

非点源

Nonpoint Source

NPS

污染及其管理

Pollution and Management

王晓燕 编著



海洋出版社

北京市科技新星计划
教育部高等学校骨干教师资助计划 联合资助

非点源污染及其管理

王晓燕 编著

海洋出版社

2003年·北京

内 容 简 介

本书是一部全面介绍非点源污染的著作。全书共分7章,重点论述了非点源污染的特征、传输途径、模拟方法及控制管理方面的技术措施和有关政策措施。其突出特点是系统、综合地反映了当前国际非点源污染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

非点源污染及其管理 / 王晓燕编著. —北京:海洋出版社,2003.11

ISBN 7-5027-6023-7

I. 非… II. 王… III. 非点源污染—环境管理
VI. X501

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 108418 号

责任编辑:赵叔松

责任印制:刘志恒

责任校对:张丽萍

FEIDIANYUAN WURAN JI QI GUANLI

海洋出版社 出版发行

<http://www.oceanpress.com.cn>

(100081 北京市海淀区大慧寺路8号)

北京彩艺印刷有限公司印刷 新华书店发行所经销

2003年11月第1版 2003年11月北京第1次印刷

开本:787mm×1092mm 1/16 印张:11.25

字数:295千字 印数:1~1000册

定价:30.00元

海洋版图书印、装错误可随时退换

前 言

随着人类经济活动深入发展,水环境污染已成为全球性问题。非点源污染的严重性随着点源污染治理程度的提高而逐渐表现出来,尤其是当点源污染控制水平达到一定程度后,非点源成为导致水环境污染的重要原因。在发达国家,由于基本上实现了对点源污染的有效治理,非点源已成为水环境的最大污染源。我国富营养化的湖泊水体已占 63.3%,其中 50% 以上的磷、氮污染负荷来自农业非点源。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,非点源已上升为威胁地表水的主要污染源。

非点源污染危害的广泛性和控制的复杂性,使其研究在国外越来越受到重视。在过去的三十年中,非点源污染研究得到了迅速发展,出版了大量的专著和研究论文。而在我国,目前的水污染控制重点仍主要放在点源上,虽然在 20 世纪 80 年代即已开始对非点源污染进行研究,但主要集中在污染特征研究,缺乏相应的管理研究和实践,至今尚无全面介绍非点源污染的专门论著。因此,我们编写了《非点源污染及其管理》一书,以期对推动非点源污染的深入研究,起到抛砖引玉的作用。

本书共分 7 章,对非点源污染的特征、传输途径等方面的基本概念和原理进行了阐述,介绍了非点源污染模型及具体应用、非点源污染控制管理措施和相关政策。重点突出该领域在近期内的研究进展和成果,反映了当前国际非点源污染研究的最新发展趋势。本书参考了国内外大量的相关文献资料,并列出了相当数量的有关参考文献目录,有利于读者查阅。

本书的具体内容是:第 1 章 概论,第 2 章 水文过程与模拟,第 3 章 土壤侵蚀与产沙过程,第 4 章 污染物在土壤中的输移转化,第 5 章 非点源污染模型(王晓峰参与编写),第 6 章 非点源污染的最佳管理措施(王照蒸参与编写),第 7 章 非点源污染管理的政策措施(曹丽萍参与编写)。另外,汪清平、孟凡德、贾晓峰、梁博等参与了部分资料的编译和文献校对工作。

特别感谢中国环境科学研究院金相灿研究员、中国水利水电科学研究院潘世兵博士、北京林业大学王冬梅博士,他们对本书部分章节进行了审阅,提出了宝贵的意见;感谢海洋出版社赵叔松编审及其同事对本书的出版所做的许多细致的工作。

作者殷切期望本书的出版能引起各界有关人士对非点源污染研究的更多关注和兴趣,并希望能对从事相关领域的教学和研究的专家学者及高等院校有关专业学生的研究工作和学习有所裨益,进一步推动中国非点源污染研究的发展。由于非点源污染研究的有关理论和方法尚在发展和完善之中,且该研究为多学科交叉,范围十分广泛;另外,作者在学术理论水平和实际研究能力、经验等方面有一定局限,对国内外研究进展认识、了解不足,疏漏和谬误在所难免,敬请读者不吝赐教,批评指正。

目 次

第 1 章 概论	(1)
1.1 非点源污染概念的演变及特点	(1)
1.2 非点源污染的危害	(2)
1.3 非点源污染的类型	(4)
1.4 非点源污染物质	(12)
1.5 非点源污染研究进展	(17)
第 2 章 水文过程与模拟	(25)
2.1 概述	(25)
2.2 水文循环	(25)
2.3 径流的估算方法	(42)
2.4 流域水文过程模拟	(50)
第 3 章 土壤侵蚀与产沙过程	(55)
3.1 概述	(55)
3.2 土壤侵蚀过程	(56)
3.3 侵蚀产沙模拟	(65)
3.4 土壤养分流失	(81)
第 4 章 污染物在土壤中的输移转化	(87)
4.1 概述	(87)
4.2 非点源污染物的输移转化特征	(88)
第 5 章 非点源污染模型	(103)
5.1 概述	(103)
5.2 非点源污染模型结构	(111)
5.3 地理信息系统在非点源污染模型中的应用	(112)
5.4 常见非点源污染模型介绍	(115)
第 6 章 非点源污染的最佳管理措施	(130)
6.1 概述	(130)
6.2 农业非点源污染最佳管理措施	(131)
6.3 城市非点源污染最佳管理措施	(140)
6.4 最佳管理措施的效果评价及其应用前景	(143)
第 7 章 非点源污染管理的政策措施	(149)
7.1 概述	(149)
7.2 国外非点源污染管理的政策措施	(150)
7.3 我国非点源污染管理政策措施的发展趋势	(168)
7.4 小结	(172)

