

# 非点源污染研究的进展与展望\*

郑 一, 王学军

(北京大学城市与环境学系, 北京 100871)

**摘要:** 简述了非点源污染的基本特征, 并从模型化研究、土地利用方式剖析、径流研究、新技术应用和管理等角度对国内外非点源污染的研究进展和存在的问题做了分析。展望了我国未来非点源污染的研究和控制。

**关键词:** 非点源污染; 研究; 进展; 展望

**中图分类号:** X 501      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1001-6791(2002)01-0105-06

非点源污染(nonpoint source pollution)的成因有水土流失、城市膨胀、农药化肥过量使用、废弃物堆放等, 土地利用方式不合理是关键。20世纪60年代发达国家开始关注非点源污染, 20世纪70年代起进行系统研究, 并付诸管理实践。在发展中国家, 相对于点源污染而言, 非点源污染仍未引起应有的重视。我国真正意义上的非点源污染研究始于北京城市径流污染的研究及20世纪80年代初的全国湖泊、水库富营养化调查和河流水质规划研究<sup>[1]</sup>。但国内非点源污染研究范围较窄, 管理实践进展也较为缓慢。

## 1 非点源污染的基本特征

美国清洁水法修正案<sup>[2]</sup>定义非点源污染为“污染物以广域的、分散的、微量的形式进入地表及地下水体”。与点源污染相比, 非点源污染的时空范围更广, 不确定性更大, 成分、过程更复杂, 因而加深相应的研究、治理和管理政策制定的难度。一般将非点源污染分为城市和农村非点源污染两大类。具体研究中常按土地利用方式或污染源特点进行细分<sup>[2,3]</sup>。

典型的非点源污染发生方式是降雨径流污染(即狭义非点源污染), 此外还包括废物堆放区的废液下渗和大气沉降等。非点源污染物发生后随地表和地下径流进行复杂的迁移和转化过程(沉降物还有经大气迁移的过程)。迁移方式因污染物类型而有所不同, 如湿地的非点源污染研究中发现<sup>[4]</sup>, 固体颗粒、磷和农药主要经地表径流进入湿地, 而氮主要经地下径流进入湿地。与污染物迁移过程相伴的是一系列的物理、化学和生物的转化过程, 这些过程均因污染物、自然环境和历时的差异而发生变化。

非点源污染物进入水体后对水质产生影响的机理与点源污染相似。将非点源与点源的影响加以量化区分则成为研究的重点和难点。据研究<sup>[2]</sup>, 20世纪70年代非点源污染对美国水体污染的贡献为: 总悬浮固体的92%, 总氮的79%, 总磷的53%, 大肠杆菌的98%; 20世纪80年代的数据为<sup>[5]</sup>BOD的57%, 总磷的87%, 总氮的58%, 总悬浮固体的98%。20世纪90年

\* 收稿日期: 2000-10-23; 修订日期: 2000-12-20

基金项目: 高等学校骨干教师资助计划资助

作者简介: 郑一(1978-), 男, 浙江宁波人, 北京大学城市与环境学系硕士研究生。主要从事水环境管理的研究。

代有研究<sup>[6]</sup>认为全球 30%~50% 的陆面受到非点源污染的影响。国内类似研究较少,仅在湖泊富营养化研究中有过少量估算。

## 2 非点源污染研究的进展

西方国家在点源污染得以控制的背景下关注非点源污染,研究工作从概念、理论、研究方法、管理手段乃至新技术应用逐步发展,相关文献众多,覆盖面广。我国相关研究起步较晚,往往局限于狭义的非点源污染的研究,所建立的模型则以负荷估算模型为主。纵观国内外,特别是西方国家的成果,可从以下几方面把握该领域研究的进展方向。

### 2.1 模型化研究

20 世纪 70 年代初,直接模拟非点源污染发生、发展及影响的数学模型就已出现。模型化研究也是我国非点源污染研究的主要形式,但研究多引用国外模型(或加以修正),少数也有创新尝试工作<sup>[7]</sup>。非点源污染模型形式多样,通常可分为功能性模型和机制性模型。前者不涉及污染的具体过程和机理,仅根据被研究系统的输入与输出进行构建;后者的建立则要以对某一过程或系统的内在机理的数学模拟为基础。

