪便及大量施用氮肥。据世界资源报告,联邦德国每年耕地上多余的氮素增长了 10 倍,从 20 世纪 50 年代的 $10\text{kg}/\text{hm}^2$ 增至 80 年代的 $100\text{kg}/\text{hm}^2$ 。前捷克斯洛伐克东部,来自农场的肥料和动物粪便径流可能是地表水和地下水硝酸盐污染的主要原因。据估计,前捷克斯洛伐克东部河流中,80% 的地表水受动物粪便的污染。美国宾夕法尼亚州在 7.4km^2 的积水区内对 14 口井调查发现农田区地下水中硝酸盐、磷酸盐和氯化物浓度比林区地下水同类物质浓度高 5~7 倍。Hallerg 报道地下水中硝酸盐含量与当地施肥量平行,具有线性关系。其他研究者也有相同的结论。1992 年调查的我国 32 座国家级环境考核城市的地下水都有不同程度的污染,

污染指标以硬度、硝酸盐、亚硝酸盐、氨最为严重,生活污水和农业生产活动是污染的主要原因。关于 1992 年太湖地区 38% 水井硝态氮浓度的报道,农业非点源污染应该是主要原因。

氮肥一般以氨态氮、硝态氮和酰胺态氮形式输入土壤,氨态氮和酰胺态氮都必须首先转化为硝态氮才能被作物所吸收。而硝酸盐离子与土壤离子同带负电荷,不容易被土壤微粒吸附,所以氮肥淋溶以硝酸盐为主。硝酸盐一般不具有毒性,但是如果进入人体内还原成亚硝酸盐,可以引起高铁血红蛋白症,特别是 4 个月以内的婴儿反应非常敏感,国外称此病为“蓝婴症”。因为婴儿体内血红蛋白代谢功能还未充分形成,血红蛋白氧化所生成的正高铁血红蛋白不能被还原成血红蛋白,使血红蛋白输氧功能受阻。美国学者对 18 个集体单位进行了调查,发现饮水中高量硝酸盐与高血压发病率之间有联系。硝酸盐形成的亚硝基化合物具有明显的致癌、致突变、致畸的性质,尤其当缺乏维生素 C 之类制剂时。因此,地下水中硝酸盐含量一直备受关注。世界卫生组织制定的饮用水中硝酸盐含量标准为 $45\text{mg}/\text{L}$,硝态氮为 $10\text{mg}/\text{L}$ 。

1.3 国内外流域管理科学进展

1.3.1 国际发展水平

国外的农业非点源模型的发展经历了以下几个阶段。

第一阶段:20 世纪 60 年代末~70 年代初,非点源污染研究始于土地利用对于河流、湖泊水质产生影响的认识,仅是在非点源污染特征、影响因素、单场暴雨和长期负荷输出等方面的研究,其方法往往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,这类统计模型对数据的需求比较低,能够简便地计算出流域出口的污染负荷,表现了较强的实用性和准确性,因而在早期得到了较为广泛的应用。但是由于它们难以描述污染物迁移的

路径与机理,使得这类模型的进一步应用受到了较大的限制。

水土流失作为农业非点源污染发生的主要形式,在 70 年代以前就取得了长足的进展,定量计算方法已比较成熟,只是当时的研究角度不是从非点源污染问题出发的,当然这方面的研究成果为开展非点源污染研究打下了良好的基础。

这时期提出了 USLE 通用土壤侵蚀量方程,农药输移和径流模型 PTR 以及城市暴雨水管理模型 SWMM 等。其中 USLE 通用土壤侵蚀量方程,后来被广泛的应用于农业非点源污染模型中。

第二阶段:20 世纪 70 年代中期,随着对非点源污染较为深入的研究,对其迁移和转化机制有了初步的认识,影响因素和宏观特征性就由相关因素分析和空间分异分析转向与非点源污染控制密切相关的主控因子和源区(危险区)空间分析。有关非点源污染迁移和转化的研究也有了初步的进展。非点源污染模型开始以复杂的机理为基础,出现了一系列的机理模型和连续响应模型如农业化学品运输模型 ACTMO,城市地表径流模型 STOM (Storm Treatment Overflow Runoff Model),以及统一运输模型 UTM (Unite Transportation Model)等。这一发展主要是因为农业非点源污染是一个复杂的过程,是多个子过程的综合,水文学、土壤学等学科理论的引入,使农业非点源污染模型理论大大丰富。