第 1 章 概 论

1.1 非点源污染的概念演变及特点

随着人类经济活动的不断深入,水环境污染已成为全球性问题。传统上按污染的发生类型,将水环境污染源分为点源(point source)和非点源(nonpoint source,简记 NPS)。点源通常有固定的排放位置,集中排放,如工业废水和污水处理厂的出水。

由于受控制技术和财力限制,尤其是点源污染过去十分严重,所以点源一直普遍被作为治理水污染的主要方面。美国在 20 世纪 70 年代投入大量资金和人力,兴建二级污水处理厂,所有污水在排入江河前必须经过处理达标排放。但是,几年的实践表明,单纯控制点源,一些水体仍然受到污染。因为除了点源外,许多水体还受到非点源的污染。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%^[1]。

关于非点源的定义,有多种提法。传统上,在许多国家,所有类型的农业活动和土地利用,包括牲畜养殖,均被视为非点源,即向环境中排放不连续的扩散过程,而且不能由一般的污水处理方法获得水质改善的排放源;它是由于降雨、地表径流、渗透、排水、渗流、水文特性改变或大气沉降产生的。在较大范围内,大气、地面和土壤中的污染物通过地表径流进入地表水和地下水,并在水体中大量富集从而导致水环境污染^[2]。也可以简单定义为晴天积累、雨天排放的不固定排放源^[3]。

美国《联邦水污染控制法(修正案)》(The Water Pollution Control Act Amendments)(1972 年)对非点源做了如下解释:非点源是一种分散的污染源,其污染物的构成来自一个大范围或者大面积^[2]。故早期一些中文文献称非点源为“面源”。实质上非点源(NPS)包括线源和面源,而用“面源污染”一词概括并不完整。

美国《清洁水法》(Clean Water Act,简称 CWA,1987 年)的第 502(14)条款中对点源进行了明确的规定,即任何可识别的、限定的和不连续的输送途径,包括但不限于管道、沟渠、集中养殖场、汽车或其他流动交通工具等,不包括农业暴雨径流及农业灌溉回水。并认为,不符合以上点源定义的污染源,便是非点源^[4]。这是目前国际较为公认的说法。

在美国,进入上述输送过程的径流也被当成点源,要求达到清洁水法的排放许可要求。所以,相关项目管理者必须理解把握非点源的法定含义。《联邦水污染控制法(修正案)》(1972 年)围绕“国家污染排放消除系统”(National Pollution Discharge Elimination System, NPDES)设置了一个强制执行的配套计划。NPDES 被基层机构用来强制实施点源污染治理,这里点源污染的内涵已经扩展,许多径流污染源在法律上也被划为点源类(如动物饲料和粪便、工厂及市区雨后污水径流、合并下水道溢流、正在开采的矿山排放的酸性水流等)。于是,有些术语更多地是具有法律含义而不是技术含义。所以即使在美国,点源与非点源的区分界定也不是十分清楚。

鉴于非点源包含许多小的点源,如广大农村的粪池、动物饲养厩与家禽饲养场等,因此,这个定义也有不确切之处。美国科学家提出扩散污染(diffuse pollution)的概念,既包括非点源,还包括一部分特定点源^[4]。目前,美国环保局(USEPA)也称之为污染径流(polluted runoff)。

从实质上看,非点源污染是指由于土地利用活动产生的溶解的或固体的污染物(地面的各种污染物质,如城市垃圾、农村家畜粪便、农田中的化肥、农药、重金属及其他有毒或有机物),从非特定的地点随着降水产生的径流,进入受纳水体造成的污染^[5]。污染对受纳水体的影响,决定于距污染源最近的汇水河流的远近及运移污染物的径流。

一般认为非点源污染有以下特点^[4]:

(1)污染物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。污染过程监测是在地面进行而不是在水中。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(次降雨径流过程、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。主要受关注的污染物为泥沙、营养物、有毒物质等。

(7)点源的最严重危害发生在枯水期,而非点源的严重危害却发生在暴雨之后。

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,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。

1.2 非点源污染的危害

非点源污染的总效应是多方面的,对区域生态环境和人类健康形成了严重的危害,不仅污染饮用水源,而且造成地表水的富营养化和地下水污染,破坏水生生物的生存环境,引起生物量的减少或死亡;而且水土流失冲走了大量表土,土层变薄,土壤贫瘠沙化,肥力下降,给农业生产带来不利影响,并破坏水土结构、道路和沟渠;泥沙会破坏鱼类和其他野生生物的繁衍地;泥沙增加意味着疏浚港湾和处理废水的费用增加;河床增高导致更大的洪水泛滥;湖泊、水库淤积速度加快。

非点源污染的严重性随着点源污染控制能力的提高而逐渐表现出来,尤其是当点源污染控制水平达到一定程度后,非点源污染成为了水环境污染的主要原因。

在发达国家,由于基本上实现了对点源污染的有效治理,非点源已经成为水环境的最大污染源。在美国,60%的水污染起源于非点源污染;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。美国江河中73%的BOD、92%的悬浮物和83%的细菌均来自非

点源^[6]。美国环保局 1986 年发布的报告,表明美国被监测河流中 65% 受到非点源污染^[7]; 由于营养物的高负荷造成水体富营养化,墨西哥湾于 1993~1999 年,底部水体缺氧范围由 1.6 万 km² 增至 2 万 km²,而氮的年流入量中,89% 来自非点源^[8]。表 1.1 为美国水体的主要污染物及污染源。

表 1.1 美国水体的主要污染物及污染源(美国环保局,2000)^[8]