功能性模型多用于流域非点源污染物负荷量计算。通过典型样区的监测实验提取数据,在水质参数与水文(降雨、径流)参数、景观参数(如坡度、植被覆盖状况、农药施用率、土壤性质等)间建立经验关系式。我国在研究农业径流污染时,也常用此类模型<sup>[8]</sup>。功能性模型的特点有:不考虑中间过程或内在机制,为“黑箱”研究,其数据处理方法简便,但误差较大,适用于年均污染负荷量的计算,不适合短期计算。模型在与试验区自然、人为因素区别较大的区域较难外推使用。机制性模型远较功能性模型复杂,以非点源污染的发生、迁移转化和影响的具体过程为框架,通常包括产流、汇流、污染物转化和水质等子模型,模型包含的变量数较多,其特点为:考虑中间过程或内在机制,为“白箱”模型;模型形式复杂,对于数据量和数据精度的要求高;模型的外推受时、空的制约相对较少。实际研究中,由各子模型构成的非点源污染总模型往往兼有以上两种形式。

表 1 比较了国外几种常见的非点源污染模型。非点源污染模型其他的分类方式有:从模型

表 1 常见的非点源污染模型比较<sup>[4]</sup>

Table 1 Comparison of major nonpoint source pollution models

模型名	适用规模	研究重点	主要研究对象
DRASTIC	不限	地下水污染潜在可能性	氮
USLE	不限	水土流失及地表水水质	固体颗粒及其上附着的氮、磷营养盐
LEACHM	农田	水土流失的潜在可能性及地下水污染	杀虫剂
NLEAP	农田	硝酸盐流失潜在可能性的空间分布	硝酸盐
GWLF	流域	湖水水质	固体颗粒及其上附着的氮、磷营养盐
AGNPS	流域	河流水质	固体颗粒及其上附着的氮、磷营养盐
ANSWERS	流域	土壤侵蚀	固体颗粒
SLAMM	污水区	城市污染的潜在可能性	营养盐、固体颗粒、重金属

的数学特征出发,可分为随机模型和确定性模型;也可分成离散模型和连续模型,前者对区域(或过程)进行空间上(或时间上)的分割,而后者则视之为整体(或连续)加以模拟。实际工作中,各种模型在适用规模、复杂程度、数据要求、使用者意图等方面存在很大的差别。现有非点源污染模型的精度不高,尚待进一步研究和开发。

## 2.2 土地利用方式剖析

土地利用方式是影响非点源污染的关键性因素。土地利用方式取决于一些重要的自然与社会经济因素,如气候、水文、土壤、地貌、经济水平、产业结构、技术、教育水平等。另一方面,土地利用方式反过来影响诸如化学物质输入输出、径流、土壤、植被类型、地形地貌、耕作方式等因素。这些与土地利用方式相关联的“因”与“果”决定了不同土地利用方式所产生的非点源污染的巨大差异<sup>[9]</sup>,是建立非点源污染模型的重要参数。

剖析非点源污染与土地利用方式之间关系的常见的形式是区域(流域或城市区域)非点源污染可能性评价,又称非点源污染风险评价,研究框架为:收集研究区背景资料,进行现场实测,积累研究所需数据;筛选,选择与非点源污染关系最密切的因子作为量化目标;根据研究区大小、精度要求及资料条件将区域适度网格化,对每一网格的各个因子进行量化;引用或建立合适的非点源污染风险评价总模型;以各因子量化值为评价模型输入,输出即为非点源污染可能性的量化值。对各网格进行操作;用绘图软件做出污染可能性分布图,确定区域内的重点保护区,定性或定量识别不合理的土地利用方式,为管理提供依据。

此类研究中应注意:管理和未来土地利用方式这两个因子在研究中日益受到关注<sup>[10]</sup>;

