

● 赵剑强 著



城市地表径流 **污染与控制**



中国环境科学出版社

城市地表径流污染与控制

赵剑强 著

中国环境科学出版社

· 北 京 ·

图书在版编目(CIP)数据

城市地表径流污染与控制/赵剑强著. —北京: 中国环境科学出版社, 2002. 5

ISBN 7-80163-292-3

I. 城... II. 赵... III. 城市—地面径流—水污染—污染控制 IV. X522

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 021271 号

中国环境科学出版社出版发行
(100036 北京海淀区普惠南里 14 号)

北京市联华印刷厂印刷
各地新华书店经售

*

2002 年 6 月 第 一 版 开本 850 × 1168 1/32

2002 年 6 月 第一次印刷 印张 5 1/8

印数 1—1 000 字数 133 千字

定价: 10.00 元

前 言

在城市地表水环境方面，我国长期以来较多关心的是城市污水对地表水环境的污染问题和城市地表径流的防洪问题，所以，对如何设计合理的城市污水管网和污水处理厂以减缓城市污水对河流湖泊的污染，以及对如何科学规划排水管道系统以便快速地排除城市地表径流方面做了大量的研究。而对于城市地表径流的污染问题却未给予足够的重视。近几年来，我们先后承担了陕西省自然科学基金项目“汽车对路面径流水的污染及净化特性研究”，“西安市城市地表径流水质及污染控制措施研究”等科研课题，对西安市城市道路及高速公路路面径流水质进行了测试，发现城市地表径流决不是一个可以轻视的污染源。为唤起人们对城市地表径流污染的重视，并为今后我国开展城市地表径流污染研究提供参考，在总结介绍国外相关研究成果的基础上，融入我们的部分测试结果编写了这本书。

本书共分八章，第一章综合论述了城市地表径流的性质、特征、研究背景、危害及研究意义等内容；第二章介绍了城市地表沉积物污染特性的一些测试研究结果；第三章介绍了城市地表径流雨水水质特征及相关测试结果；第四章介绍了公路路面径流雨水的水质特征及相关测试结果；第五章介绍了城市地表径流中污染物的排放规律；第六章介绍了城市地表径流污染负荷计算方法及模型；第七章介绍了城市地表径流对河流湖泊水质影响及水质预测模型；第八章分析总结了地表径流污染常用控制措施。

城市地表径流污染方面的研究在西方发达国家已经开展了近30年，而在我国这方面的研究却很少。从环境污染与保护角度专著论述城市地表径流，在我国尚属首次。限于作者水平，书中的缺点和错误在所难免，望读者批评指正。

作者

2001.11

英文缩略语注释

COD_{cr}——(chemical oxygen demand) 化学需氧量, 或用 COD 表示

COD_{Mn}——(chemical oxygen demand) 高锰酸盐指数, 或用 OC (oxygen consumed) 表示

BOD₅——5 日生化需氧量

TOD——总需氧量

TOC——总有机碳

DOC——溶解态有机碳

POC——(particular organic carbon) 悬浮态有机碳,
$$\text{TOC} = \text{DOC} + \text{POC}$$

TC——总碳量

IC——无机碳, $\text{TOC} = \text{TC} - \text{IC}$

DTC——溶解态总碳

PTC——悬浮态总碳, $\text{TC} = \text{DTC} + \text{PTC}$

DS——溶解性固体

TDS——(total dissolved solids) 总溶解性固体, 等同于溶解性固体 (DS)

SS——悬浮固体

TSS——总悬浮固体, 等同于悬浮固体 (SS)

TS——总固体, $\text{TS} = \text{DS} (\text{或 TDS}) + \text{SS} (\text{或 TSS})$
$$= \text{DS} (\text{或 TDS}) + \text{可沉物} + \text{不可沉物}$$