从 20 世纪 70 年代初期到中期,非点源污染研究取得了两个方面的重要进展:一是从经验统计分析提高到复杂的机理模型;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。这些模型虽然经过了一些实测数据的检验并得到有限的应用,但它们往往对各种资源的要求很高,大多数模型只能适用于很小的集水面积,从而限制了这些模型的推广和应用。

第三阶段:20 世纪 70 年代后期至 80 年代以来,随着对非点源污染物理化学过程研究的深入和对非点源过程的广泛的监测,非点源污染模型向实用方向发展,其特点是与非点源污染控制措施密切联系,并注重效益分析。开发了含有经济评价和优化内容的非点源管理模型。有美国农业部开发的著名的农业管理系统中的化学污染物径流负荷和流失模型 CREAMS (Chemicals, Runoff, and Erosion from Agriculture Management System) 模型奠定了非点源模型的发展的“里程碑”,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。CREAMS 提出后,在此基础上发展出了一系列的结构类似的模型,如农田小区模型 EPIC (Erosion Productivity Impact Calculato),用于模拟农业活动对地下水影响的 GLEAMS (Groundwater Loading Effect of Agricultural Management System) 模型,用于农业非点源管理和政策制定的农业非点源污染源模型 AGNPS (Agriculture Non - point Source),农田尺度的水侵蚀预测模型 (WEPP),用于模拟大型流域非点源污染负荷的 SWRRB (Simulator for Water Resource in Rural Basins),Abbott 等开发了欧洲水文系统模型 SHE 均在这一时期提出。并应用于非点源污染的负荷定量计算、非点源的管理控制措施效果评价、政策制定。这些模型极大地丰富了机理性的非点源模型,并且得到了不同程度的应用。此外,传统的土壤流失方程 (USLE) 也经过改进形成 RUSLE。在 80 年代后期,重点加强“3S”技术在非点源污染模型中的应用,使得模型能与各种管理措施相结合,用于非点源的预测预报及不同管理措施改变对农业非点源污染的影响研究。“3S”技术的应用,不仅有助于获得模型所需要的参数,对污染的模拟结

果的可视化输出也有了质的改变。

值得提出的是 AGNPS 模型，它较为广泛的应用在非点源污染研究方面。

AGNPS 模型是由美国农业局和明尼苏达污染控制局于 20 世纪 80 年代共同开发的农业非点源计算机模型。它是一个基于事件分布参数模型，用于模拟流域土壤侵蚀、氮磷营养盐流失和预测评价农业非点源空间污染状况。

由于 AGNPS 模型是事件模型，在应用中有许多局限性，到 AGNPS 模型 5.0 版以后就停止了开发。美国农业部自然资源保护局和农业局联合开发了连续模拟模型 AGNPS98，目前的最新版本为 AGNPS2001。

第四阶段：20 世纪 90 年代至今，非点源模型主要是对现有模型的进一步完善，借鉴“3S”技术对传统模型进行改造，而且这一阶段模型研究进一步由纯数学问题转向一种系统决策工具、以帮助预测非点源污染的程度并对各种水域管理措施进行评价，同时，把传统的非点源污染与专家系统或各种人工智能工具相结合，开发非点源模型信息平台，为非点源污染研究和防治提供有利工具。如美国 Grunwald 对 AGNPS5.0 模型做了以下修改：用 Lutz 方法取代了 SCS—CN 曲线法，用具有水动力学理论的 Moor 算法取代了 USLE 方程中的 LS 因子，用基于网格的降雨输入取代了流域的均匀降雨等；Rode 等用具有物理含义的水文学模型 WaSi—ETH 取代了 AGNPS 中的 SCS—CN 等；AGNPS 由事件改进为模型 AGNPS98（连续）和目前的 AGNPS2001（连续），扩大了模型的使用范围；1991 年 WEPP 模型从坡面侵蚀模型扩展为流域的侵蚀模型，并使得模型的每一个过程都具有明确的物理意义；GRASS（Geographic Resource Analysis Support System）和美国 ISRI 公司开发的 arc/info 系统软件与 WEEP、AGNPS、USLE 结合进一步用于非点源污染危险区域识别、显示多种非点源输出结果、绘制水源防护范围和实际地表水监测网等众多方面，为消减和控制提供了前所未有的方便。一些功能强大的超大型流域模型也相继被开发出来。这些模型已经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、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保局 EPA 开发的 BASINS（Whittemore R C, 1998）、AGNPS2001 和 Arnold 等开发的 SWAT（Soil and Water Assessment Tool）等。