风险评价总模型可以是简单的指数模型或秩模型,也可以是复杂的机制模型。前者常用于定性分区,后者常用于流域非点源污染总量估算<sup>[11]</sup>;各因子的量化同样需要有合适的模型支持,如水土流失因子可用USLE模型来量化;在流域的非点源污染研究中,可随机选取一定量的网格样本进行操作,而后进行插值,推算全流域的非点源污染状况。

## 2.3 径流研究

径流与非点源污染关系紧密,对径流的量化研究作为水文学的重要组成部分发展较早,理论及模型较成熟。因此,研究径流往往成为量化和模拟非点源污染的关键。研究中通常划分为城市降雨径流和农村(农田)径流两大类。由于后者发生在透水性地表,其研究更为复杂。

城市降雨径流无下渗等过程,非点源污染较易模拟,可利用现有水质模型进行白箱或灰箱研究。常用的水质模型有:城市污染模拟模型(UPSM),暴雨水管理模型(SWMM)及储存处理与漫流模型(STORM)等。一般考虑降雨对地表累积物的冲刷和污染物随径流输出两大过程,分别模拟和量化。模型的输入为地表累积物的数量、性质(如粒径)、降雨量、降雨强度等因子,输出为非点源污染物的浓度或流量。

农田径流研究是流域规模的非点源污染研究的主要部分,一般分产流、汇流和产污三个环节考虑,并与接纳水体的水质模型相接轨。通常利用三大过程的代表性参数(降雨量、径流量和污染物输出浓度)间所存在相关关系进行黑箱研究。具体的研究手段为小区试验与大区调查相结合:在流域内选取典型实验场,进行多次暴雨的降雨、径流、水质同步监测;用回归方法得到三者间的经验关系式;之后将经验式推广至全流域,用来求算流域次暴雨中污染物的输出浓度和单位面积负荷量,进而可求得流域某时段(如一年)污染物以非点源方式输出的总量;最后,应选取若干次降雨的数据与模型估计值比较来检验模型精度。

我国在上述两方面均进行过研究<sup>[12,13]</sup>。

## 2.4 新技术应用

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全新的手段。地理信息系统(GIS)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。利用GIS工具

可做出各影响因子以及非点源污染可能性的空间分布图，并能根据实际需要改变各数据层的内容和数据层的迭加方式以输出不同的图像，从而对不同条件下的污染状况进行识别和管理。国外在 20 世纪 80 年代就将 GIS 技术融入非点源污染的研究，对非点源污染可能性的空间分布进行图形化分析<sup>[5]</sup>。国内面向非点源污染的 GIS 应用较少。

非点源污染研究所需的数据传统上都是靠搜集现有资料或野外实测获得，卫星遥感技术的发展则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。遥感手段获取数据具有便捷、量大、可视性强、便于与 GIS 结合等优点，今后的努力方向则是提高数据的精确度，特别要研究如何通过遥感影像精确提取水环境信息。

### 2.5 管理的研究和实践

理论研究与管理实践的接轨是必然趋势。以美国为例，这种接轨体现在三个层面：技术层面上，主要是完善城市污水管道体系，建人工沉积塘，采用湿地处理以及水体生态修复工程等；经济层面上，学术界以量化非点源污染为基础，结合微观经济学方法展开费用效益分析，从而进行政策手段的设计和有效性评价<sup>[14]</sup>；政策层面上，美国国会结合研究进展，积极立法。1972 年联邦水污染控制法(FWPCA)首次明确提出控制非点源污染，倡导以土地利用方式合理化为基础的“最优管理实践”(BMPs)。1977 年的清洁水法(CWA)进一步强调非点源污染控制的重要性。1987 年的水质法案(WQA)则明确要求各州对非点源污染进行系统的识别和管理，并给予资金支持。国内对于非点源污染的认识尚处在起步阶段，缺乏相应的管理研究和实践。

## 3 国外研究的热点问题与国内相关研究的展望

### 3.1 海洋非点源污染的研究

随着海洋的战略地位提升和海洋环境问题的突出，近岸海水的非点源污染逐渐成为热点。目前主要关注沿岸农田径流中 N、P 营养盐的非点源污染机制及其对海水水质的影响。欧洲有研究<sup>[15,16]</sup>联用水质模型和 GIS 工具，围绕沿海的土地利用方式和区域自然条件进行非点源污染的研究。国内相关研究几乎为零。近年来，我国近海多次发生大规模赤潮，形成灾害，造成较大的经济损失，这反映了海水富营养化的严重性。而非点源污染正是水体富营养化的重要原因，故海洋非点源污染问题应当成为未来国内相关研究的增长点。