VS——挥发性固体

NVS——非挥发性固体 (TS 中的灰分), $VS + NVS = TS$

VSS——挥发性悬浮固体

NVSS——非挥发性悬浮固体 (SS 中的灰分),

$$VSS + NVSS = SS \text{ (或 TSS)}$$

$NO_2 - N$ ——亚硝酸盐氮

$NO_3 - N$ ——硝酸盐氮

$NO_2 + NO_3 - N$ ——或表示为 $NO_{2+3} - N$, 硝基氮 (亚硝酸盐氮 + 硝酸盐氮)

NH_3 ——非离子氨, 亦称游离氨

NH_4^+ ——离子氨, 亦称铵盐

$NH_3 + NH_4^+$ ——总氨, 氨氮即为以氮计的总氨

KN ——凯氏氮 (氨氮和有机氮的总和)

TKN —— (total kjedahl nitrogen) 总凯氏氮, 等同于凯氏氮

ON ——有机氮, $ON = KN \text{ (或 TKN)} - \text{氨氮}$

TON ——总有机氮, 包含了在 KN 或 ON 中未包含的一些有机物 (如, 含氮的杂环化合物、吡啶、叠氮化合物、偶氮化合物等)

$$\begin{aligned} TN & \text{——总氮, } TN = NO_2 - N + NO_3 - N + KN \\ & = NO_2 - N + NO_3 - N + \text{氨氮} + ON \end{aligned}$$

PN ——悬浮态氮 (或颗粒吸附态氮)

DN ——溶解态氮, $TN = PN + DN$

$PO_4 - P$ —— (ortho - phosphorus) 正磷酸盐磷

TP ——总磷, 包括正磷酸盐、缩合磷酸盐 (焦磷酸盐、偏磷酸盐和聚合磷酸盐) 和有机磷。

PP ——悬浮态磷 (或颗粒吸附态磷)

DP ——溶解态磷, $TP = PP + DP$

TPb——总铅，亦简称铅 (Pb)

TFe——总铁，亦简称铁 (Fe)

HC——碳氢类化合物

NO_x——氮氧化物

CSO——(combined sewer overflows) 合流制排水系统雨天溢流

SAR——滞留池表面积与流域面积比

FFE——(first flush effect) 初期效应

EMC——(event mean concentration) 次降雨径流平均浓度

PEMC——(partial event mean concentration) 部分降雨径流平均浓度

EMCs——(median event mean concentrations) 多场降雨的次降雨径流平均浓度的中值

average EMC——多场降雨的次降雨径流平均浓度的平均值

PAH——(或 PAHs) 多环芳烃

ADT——(average daily traffic) 日平均交通量

USEPA——美国国家环保局

SEMCOC——(Southeast Michigan Council of Governments) 美国密执安州东南区议会

NURP——National Urban Runoff Pollution research (U. S. EPA, 1983), 国家城市地表径流污染研究计划。

BMP——(Best Management Practice) 最佳管理实践 (美国用于暴雨径流控制的一套管理措施)

PET——(partial exfiltration trench) 部分强化渗渠

WEF——(Water Environmental Federation, USA) 美国联邦水环境局

USGS——(The U. S. Geological Survey) 美国地质勘探局

目 录

第一章 绪 论	(1)
1.1 城市地表径流污染研究背景	(1)
1.2 研究城市地表径流污染的意义	(2)
1.3 城市地表径流污染特征及研究方法	(5)
1.4 城市地表径流污染研究现状及存在问题	(7)
1.5 本书的主要内容	(9)
第二章 城市地表沉积物的污染特性	(11)
2.1 城市地表径流污染物来源	(11)
2.2 城市地表沉积物的污染特性	(12)
2.3 西安市路面沉积物污染特性研究	(16)
第三章 城市地表径流水质特征	(21)
3.1 地表径流污染物浓度的表示及计算方法	(21)
3.2 国外城市地表径流水质研究进展	(26)
3.3 我国城市地表径流水质研究	(33)
第四章 公路路面径流水质特征	(41)
4.1 公路路面径流主要污染物	(41)
4.2 国外公路路面径流水质研究进展	(43)
4.3 西安市高速公路路面径流水质测试	(52)
第五章 城市地表径流排污规律	(57)
5.1 累积与冲刷模型	(57)
5.2 计入雨天排污因素的冲刷模型	(66)
5.3 地表径流初期效应的概念、频率及判据	(70)