	河流	湖泊、水库	河口
污染物	盐类 38%	营养物 44%	病菌 47%
	病菌 36%	金属 27%	有机物 42%
	营养物 28%	盐类 15%	金属 27%
污染源	农业 59%	农业 31%	城市点源 28%
	水文特性改变 20%	水文特性改变 15%	城市径流/暴雨下水道 28%
	城市径流/暴雨下水道 12%	城市径流/暴雨下水道 12%	大气沉降 23%

丹麦的大部分河流中 94% 的氮负荷、52% 的磷负荷由非点源污染引起;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%;奥地利北部地区进入水环境的非点源氮量远比点源大^[9~11]。

非点源对水环境造成的污染主要有如下两方面:

(1) 以营养物型污染物污染水体环境

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,以及某些滞留(流速小于 1m/min)河流水体内的氮、磷等营养元素的富集,导致某些特征性藻类(主要是蓝藻、绿藻等)异常增殖,致使水体透明度下降,溶解氧降低,水生生物随之大批死亡,水味变得腥臭难闻。引起水体富营养化的关键元素是氮和磷。研究表明,对于湖泊、水库等封闭性水域,当水体无机态总氮含量大于 0.2mg/L、磷酸盐浓度达到 0.02mg/L 时,就有可能引起藻华(alage blooms)现象的发生^[12]。

水体营养物质氮、磷的来源主要有城镇生活污水,含氮、含磷的工业废水和农田氮肥、磷肥。其中,农田氮、磷的流失是引起水体富营养化的重要原因。在美国,农业是一个主要的非点污染源,农田径流使全国 64% 的河流、57% 的湖泊受到污染;瑞士雨水径流中氮、磷含量相当于工业废水和城市污水中此类污染物量的总和^[13,14]。

我国湖泊达到富营养化的水体已占 63.3%,其中 50% 以上的磷、氮污染负荷来自农业非点源污染负荷。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,非点源污染已上升为威胁地表水的主要污染源。我国五大淡水湖之一的巢湖,于 20 世纪 60~80 年代,由于湖水的富营养化,导致湖内 100 余种水藻大量繁殖。巢湖目前主要受到氮、磷营养盐及有机物的污染,总氮、总磷严重超标,其中 70% 来自非点源污染。目前,工业废水和生活污水的治理工作已得到广泛的重视,然而农业非点源污染却未得到应有的关注。我国第三大淡水湖的太湖,目前 97% 面积的水体已呈中等富营养化状态。太湖水富营养化主要由沿湖的工农业排污引起。据研究,进入太湖的污染物中,总氮排放量最多的是太湖流域的农业非点源污染,总磷排放量最多的是城镇居民的生活污水。滇池地区过量施肥、施肥结构不合理、农田排水直接进入河流等一系列因素,加剧了湖泊水体富营养化的发生^[15~18]。由水体富营养化引起的水质恶化、水源紧缺、生态环

境破坏,严重制约着经济的健康持续发展。

(2) 以毒害型污染物污染水体环境

非点源污染物种类很广,几乎含有大部分自然和人工合成的各种化学、生物污染物质。它们进入地表水环境可对水生生物以及通过食物链对人体产生各种各样的影响。

这主要归结于农药、除草剂及其降解产物、化肥中的重金属、有毒有机物以及大气沉降物等。其直接的毒害是引起水体生物的急性中毒,如有机磷、有机氯农药;以及有毒物在水体食物链中的富集,如磷肥中的重金属镉等。巴伦支海和波罗的海的波的尼亚湾海豹繁殖率极低,育龄海豹怀孕率只有 27%(正常情况下为 80%~90%),体内 PCBs(多氯联苯)含量较高是其主要原因。洗涤剂进入水环境可使化学物质的毒性为原来的 2~7 倍^[14]。一些激素是内分泌系统的破坏者,会阻碍野生生物和人类正常生长,使人类和动物的生殖健康和生殖能力产生逆向改变。富营养化湖库的铜绿微囊藻的快速致死素可导致动物肝肿充血、快速死亡。

非点源毒性污染物(包括本身无毒,但可诱发其他污染物毒性的物质)进入地表水环境,造成的不仅是污染指标的超标,而且还会产生污染物的协同作用,直接对水生生物构成危害,并通过食物链对人体产生影响。上述毒害型污染物对水体环境的副作用最终将影响到人类本身。

1.3 非点源污染的类型

非点源污染主要起源于水土流失、农药与化肥的施用、农村家畜粪便与垃圾、农田污水灌溉、城镇地表径流、林区地表径流、废弃的矿山、大气的沉降以及可能产生污染的生产活动,如森林砍伐、水利建设、土地开发等污染源。具体研究中常按土地利用方式或污染源特点进行细分。

在非点源污染引起的各种水问题中,在不同地区起主导作用的污染源类型不同,如农业化肥农药污染、农村牲畜粪便污染、城市径流污染、林区非点源污染、矿区建筑工地非点源污染以及其他污染源。不同土地利用类型的非点源污染负荷也明显不同(表 1.2)。

表 1.2 非点源污染源产生的污染负荷^[19,20]

土地利用类型	地点	总氮/[kg/(hm ² ·a)]	总磷/[kg/(hm ² ·a)]
林地	欧洲	2.5	0.2
	日本琵琶湖区	6~94	0.184
	美国环保局	4	0.1
	中国巢湖	18.0	7.8
	中国滇池	7.8	1.1
农田	欧洲	5	0.3
	日本琵琶湖区	27.84	0.36
	美国环保局	10	0.3
	中国巢湖	21.5	3.5
	中国滇池	12.2	7.1
城镇	欧洲	5	1
	美国环保局	10	0.3
	中国巢湖	24.5	6.0
	中国滇池	5.7	1.8