### 3.2 地下水非点源污染的风险评价

淡水资源的短缺使得地下水的重要性日益突出，国外有大量的研究进行地下水非点源污染的风险评价。如，联用 GIS 工具和 CLEAMS 模型评价进行区域地下水 NO<sub>3</sub> 盐的非点源污染，为保护地下水源提供决策支持<sup>[17]</sup>；讨论农牧业密集区的动物排泄物的非点源污染可能性<sup>[18]</sup>，等。我国高产农业区(如太湖地区)、牧业集中区和北方缺水城市的地下水污染问题相对突出，定量评价并防治地下水体的非点源污染对于我国的可持续发展至关重要，是摆在国内水环境研究者面前的崭新课题。

### 3.3 高速公路和城市路面的非点源污染

高速公路和城市路面是城市非点源污染的重要源地。由于是非透水性地表，径流污染的发生量大且污染的可控性较强，该领域集中了许多新的研究成果<sup>[19,20]</sup>。此类研究广泛讨论降雨量、车流量、降雨历时、雨前干燥期长度以及前次降雨的相关参数等对非点源污染发生量的影

响,从而寻求治理的有效方案。我国处于城市化的加速期,高速公路和城市路面面积正在迅速增加,结合中国国情开展此类研究具有非常现实的意义。

### 3.4 大气污染物的非点源污染

大气污染物沉降形成二次污染,作为非点源污染的一种,以前未引起充分重视。近年来,国外对大气中挥发性有机物(VOCs)形成的非点源污染进行研究<sup>[21]</sup>,探讨不同种类、来源、迁移转化机制的挥发性有机物对城市地表、地下水体的影响。此类工作偏重于大气和水环境化学的机理研究。中国北方重工业城市的大气污染问题由来已久,与此相关联的非点源污染问题现实存在,但未被重视和研究,应参考国外经验选取若干大气污染严重的城市进行此类研究。

### 3.5 非点源污染的量化管理

技术层面上,国外新近的研究偏重于治理手段定量化评价,从而获取优选方案。如,通过模拟试验评价人工湿地系统去除营养盐的效果<sup>[22]</sup>,并在此基础上进行环境—经济效益的综合量化评估,实现非点源污染治理的社会总效益最优<sup>[23]</sup>。政策层面上,研究的热点问题是在总量控制的背景之下合理实施点源—非点源的排污权交易,用市场手段减少总污染(点源和非点源)的发生,也提出了一些具体的方案设计<sup>[24]</sup>。

我国目前尚缺乏针对非点源污染的治理手段,管理措施、政策有效性的量化研究更是一个空白,建立适合国情的非点源污染防治、管理综合体系是一长期渐进的过程。可行的建议有:建立非点源污染的数据库,作为研究、管理的依据;开发适合我国国情的非点源污染模拟、管理和量化评价模型、GIS应用软件;在城市和农业规划中加入非点源污染防治的内容;在污染物迁移转化机制研究的基础上,完善水环境的总量控制和点源排污权交易,开展政策研究,为实现远期的点源-非点源排污交易做准备,最终实现环境-经济总效益的最优化。