5.4 城市排水体制	(78)
第六章 城市地表径流污染负荷	(85)
6.1 地表径流污染负荷计算方法	(85)
6.2 地表径流污染负荷计算模型及应用	(88)
第七章 城市地表径流对受纳水体的影响及	
水质模型	(103)
7.1 城市地表径流对受纳水体的影响	(103)
7.2 河流湖泊水质数学模型	(108)
第八章 地表径流污染控制措施	(125)
8.1 地表径流管理控制措施概述	(125)
8.2 常见地表径流管理控制措施	(126)
8.3 地表径流污染控制措施的应用及效果	(133)

第一章 绪 论

1.1 城市地表径流污染研究背景

1.1.1 面源污染的概念

面源污染是指降水引起的地表径流对水体的污染。其既包括城市地表雨水径流引起的水体污染，也包括广大农村地区等地表雨水径流引起的水体污染。由于它是相对于点源污染而提出的，所以亦称之为非点源污染。

从地表的可透水性方面来划分，面源污染又可分为不可透水性地表径流及可透水性地表径流两种。城市地表、厂区、公路路面等地表径流都属于不可透水性地表径流；而农田耕作区、矿山开发区、林区以及农村居住区等都属于可透水性地表径流。

1.1.2 研究背景

点源及面源是地表水体污染的两大来源，其对地表水体污染的分担率随着人们对点源及面源的认识程度及采取的相应治理措施的效果而发生变化，在点源污染极其严重时，面源污染常常会被忽视。1972年，美国国会通过了《水污染法案》，规定1985年达到零排放，期望从此能达到完全控制污染。经过花费大量资金建设许多污水处理厂后，实际上却没能达到目标。在俄亥俄河、五大湖，当把所有工业废水和城市生活污水全都处理之后，水体污染问题并未得到解决。究其原因，发现是由于暴雨径流把广大

地面上的各种污染物都带入了水体。于是，美国国家环境保护局 1977~1981 年的科研计划中，正式提出了面源污染控制的研究课题，开始了对面源污染的研究。其研究范围既包括广大农村地区地表雨水径流引起的水体污染，也包括城市地表雨水径流引起的水体污染。

长期以来，我国面临着极其严重的工业废水和城市污水的污染问题，防治任务艰巨，所以，政府的主要工作放在了点源污染控制方面，对于面源污染，工作重点主要是针对农村耕作区水土流失等面源污染问题，对于城市地表径流污染尚未给予足够的重视，开展这方面研究的报导也较少。然而，我国近年来通过对三大河流湖泊流域的污染治理的实践已深刻地体会到了面源污染的危害，淮河流域的污染治理便是典型事例。

1.2 研究城市地表径流污染的意义

1.2.1 面源污染的危害

1990 年美国关于水体污染的调查表明^[4]，约 30% 的水体超标是由面源污染所造成的。其原因是，在城镇地区，暴雨径流将城镇地面上的有毒污染物带入水体，这些有毒污染物种类多，数量大；在广大的农业耕作区，雨洪会冲刷泥沙以及化肥、农药和各类饲养场的废物，这些物质都将进入水体。据美国国家水质委员会在 20 世纪 80 年代初估算^[94]，美国来自点源和面源的悬浮物总量为 $348 \times 10^3 \text{ t/d}$ ，其中面源总量为 $319 \times 10^3 \text{ t/d}$ ，占 92%；氮负荷总量为 $78.6 \times 10^3 \text{ t/d}$ ，其中面源总量为 $62.3 \times 10^3 \text{ t/d}$ ，占 79%；磷负荷总量为 $8.0 \times 10^3 \text{ t/d}$ ，其中来自面源的有 $4.25 \times 10^3 \text{ t/d}$ ，占 53%；大肠杆菌的数目 98% 以上来自面源。面源污染所占比例是随着对点源污染的控制而在不断增大的。目前，在西方发达国家，面源污染已成为主要的水环境污染问题^[101]。