按照美国环保局(USEPA)的划分,非点源污染的主要类型有农业、林业、水文特性改变、航运、公路、城市及湿地-缓冲带^[21]。

1.3.1 农业

在美国,农业生产活动是目前最大的非点源,化肥和农药的施用是水体污染和富营养化的最主要来源。在农业生产活动中,农田中的土壤颗粒、化肥、农药、病菌及其他污染物,在降雨或灌溉过程中,随着地表径流、农田排水、土壤渗漏进入水体,对地表水和地下水造成潜在的污染。从造成水体污染因素的分布来看,农业非点源污染是最普遍的。

美国环保局在提交国会的报告中指出,大量的农田养分流失是造成内陆湖泊富营养化的主要原因。在进入地表水体的污染物中,46%的泥沙、47%的总磷、52%的总氮均来自于农业径流污染^[22]。

在欧洲的许多流域内,高投入农业所占比例过大,则容易导致湖泊中氮、磷等营养盐的富集^[23]。自1970年,欧洲对地表和地下水中氮、磷及农药残留进行了广泛的研究。在对地中海国家的海岸带进行了城市、工业、农业污染的对比后,认为农业是磷和泥沙的首要来源^[9,24]。

在中国,化肥使用迅猛增长,从1978年的 $88.5\text{kg}/(\text{hm}^2\cdot\text{a})$ 增至1993年的 $193.5\text{kg}/(\text{hm}^2\cdot\text{a})$,但有效利用率较低,平均每年农田氮肥流失率为33.3%~73.6%;田间试验表明,喷洒的农药仅有20%~30%附在目标作物上,而30%~50%落到地面,其余进入大气中。可见,大量的化肥、农药通过雨水冲淋、农田灌溉、土壤渗透等途径进入江、河、湖、库等水域,是造成农业非点源污染的主要原因^[15]。我国东部湖泊的污染负荷输入量中,农业非点源污染负荷入湖量已超过50%,大理洱海流域非点源氮、磷污染负荷分别占流域污染负荷的97.1%和92.5%,农田过量施用化肥是造成非点源污染的主要原因^[25]。

随着点源排放的逐步控制,农业非点源污染所占的比重会越来越大。

1.3.1.1 农业生产

农业耕种带来的扰动活动实际上会增加农田的侵蚀。90%以上的营养物流失与土壤流失有关。农田的降雨径流水质负荷在一定程度上与土地利用状况和耕种强度有关。在加拿大温哥华地区农田化肥的施用量逐年增加,土壤中硝酸盐浓度也从1969年不足 $1\text{mg}/\text{L}$ 增至1991年的 $20\text{mg}/\text{L}$ ^[26]。免耕和少耕农田产生了较多的地表径流,同时导致农药和养分的流失较多,而在传统耕作农田中,养分随地下径流流失较多^[27]。Chichester等研究发现,农田径流产生量与农田耕作方式并无明显的相关关系,但农田泥沙和养分流失在传统耕作农田中明显高于免耕农田^[28]。与免耕农田相比,由于翻耕,农田土壤中矿化作用强烈,硝酸盐的淋失明显大于免耕农田。保护性耕作(如免耕、少耕)可以改善土壤的入渗性能、土壤物理结构和土地生产潜力,减少农田土壤流失^[29]。Sharpley研究了磷在农田中流失的敏感性,发现按以下顺序降低:传统耕作小麦田、免耕小麦田、草地过滤带^[30]。

降雨径流携带大量营养盐进入地表水或地下水,引起受纳水体的酸化和富营养化,因此化肥的降雨径流污染一直是人们十分关注的问题。一般认为,通过径流流失的养分在较大程度上取决于迁移过程和物质来源。对污染物来源的控制主要是通过监测土壤中养分的状态,指导施肥的方式、使用量和化肥类型。化肥和农药流失的强度也与使用后降雨发生的时

间、降雨强度、土壤前期含水量、农药的土壤吸附能力等有关^[31]。为了避免化肥、农药流失,在选择施肥时间时应尽量避开大雨和暴雨来临之前。农田中养分流失还与农作物对养分的吸收利用有关,在农作物吸收养分的低谷期时最容易发生流失。为了避免养分过度流失,化肥使用也应与农作物养分需求高峰期相吻合^[32],这样不仅可以提高化肥利用效率,而且也可以避免非点源污染形成。

在 20 世纪 60 年代,美国科学家就注意到农药对水体生态系统或者饮用水的潜在危害,率先研究农业生产过程中农药的降雨径流污染。目前,大量使用的农药有杀虫剂、除草剂和除菌剂。在农田中施用的农药通过大气、地下水和地表径流迁移,停留在土壤中的农药受到土壤颗粒的吸附、侵蚀流失,微生物和光化学降解、挥发、作物吸附、淋溶,其浓度不断下降。农田中农药残留物的浓度除了与流域中施用量、流域的土地利用、农业化肥、气候状况、地形特点和排水区的土壤类型等因素有密切关系外,还与土壤中农药的降解速度有关。因此,采取措施如增加碳源和微生物的数量提高农药的降解速度,可减轻农药对地表水和地下水的污染。在无营养盐和碳源补充的情况下,如果实行轮作耕种或将底土翻耕,可提高农药的矿化率。此外,灌溉水流的速度和温度、农药的残留时间、土壤孔隙水的流速可影响农药的降解速度^[33]。