### 参考文献:

- [1] 鲍全盛,王华东.我国水环境非点源污染研究与展望[J].地理科学,1996,(1):66-71.
- [2] Lee S I. Nonpoint source pollution[J]. Fisheries, 1979, (2): 50-52.
- [3] Duda A M. Addressing nonpoint source of water pollution must become an international priority[J]. Water Science and Technology, 1993, (3-5): 1-11.
- [4] Karen A P, Barbara L B. GIS-based nonpoint source pollution modeling: Considerations for wetlands[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1995, (6): 613-619.
- [5] Martha W G, Wanada B P. A Geographic information system to predict nonpoint source pollution potential[J]. Water Resource Bulletin, 1987, (2): 281-291.
- [6] Dennis L C, Peter J V, Keith L. Modeling nonpoint source pollution in vadose zone with GIS[J]. Environmental Science and Technology, 1997, (8): 2157-2175.
- [7] 李怀恩,沈晋.非点源污染数学模型[M].西安:西北工业大学出版社,1996.
- [8] 陈西平.计算降雨及农田径流污染负荷的三峡库区模型[J].中国环境科学,1992,(1):48-52.
- [9] Leonard P G, Henry M P, Pierre C, et al. Nonpoint-source pollution: Are cropland control the answer?[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1986, (4): 215-218.
- [10] Christine L A, Martinus J B. Estimating nonpoint source pollution loads with a GIS screening model[J]. Water Resources Bulletin, 1995, (4): 647-655.

- [11] 刘 枫, 王华东, 刘培桐. 流域非点源污染的量化识别方法及其在于桥水库流域的应用[J]. 地理学报, 1988, (4) : 329 - 339.
- [12] 温灼如, 苏逸深, 刘小靖, 等. 苏州水网城市暴雨径流污染的研究 [J]. 环境科学, 1986, (6) : 2 - 6, 69.
- [13] 陈西平, 黄时达. 涪陵地区农田径流污染输出负荷定量化研究[J]. 环境科学, 1991, (3) : 75 - 79.
- [14] Contant C K, Duffy M D, Holub M A. Determining tradeoffs between water quality and profitability in agricultural production: implications for nonpoint source pollution policy[J]. Water Science and Technology, 1993, (3 - 5) : 27 - 34.
- [15] Berit A, Maja B. Modeling nitrogen transport and retention in the catchments of southern Sweden[J]. AMBIO, 1998, (6) : 471 - 480.
- [16] Høleger J, Markus H. Nitrogen leaching from agricultural land in Sweden[J]. AMBIO AMBIO, 1998, (6) : 481 - 488.
- [17] Zhang Minghua, Geng Shu, Smallwood K S. Assessing groundwater nitrate contamination for resource and landscape management[J]. AMBIO, 1998, (3) : 170 - 174.
- [18] Garnier Mónica, Leone Antonio. Integrated use of CLEAMS and GIS to prevent groundwater pollution caused by agricultural disposal of animal waste[J]. Environmental Management, 1998, (5) : 747 - 756.
- [19] Lyn B I, Michael E B, Joseph F M, *et al.* Use of regression models for analyzing stormwater loads[J]. Journal of Environmental Engineering, 1998, (10) : 987 - 993.
- [20] Drapper D, Tomlinson R, Williams P. Pollution concentration in road runoff: southeast Queensland case study[J]. Journal of Environmental Engineering, 2000, (4) : 313 - 320.
- [21] Lopes T J, Bender D A. Nonpoint source of volatile organic compounds in urban areas: relative importance of land surface and air [J], Environmental Pollution, 1998, (2) : 221 - 230.
- [22] Neda F, Gregory M M, Eneas S F. Nutrient removal in a vertical upflow wetland in Piracicaba, Brazil [J]. AMBIO, 2000, (2) : 74 - 77.
- [23] Michael D D, William F R. Modeling BMPs to optimize municipal wastewater land treatment system[J]. Journal of Environmental Engineering, 1998, (12) : 1 178 - 1 187.
- [24] Schwabe K A. Modeling state-level water quality management: the case of the Neuse River Basin[J]. Resource and Energy Economics, 2000, (1) : 37 - 62.

## Advances and prospects for nonpoint source pollution studies<sup>\*</sup>

ZHENG Yi, WANG Xue-jun

(Dept. of Urban and Environmental Science, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract :** The basic characters of nonpoint source pollution are summarized in this paper. Major advances in fields of model simulation, landuse, runoff, application of the new technologies and the management are discussed also. In the end, several hot-spots of nonpoint source pollution studies are introduced and the studies and management in China are prospected.

**Key words :** nonpoint source pollution; study; advance; prospect

\* The project is supported by Foundation for University Key Teacher by the Ministry of Education.