在我国,滇池湖泊流域的大青河,暴雨期悬浮物浓度比平时均值高 22 倍,亚硝酸盐氮则高达 163 倍;宝象河暴雨期最大悬浮物浓度是非暴雨期的 106 倍^[29]。近年来,我国对滇池污染、太湖污染、淮河流域污染等重大河流湖泊污染问题的调查研究结果都表明面源污染在其中起着重要的作用,其中滇池富营养化问题的研究结果表明工业废水、城市污水及面源的污染分担率分别为 9%、24%和 67%。

1.2.2 研究城市地表径流污染的意义

在面源污染中,城市地表径流是仅次于农业面污染源的第二大面污染源^[7]。城市地表径流包含许多污染物质,有固体废物碎屑、化学药品、空气沉降和车辆排放物等。根据 Vitale 等人的研究结果,中型城市水体中 BOD 与 COD 的总含量约 40%~80%来自面源,在降雨较多的年份中,90%~94%的总 BOD 与 COD 负荷来自城市下水道的溢流^[94]。城市地表径流中污染物 SS、重金属及碳氢化合物的浓度与未经处理的城市污水基本相同^[16]。可见,城市地表径流污染的危害是相当大的。研究城市地表径流污染的特性及规律,开发可行的污染控制技术及对策,为政府部门对面源污染的控制管理决策提供科学依据具有重要意义。

近年来,随着我国对工业废水及城市污水治理力度的加大,城市地表径流污染问题将会越来越突出。及时地汲取国外的经验教训,在治理点源污染的同时,全面系统地考虑污染的来源,才能实现统筹规划、综合治理的方针。

1.2.3 研究城市道路及公路路面径流污染的意义

城市路面径流是城市地表径流的重要组成部分。道路包括公路及城市道路,公路是指连接城市与城市的道路。路面径流因其污染强度大、对地表水体的影响严重而被予以格外的关注,近年来在国外已逐步发展成为一门独立的研究领域^[108]。

路面径流直接与汽车交通紧密相关。而汽车交通是城市大气污染的主要来源，汽车交通排放的污染物质（如 NO_x 、 SO_2 、HC、醛类、有机酸、颗粒物等）在自然沉降及雨水冲淋作用下，其大部分最终都将通过地表径流迁移至地表水体中。有些污染甚至潜伏着巨大的危害性，如水环境中的致癌类物质 3, 4-苯并芘、苯等就被认为与汽车尾气污染源有关。White (1995)^[27]对城市地表积雪取样测试结果表明，在对应采样点周围环境的一氧化碳及二氧化氮浓度高的样品中，导致遗传变异的毒性物质含量较高，从而认为这些将进入城市地表径流的遗传毒性物质是燃料燃烧的副产品。Pitt 等人 (1995)^{[15][26]}对不同城市功能区（住宅、商业及工业）的屋面、街道、停车场、景观区、车辆服务区等地表径流进行的测试研究，发现检出率最高的毒性污染物与汽车交通（停车场及车辆服务区）有关，检测到的毒性有机污染物有：1, 3 二氯苯，荧蒽 ($\text{C}_{16}\text{H}_{10}$)，芘，苯并 (b) 荧蒽，苯并 (k) 荧蒽，苯并 (a) 芘，双 (二氯乙基) 醚，双 (氯异丙基) 醚，萘，苯并 (a) 蒽，丁苄基邻苯二甲酸酯。Shepp (1996)^[26]的研究认为，在汽车使用较密集的地区的地表径流中，石油类碳氢化合物的含量为 $0.7 \sim 6.6\text{mg/L}$ ，且其含量随汽车使用频率的大小而变化。Ellis 等人 (1995)^[83]对英国伦敦西北部一条位于住宅区的路面径流进行了测试，以研究路面径流对城市地表径流的污染分担率，结果发现，0.05 公顷的沥青混凝土路面在 243 公顷的城市地表径流中，路面径流排污所占比例为：Cd 46%，Cu 78%，Pb 47%，Zn 13%，并认为，受纳水体中 35%~75% 的重金属是来自于路面径流，受纳水体的化学性质有时被排入的路面径流所主导。