在国外,排水性较差的农田中,常用瓦管排水系统来改善土壤的湿度以及提高农作物的产量,同时也将土壤孔隙水和浅层地下水中高浓度的可溶性盐和农药输送到河流中,直接造成水体污染。研究发现,在农田轮作过程中因硝酸盐的下渗和植物的吸收而造成的氮损失与通过无机肥补充的氮大体保持平衡^[34]。在中国苏南太湖水系进行的农田氮素流失模拟研究表明,农业非点源污染负荷随年降水量和灌溉量的增加而增大;浅层地下水硝态氮的污染负荷随氮肥施用量呈正相关;稻田氮素流失显著高于旱田^[35]。

灌溉方式与养分、农药流失密切相关,一般以下列顺序递增:喷灌<淹灌<沟灌。在用水量相同时,喷灌农田中养分、农药流失最少,其次是淹灌和沟灌。由于地表径流中养分和农药的流失在较大程度上取决于径流强度和径流量,农田中广泛使用减少径流产生的农耕措施,将可以减少流入水体的养分和农药^[36]。

1.3.1.2 牲畜饲养

动物饲养圈和牲畜棚是农村危害最大的土地利用区,是污染地下水中的营养盐和病菌的主要来源之一。饲养圈本身一般都作为点源而不是非点源,然而固体废物处理方法和和管理方法间接地使大部分饲养圈废物通过地表径流进入地表水体^[2]。饲养圈地表含有大量压实的厩肥残余,若受到暴雨的冲击,牲口棚的径流就会非常浑浊,并且携带高浓度的营养物质,直接进入水体造成污染。养殖过程中,施用清洁的水体冲洗饲养圈内外产生污水,排入沟渠、河流造成地表水污染或下渗造成地下水污染;清洁水体(如自然降雨、上游流水等)与养殖场的粪便等废弃物发生接触,使清洁水体受到污染;更不容忽视的是通过粪肥归田利用后发生营养物流失,造成地表水或地下水污染。畜禽养殖过程对水体的污染,有些属于点源污染范畴,有些属于非点源范畴。封闭的畜禽饲养和其他形式的畜禽饲养活动是主要的农业非点污染源之一,主要是通过粪肥归田利用后的营养物发生流失形成污染^[37]。

畜禽粪便是 150 余种疾病的潜在发病源。由细菌病菌传播的疾病,包括伤寒、肠胃紊乱、霍乱、肺结核、炭疽病和乳腺炎等。传染性病毒引发的疾病,有猪霍乱、蹄疫、小儿麻疹、呼吸道疾病、眼传染病等。粪肥归田、粪便氧化塘和储存池的外溢等会引发公共健康问

题。

气候、地形、土壤类型、下渗率、动物种类、动物健康状况等因素会影响进入河流中激发疾病的微生物的属性和数量。一般而言,在高温的晴天施用粪肥时,有害细菌会迅速死去。如果雨天施用新鲜粪肥或者施用在冻土上,则会增加进入水道系统中的有害微生物。粪便中的无机盐对土壤和庄稼影响较大,过高的无机盐会伤害土壤和庄稼。除了含氮、磷的无机盐之外,有关其他盐类对水体水质影响的研究较少。

建立限制性养殖场能够避免不加圈养的放牧,以减轻辐射区域内地下水中硝酸盐富集和毗邻河流中铵盐的浓度增加。在某种情况下,污染物可通过地下暗沟排放到受纳水体。家禽污水中大肠杆菌对农田的污染情况研究表明,即使在未施肥的情况下,降雨会引起大肠杆菌在结构良好的土壤中快速迁移,并造成浅层地下水的大肠杆菌富集^[38]。地下水污染潜力主要取决于土壤结构和水流状况而不是地表的厩肥的数量,因为饲养场地面一旦被厩肥所覆盖,土壤的下渗性就会大为降低。

来自于粪便的地下水污染包括储粪池下渗、氧化塘下渗以及粪肥归田后营养物的下渗。畜禽生产集中的某些地区,其产生的粪便会引起地下水污染。美国特拉华(Delaware)南部畜禽集中生产区的 200 余个水井测试结果表明,34% 以上的水井中 NO_3^- 浓度超出 10mg/L ^[39]。

除了氮、磷、病菌外,在美国切萨皮克湾(Chesapeake Bay)流域的 Conestoga 河谷中的几条河流中检测出激素类物质如增长性雄性激素(growth hormones testosterone)($0.8 \sim 2.9\mu\text{g/L}$)和雌性激素(estrogen)($1.2 \sim 4.1\mu\text{g/L}$)。来自于施用禽粪田地的径流中雄性激素浓度为 $215\mu\text{g/L}$ 和雌性激素浓度为 $19\mu\text{g/L}$ ^[40]。

1.3.2 城市

城镇地表如商业区、街道、停车场等,聚集了一系列降雨径流污染物,如油类、盐分、氮、磷、有毒物质及城市垃圾,在降雨过程中雨水及其形成的地表径流冲刷地面污染物,通过排水渠道或直接进入江河湖泊,造成地表水污染。

美国环保局把城市地表径流列为导致全美河流和湖泊污染的第三大污染源^[6]。其中,城市合流制下水道溢流(the combined sewer overflows, CSO)问题尤为突出,这些系统汇合的水流有雨水和污水,以前认为雨水可稀释污水中污染物的浓度,实际上,不透水地面产生的污染相当于未经处理的污水。在美国北卡罗来纳州的德兰姆,每年来自城市非点源的污染等于该地区未经处理污水的化学需氧量 COD 负荷的 91%,生化需氧量 BOD 负荷的 67%,悬浮物则比未经处理污水高 20 倍。融化雪水的潜在污染最大,据研究发现,积雪中污染物的含量明显高于同一地区雨水中污染物的平均浓度^[2]。目前美国环保局将合流制下水道溢流(CSO)列为全美河流和湖泊污染的第十大污染源^[4],不过合流制下水道溢流在美国法律上被划为点源类,要求达到国家污染排放消除系统(NPDES)的排放限制。