1.3.2 我国发展情况

计模型仍继续在农业非点源污染研究中占重要地位。李定强等分析了杨子坑小流域主要非点源污染物氮、磷随降雨径流过程的动态变化规律，建立了降雨—径流量、径流量—污染物负荷输出之间的数学统计模型，并用该模型对流域的非点源污染负荷总量进行了计算，得出了流域非点源污染物流失规律；贺宝根等建立了以修正 SCS—CN 法、径流单位线和径流过程与氮素流失浓度的关系为基础的农田降雨径流污染模型，在具备长系列降雨资料的条件下，该模型能计算了不同降雨量频率代表年份的农田氮素的流失量。

将农业非点源污染负荷模型与 3S 集成、与水质模型对接用于流域水质管理。成为新的生长点。我国非点源污染的机理模型研究成果不多，主要有李怀恩等用逆高斯分布瞬时单位线建立的暴雨径流污染负荷计算的响应函数模型，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，该模型适合于我国目前资料短缺的非点源污染研究现状，但不能解释非点源污染在流域内的空间分布，其推广性有待检验。此后李怀恩

又提出非点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，并建立了流域非点源污染模型系统：郑丙辉等建立的湖泊流域非点源污染负荷模型；张瑜芳等通过开展排水农田的室内和野外试验，建立了一维、二维土壤水及地下水中氮素转化、迁移和流失的数学模型等；刘凌等基于水量平衡和物质平衡，建立了预测地下水污染趋势的机理模型，利用模型能够预测地下水某种污染物组分浓度的变化趋势。

尽管出现了一些基于非点源污染发生机理的概念模型，但往往对模型的后续讨论较少，研究缺乏连续性。目前，我国模型化的研究尚属应用研究，模型多为直接利用国外现有模型或将其根据课题需要，结合研究区实际情况加以修正，但对模型的结构改进不大。

从总体上来看，我国非点源污染研究还处于对农业非点源的宏观特征与污染符合定量计算模型的初步研究阶段，已经建立的非点源模型大多是形式简单、功能单一的经验模型，尽管出现了一些基于非点源污染发生机理的概念模型。但往往对模型的后续讨论较少，研究缺乏连续性。

1.4 非点源污染治理研究目的意义和研究内容

1.4.1 研究目的意义

水是人类社会得以存在和发展的基础和命脉，联合国教科文组织公布（1998）近20年来世界饮用水源减少了50%，主要是指河流、湖泊、地下水的质量受到了严重的威胁。

据美国、日本等国家的报道，即使点源污染全面控制之后，江河的水质达标率仅为65%，湖泊的水质达标率为42%，海域水质达标率为78%。非点源污染控制不好，水体无法达标。非点源污染已上升为威胁引用水源的主要原因，因此，与水资源环境改善密切相关的非点源污染研究就显得更加重要。

如前所述，非点源污染主要起源于区域的水土流失、农田中农药和化肥的使用、农村家畜粪便和垃圾的堆放、城镇地表径流、矿区地表径流、林区地表径流和大气干湿沉降；在形成上，具有随机性大，模糊性强，分布广泛，一定的滞后性和潜在性强的特点；在管理和控制上，非点源污染涉及因素多、时间尺度长，比点源污染更为困难；这些都是非点源科学研究中无法回避的问题。中国具有广博的土地面积，自然生态条件复杂，非点源污染类型多样而又复杂，加上我国对非点源污染的研究起步较晚，在非点源污染的研究领域上尚有较多的工作要做，而非点源污染负荷定量化方法的研究及其水环境影响研究是进行非点源污染控制的重要理论基础。

1.4.2 研究的内容

分析土地利用方式与污染负荷之间的内在联系是国外非点源污染研究的基本出发点，目前对农业非点源污染的研究主要有野外实地监测、人工模拟降雨和非点源污染计算机模拟等方法。

非点源污染研究的关键是能否获取必要的基本数据（包括背景资料和降雨径流监测数据）。早期的研究工作中，大部分资料依赖于野外实地监测。但是，由于非点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，所以，基础数据收集工作的劳动强度大、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原因，