可见，日益增大的城市交通车流量，不仅对城市环境空气质量产生严重影响，而且，通过城市路面径流严重威胁着地表水体的环境质量。

我国汽车排放 HC（碳氢类化合物）是发达国家的 18~28

倍^[99]，我国的城市路面径流污染问题应比发达国家更为突出。我们对西安市南二环路机动车路面雨水径流的测试结果表明^[5]，城市路面径流雨水污染物浓度不低于城市典型生活污水污染物浓度。随着城市化进程的加快，以及汽车拥有量的迅速增大，路面径流污染问题必将更为突出。所以，通过对路面径流污染物的调查研究，了解路面径流雨水的污染状况及水质特性，探讨路面径流中污染物排放规律，研究路面径流污染防治措施，对防止水污染、保护水资源、保护人类健康生存具有重要的社会意义。

1.3 城市地表径流污染特征及研究方法

1.3.1 城市地表径流污染特征

城市地表径流属于面源污染范畴。但严格来讲，城市地表径流兼具面源和点源的双重特征。所具面源的特征表现在：污染物在晴天时在城市地表累积，在降雨时随地表径流而排放，具有面源间歇式排放特征。所具点源污染的特征表现在：污染物自城市地表经由排水系统进入受纳水体，具有点源排放形式，即集中排放的特征。

影响城市地表径流污染的因素包括：降雨强度、降雨量、降雨历时、城市土地利用类型（如居民区、工业区、商业区、城市道路等）、大气污染状况、地表清扫状况等。降雨强度决定着淋洗地表污染物的能量的大小；降雨量决定着稀释污染物的水量，降雨历时既决定着污染物被冲刷的时间也决定着降雨期间的污染物向地表输送的时间；城市土地利用类型决定着污染物的性质及累积速率；大气污染状况决定着降雨初期雨水中污染物含量；城市地表清扫的频率及效果影响着晴天时在地表累积的污染物数量。可见，影响城市地表径流污染的因素很多，且许多为随机性因素，在地表污染物的累积和冲刷两个主要环节中都有随机性因

素起作用，如两场降雨之间的间隔时间、降雨历时、降雨强度等，这些因素使得对任一场降雨来说，由于其随机性强，偶然性大，测试结果变化大。所以，研究城市地表径流污染，就需要在降雨时进行大量的现场测试，并根据研究目的对相关的环境条件进行统计分析。

1.3.2 城市地表径流污染研究方法

城市地表径流污染的研究是环境科学领域内的一项基础性研究课题。研究的目的是为了确定城市地表径流的污染负荷及其对地表水体的影响，确定地表径流污染控制措施。按照研究内容不同，可归纳为如下四类：

第一类是对城市地表上沉积物直接取样测试，以确定地表污染物的来源、组成及污染潜力。（本书第二章）

第二类是在包括分流制排水及 CSO（合流制排水系统雨天溢流）在内的雨水排水口处对排水量及污染物浓度进行监测，以确定可能排放到地表水体的污染负荷量及污染物的排放规律。（本书第三、四、五、六章）

第三类是对受纳水体的水质进行分析，以评价地表径流对受纳水体的影响。在这类研究中，可通过观测位于城市上、下游的河流断面水质的变化、河流水体沉积物中污染物含量的变化及水生生物的变化说明受纳水体所受地表径流的影响。应用地表水体水质模型预测评价水体水质的变化也属于这一研究范畴。（本书第七章）

第四类是对地表径流污染控制措施的研究，以探讨地表径流污染控制的方案。内容包括地表径流污染控制的管理措施、工程措施及其处理效果等。（本书第八章）

为了确定城市地表径流的污染负荷量，人们尝试了很多种方法，包括从地表河流水体的实测水质、水量过程线反推城市地表径流的污染分担率；从城市地表沉积物累积量和暴雨径流冲刷率