城市非点源污染与其他类型非点源污染不大相同。这是因为:①城市地面多为不透水地面,水文活动很强烈;②流域的水文响应加快,增加了洪水发生的可能;③城市下水道及相关设施的修建,以及低于地下水位的建筑物的排水设施都会降低地下水水位,使地下水基流中以未稀释的下水道污水和废水为主;④除建筑工地区外,城市的透水地面有植被覆盖,侵蚀作用大为减小,但水流速度加快,使河流的岸蚀作用增强;⑤不透水地表堆积物主要来自大

气降尘、街道垃圾、落叶和枯草、动植物残体、畜禽粪便及道路交通等。经过清扫、风吹或分解后,不透水地表堆积物经过较长时间,最终都进入地表径流。而在非城区,土壤是许多污染物的汇(sink)。土地利用、人口、交通流量、街道地面情况、大气的干湿沉降、气象条件等影响城市非点源污染的特征^[6]。

表 1.3 城市暴雨径流中典型污染物^[41, 42]

典型污染物	单位	住宅区	混合区	商业区	一般城区
总悬浮物	mg/L	101	67	69	80
总磷	mg/L	383	263	201	0.3
总氮	mg/L				2.0
总凯氏氮	mg/L	1.9	1.3	1.2	
硝酸盐氮 + 亚硝酸盐氮	μg/L	736	558	572	
总有机碳	mg/L				12.7
生化需氧量	mg/L	10	7.8	9.3	
化学需氧量	mg/L	73	65	57	
大肠菌群	最多数目/100mL				3600
碳氢化合物	mg/L				3.5
油类	mg/L				2~10
镉	μg/L				2
铜	μg/L	33	27	29	10
铅	μg/L	144	114	104	18
锌	μg/L	135	154	226	140
氯化物	mg/L				230
杀虫剂	μg/L				0.1~2.0
除草剂	μg/L				1~5.0

从产生非点源污染的角度,将城市土地利用分为以下类型:①低污染负荷区,包括中低密度的住宅区(小于 125 人/hm²)和部分排污较少的工业活动,如批发和仓库。②中污染负荷区,包括高密度的住宅区(大于 125 人/hm²)和商业区。③高污染负荷区,如中等强度和很高强度的工业区。④最低潜在污染区,如公园、休闲区^[43]。

美国全国城市径流计划(Nationwide Urban Runoff Program, NURP)(1983 年)的研究结果表明,在城市的不同土地利用的典型区,污染物平均浓度无明显差别。另外,污染物平均浓度与径流量之间也无明显的线性相关关系。研究表明,径流量与地面不透水程度有关,因此单位面积负荷量与土地利用之间存在一定的关系^[43]。这一研究结果对城市径流监测尤为重要。

由于城市地表的不透水性和微小的填洼蓄水,不透水区域极易产生径流,即使很小的降

水量也会造成严重的降雨径流污染。现在不透水地面的第一次产流已成为降雨径流污染研究的重要内容,因为在整个降雨过程中开始排放的 30% 的水量运送了 80% 的总污染量。研究发现,降雨前干旱天气的长短对道路沉积物的冲刷量影响极小,但影响水体的导电性;降雨强度和地表流速影响固体悬浮物的流失率;用回归曲线并不能非常准确地预测第一次产流的流失量^[44]。第一次产流的无量纲曲线,其主要特征取决于污染物种类、排放点、降雨过程和排水系统的功能,由于这些因素的共同影响,很难建立能解释曲线形状和变化的典型多元回归关系^[45]。

1.3.2.1 住宅及商业区

这一区域的污染主要随不透水地面的比例而变化。另外,街道清扫情况及垃圾堆积、路缘长度、排水系统等,也影响污染的负荷。

为研究城市污染源的径流特点,人们还对城市的原木储存地和处理设施以及房顶的水流进行监测,发现暴雨过后径流中的铵和硝酸盐含量在增加,最大浓度出现在农业中使用农药期间或刚使用后不久。大气中的绝大多数化合物可以进入地下水,如果房顶径流未经过滤层,特别容易进入透水性较好的地区^[46]。屋面污染物主要是干沉降物和屋面材料的分解物质。在北京,夏季高温使油毡屋面初期径流中 COD 高达数千毫克每升,路面初期径流中 COD 和 SS 浓度一般超过城市污水^[47]。

在住宅区,秋季落叶含有 90% 的有机质和少量磷,成为城市暴雨径流中可降解有机物的主要来源。

1.3.2.2 交通

由于汽车行驶过程中,汽车零件如轮胎等在地面磨蚀而产生灰尘,会带来碳氢化合物如多环芳烃 PAHs、铅、石棉、石油、磷酸盐及颗粒物等污染物;另外,交通还使沉积尘土重新扬起,并迁移扩散。研究发现,交通直接贡献大约 $0.7\text{g}/(\text{km}\cdot\text{辆})$ 的固体颗粒物,汽车排放大约 $0.2\text{g}/(\text{km}\cdot\text{辆})$ 废物和 $0.125\text{g}/(\text{km}\cdot\text{辆})$ 的轮胎磨损^[48]。虽然与交通有关的污染物中,机动车直接排出的污染物仅占 5%,但由于这些污染物的潜在毒性,使它们成为最重要的污染物。另外,交通流量、公路条件、磨蚀情况、汽车排放情况等决定了交通对污染物负荷的影响。全沥青路面的污染物负荷大约比全混凝土路面高 80%^[41]。中国西安高速公路路面径流研究表明,径流排水污染强度高,有机污染以非溶解性 COD 为主,生物可降解性差,对河流水质有一定影响^[49]。

另外,在冬季寒冷的城市,道路融雪剂的使用对融雪径流的组成有一定影响,高盐度的径流对道路和车辆有腐蚀作用,也影响土壤、植被和地下水。

由于道路是非透水性地表,径流污染的发生量大且污染的可控性较强,降水量、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影响非点源污染发生量。

1.3.2.3 休闲娱乐

休闲娱乐用地包括城市公园、野餐场地、高尔夫球场、海滩、城市林带。这些地方的土地通常受到良好的保护,不易发生水土流失,这类土地的污染危害最小,在一般情况下,污染负荷量与森林地接近。休闲娱乐地的潜在污染源是草地过量施肥和超量使用除草剂。

阿根廷马德普拉塔郊区的土地利用与地下水污染之间的关系显示,园艺活动已成为危害当地的地下水水质的原因之一^[50]。现在人们已经注意到休闲娱乐对地表水质的影响。

与驼羊和人行走的森林小道相比,有马行走的森林小道的泥沙流失是最严重的。河边的露营地比周围地区的裸露密度大,裸露土地多,其径流量和泥沙沉积量都比土地利用低的地区产生的径流量、泥沙量高^[51]。

1.3.2.4 建筑工地

建筑工地产生的污染物数量最大。由于剥去了表土,裸露土壤未加保护,每年的沉积物可达 5 万 t/km^2 ^[4];另外,还产生其他的污染物。建筑机械将土壤压实,降低了土壤的渗透率和地表蓄水,增加了水文活动。影响建筑工地泥沙及其他污染物流失的因素是坡度、工地与河道的距离、土壤的可蚀性、植被覆盖度、气象因素等。

1.3.3 林业

由于树叶、土地、覆盖物、土壤有机物及粗糙地形有很强的地表蓄水能力,森林和树林土地的水文活动不活跃,泥沙和污染物的流失量很低。即使地下水位高的森林地带也可以吸收大量的降水,起到拦截、延缓径流的作用。所以,森林地带几乎不存在地表径流,但是在低洼森林地带,由于土壤淋滤而使河流中的有机质和营养物的含量升高。

导致非点源污染产生的主要林业活动有道路修建和使用、砍伐森林、化肥和农药的使用、烧荒等。道路会分割、破坏天然排水道。道路修建和使用被认为是森林土壤侵蚀的主要来源,约占 90 % 的泥沙来自道路修建和使用^[52]。

森林砍伐是对环境破坏和造成污染的主要土地利用方式。不加限制地砍伐森林会破坏森林防止土壤侵蚀的作用。根据观察和记录的资料,几乎所有流入水道的森林地的泥沙均来自修造伐木道和砍伐作业的林区,而堆积在运木路面上的碎屑,会随森林地表径流进入水体^[2]。在北卡罗来纳州东部大面积的火炬松被砍伐后,整个流域径流深从 111 mm 增至 164 mm ,氮输出量从 $2.1 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 增至 $2.2 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,磷输出量从 $0.12 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 增至 $0.36 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ^[53]。

烧荒减少了地表保护层,并且改变了土壤特性,造成侵蚀增强。烧荒后的侵蚀程度由以下因素决定:土壤可蚀性、坡度、降雨历时、强度和降水量、火势、土壤覆盖层存留情况和植被再生速度。由于植被破坏,烧荒可增大地表流量,使蒸腾速率减慢,植物截留降低。

使用化肥和农药,尤其是不适当的使用,会对水质造成不利的影响。

1.3.4 大气沉降

非点源污染的强度和程度往往与大气污染及气象条件有关。降水是清洁大气最有效的途径之一,降水是大气污染物的良好载体和清除者。因此,雪和雨含有许多对水陆生态系统有害的大量污染物,如酸类、有毒金属、有机物、氮磷物质等,致使地表水体受到污染。在未扰动的流域,大气养分输入,是地表水污染的主要原因。北美五大湖区,铅负荷的 90 % 来自非点源污染^[4]。

干沉降仅在降雨之间才显著,其沉降率通常比湿沉降小些。重力作用是决定大气干沉降率的主要机制,但表面撞击、静电吸引、吸附和化学反应等,是细小粒子(小于 $1 \mu\text{m}$)沉降的重要原因。许多大城市,大气干湿沉降速率为 $7 \sim 30 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{月})$;闹市区和工业区的大气沉降速率大于其他区域^[4]。

大气降尘对本地区径流水质有明显影响。如在瑞典的研究发现,径流中 20 % 的有机

物、25%的磷、70%的总氮来自大气^[54]。

酸雨就是由于大气中的硝酸盐和硫酸盐等酸性物质,由降雨或干沉降造成的严重的全球性环境问题。在美国,每年约有 320t 来自大气的氮沉降。氮通过干、湿沉降在陆地或水体中,其中沉降在陆地的氮有 30%~60%被生态系统吸收^[4]。流域保持氮的程度由土壤性质、地质、地貌、地表植被等决定。相当数量的沉降氮通过地表和地下径流进入水体。由于淡水系统多为磷限制,过多的氮被迁移到河口。近来研究表明在河口和海湾,氮的大气来源成为水体中外来氮源的主要部分。Paerl (1993) 研究表明,北卡罗来纳的河口接纳了 30%~40% 的大气氮,海湾接纳了 50% 以上的大气氮^[55]。美国全国地表水监测(The National Surface Water Survey, NSWS)结果显示,在美、加和北欧酸雨区,湖水中 SO_4^{2-} 的浓度与大气中 SO_4^{2-} 的沉降呈正相关^[56]。