计算地表径流排污负荷量等。但这些方法都或多或少地遇到一定的困难。从水质、水量过程线反推地表径流污染分担率的困难有^[117]：

(1) 径流污染物与水流冲刷河道再悬浮污染物及其他地表径流污染物难以区分；

(2) 城市化影响，降雨不均匀，无法从流量过程推算产流过程；

(3) 城区排水系统汇集多个形状不同集水区，距总排放口远近亦不同，汇流过程复杂；

(4) 城市各功能区的地表沉积物累积速率、径流冲刷率和污染物成分含量都不同。

从地表沉积物累积量和暴雨径流冲刷率计算地表径流排污量的困难主要有^[7]：

(1) 在一些研究中，污染物在地表的积累与两场降雨之间的间隔时间长短并无明显相关关系。

(2) 累积速率和最大积累量随不同的气候条件及测试地点变化很大。在大多数模拟研究过程中，几乎无法直接测试流域内污染物的积累量，反倒是通过一系列暴雨事件冲刷排出的污染物量来推算积累量。

因此，目前较多采用的研究方法是在城市地表径流雨水排水口处，对排水及污染物进行大量的现场监测，以归纳统计地表径流的平均浓度，为预测计算排污负荷提供基础资料。

1.4 城市地表径流污染研究现状及存在问题

美国、英国、荷兰等发达国家在 20 世纪 70 年代就对城市地表径流开展了大量的测试及研究工作 [6, 8]，其内容包括地表径流雨水的水质测试及特性研究、城市地表径流对地表水体的影响、描述地表径流污染排放规律的数学模型以及污染控制措施

等。至今虽然已经过近 30 年的研究，仍未找到彻底控制面源污染的办法，在这方面尚需进一步研究的工作仍很多。就像一些文献中所讲的：“雨水中有有机污染物的测定及研究工作至今开展的还很少”^[9]，“至今还未找到一个可靠的用于预测径流污染排放的模型”^[7]。“具有较高质量的监测数据的数量仍然不足”^[7]，“反映公路路面径流的资料还很有限”^[4]等等。像面源污染的水质模拟等预测预报方法，由于对污染物在城市地表径流过程中的输送、扩散规律未得到清晰的认识^{[7][12]}，经统计分析提出的一些描述径流污染负荷的数学模型在对影响因素的认识方面存在本质的差别，以美国国家环境保护局 SWMM 模型为代表的一些模型将晴天累计天数作为其模型中的最主要的参数，而英国 MOSQUITO 模型则认为该因素没有明显的影响^[7]，认为降雨量是影响地表径流排污的主要因素。另外，通常认为在一场降雨中初期的污染负荷要比中后期的污染负荷大得多（称之为初期效应），基于此认识而形成的截流初期雨水于污水处理厂的半分流制排水系统的设计原则亦在大量的与该认识相悖的调查研究结论中受到质疑^{[7][12]}。英国水研究中心对斯蒂夫尼奇新城区的分流制排水系统出水的研究表明，历来被认为优于合流制的分流制排水系统产生的年污染负荷与合流制的雨天溢流负荷相当，使分流制的优越性也越来越受到怀疑。

所以，近几年来，国外对城市地表径流方面仍然开展了大量的研究工作。如：Deletic 等人（1998）^[7]采用自动监测设备对城市地表雨水口处径流雨水水质的 pH、温度、浊度及电导率进行了连续测定，获得了大量的数据，并给出了固体排放速率与地表径流量的相关式。Adachi 等人（1998^[10]，1996^[9]，1994^[11]）测定了雨水中重金属、醛及含氮有机物的量，提出采用 Ni 含量作为反映公路交通污染的指标。Wu 等人（1998）^[4]报导了对城市道路、城郊道路及位于农村的公路路面径流的研究结果，分析比较了三处不同地点的公路路面径流平均浓度。Sansalone 等人