重金属铅和汞的大气沉降也是地表水中重金属的重要来源。

许多有机物都是潜在的致癌物,通过大气、水、生物和沉积物进行迁移。农药和有机污染物通过大气输送,对水体造成危害。最新研究表明,大气沉降已成为荷兰水体中持久性有机物(POP)和农药的重要来源,降水和大气中发现 50 种农药,其中降水中的 17 种农药浓度超过地表水的最大容许值,22 种农药浓度超过饮用水标准^[57]。

美国最大的海湾切萨皮克湾的研究表明,在 1982 年随降雨进入海湾的西玛津(一种除草剂)只有 110kg,而在 1984 年 Alachlor 已达 9.8t^[58]。在北美五大湖地区,大气沉降成为有毒污染物的主要来源,在上游地区,来自大气沉降的 DDT 负荷为 97%~98%;在下游地区,也达到 22%~31%^[59]。在中国滇池,由大气干湿沉降输入湖泊的氮、磷负荷分别占总负荷的 8.39%、7.58%^[20]。

事实上,干沉降对一个湖库传输的污染物远比一个主要公路径流传输的污染物多,而且可通过远距离输送进入森林累积,使不受干扰的森林汇水区污染物输出逐年增加^[52]。

1.3.5 湿地—缓冲带

湿地(wetlands)约占地球表面面积的 6%,是地球上水陆相互作用形成的独特生态系统,是重要的生存环境和自然界最富生物多样性的生态景观之一。在抵御洪水、调节径流、改善气候、控制污染、美化环境和维护区域生态平衡等方面具有其他系统所不能替代的作用。被誉为“地球之肾”、“生命的摇篮”、“文明的发源地”和“物种的基因库”。因而在世界自然保护大纲中,湿地与森林、海洋一起并列为全球三大生态系统。

湿地是泥沙、营养物、有机物等多种污染物的天然汇。湿地作为农田与水体之间的一个过渡带,是一独特的土壤—植物—微生物系统。当农田排水流经湿地时,水中的有机质、氮、磷等营养成分将发生复杂的物理、化学和生物的转化作用。湿地中的土壤及砂石通过吸附、截留、过滤、离子交换、络合反应等净化去除水中的氮、磷等成分。水生植物在湿地去除农业非点源污染过程中起着十分重要的作用,植物不仅可以通过其呈网络状的根系直接吸收农田排水中的氮磷,更重要的是,水生植物可通过其生命活动改变根系周围的微环境,从而影响污染物的转化过程和去除速度。营养物质在湿地土壤中的降解和转化主要靠微生物来完成。湿地土壤中发育着大量好氧、厌氧及兼性的微生物,由于水生植物的生长,其根系的分泌物及好氧环境为好氧细菌的生长创造了条件,将排水带来的有机物分解,并被植物吸收;根区以外的还原状态区域,发育着大量的厌氧微生物,如硝酸盐还原细菌和发酵细菌,将有

机物分解为气体,挥发进入大气^[60,61]。

研究发现,农田与水体间 50m 宽的沿岸植被缓冲带能减少进入地表水 89% 的氮和 80% 的磷。所以,湿地在去除农业非点源污染方面是一个简单而有效的工具,而且费用低廉^[62]。例如,在瑞典计划将进入波罗的海的氮量负荷减少 50%。据估计,每减少 1kg 进入波罗的海的氮,利用沿海的湿地需要 0.6 美元,用补救的农业措施需 1.9~53.4 美元,而通过污水处理厂减少城市废水中 75% 的氮,需要 15.6~31.2 美元^[63]。另外从生态学观点来看,输入到湿地中的氮、磷营养物可被植物吸收,促进如芦苇、蒲草、灯心草等水生维管束植物的生长和发育,为保护生物的多样性,改善流域生态景观起到积极的作用。因此,从经济学和生态学的角度,湿地生态系统已是世界上很多国家认可的控制水环境污染的有效工具^[64]。中国学者对南方多水塘系统的研究表明,该系统在截留营养物质方面效果十分显著^[65]。

由于农业生产和城市化扩展,湿地迅速减少。另外,来自农业、城市等区域的未处理的径流,进入湿地后,对湿地造成影响,如改变种群组成、增大污染负荷,开阔水面替代复杂的湿地系统,有些变化对物种的影响甚至是灾难性的。因此,减少非点源污染,保证湿地的原有功能是非常必要的。

1.3.6 水文特性改变

人类活动改变水文特性,会引起非点源污染,直接或间接地影响水体水质。建筑工程会减少土壤的渗透率和地表蓄水量,流域增加不透水面积会加强其水文活动。农业区的排水与灌溉系统可破坏地下水等。

疏浚可将河底的污染物重新悬浮或者重新分散溶解。为了维护航运水道,每年进行挖泥。由于河道和港口的日益污染,沉积物累积十分严重,成为污染问题。

河道开挖、天然河道截弯取直等会导致非点源污染。

1.3.7 采矿

露天开采使地表裸露,造成强烈侵蚀,是干扰性很大的土地利用方式;颗粒物本身可携带大量金属矿物、残渣。采矿带来的另一问题是排出的大量酸性废水。

据测定,矿区和建筑施工地的侵蚀强度可达 $1.7 \text{ 万 t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,其径流携带的悬移质数量要比农耕地高 10 倍,比草地高 200 倍^[66]。

1.4 非点源污染物质

危害最大的非点源污染物是泥沙、营养盐、有毒物质、病菌(pathogen)、重金属和有机物等。

1.4.1 营养盐

氮(N)、磷(P)是恶化水质的两种主要来自农业活动的营养物。营养物以不同形式和来源使用在农地上,如固态或液态化肥、畜禽养殖过程及粪便处理、城市或工业废水、废渣、庄稼残茬、灌溉水、大气沉降等。径流中的营养物有颗粒态和溶解态。在发达国家,由于基本