



流域非点源污染优先控制区 ■■■ 识别方法及应用 ■■■

陈 磊 沈珍瑶 等 / 著

中国环境出版社

流域非点源污染优先控制区 识别方法及应用

陈 磊 沈珍瑶 等 著

中国环境出版社·北京

图书在版编目 (CIP) 数据

流域非点源污染优先控制区识别方法及应用/陈磊等著. —北京: 中国环境出版社, 2014.11

ISBN 978-7-5111-2092-2

I. ①流… II. ①陈… III. ①流域污染—污染控制—研究 IV. ①X52

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 229049 号

出版人 王新程
责任编辑 宋慧敏
责任校对 尹芳
封面设计 彭杉

出版发行 中国环境出版社
(100062 北京市东城区广渠门内大街 16 号)
网 址: <http://www.cesp.com.cn>
电子邮箱: bjgl@cesp.com.cn
联系电话: 010-67112765 (编辑管理部)
010-07112738 (管理图书出版中心)
发行热线: 010-67125803, 010-67113405 (传真)

印 刷 北京中科印刷有限公司
经 销 各地新华书店
版 次 2014 年 11 月第 1 版
印 次 2014 年 11 月第 1 次印刷
开 本 787×960 1/16
印 张 14.75 彩插 20
字 数 282 千字
定 价 58.00 元

【版权所有。未经许可, 请勿翻印、转载, 违者必究。】

如有缺页、破损、倒装等印装质量问题, 请寄回本社更换

前 言

工农业的发展以及城镇化的加快导致我国流域（区域）水环境污染问题越来越突出。据最新监测数据，2013 年，十大水系的 469 个国控监测断面中，I ~ III 类、IV ~ V 类和劣 V 类水质断面比例分别为 71.7%、19.3%和 9.0%，主要污染指标为化学需氧量、五日生化需氧量和总氮。与此同时，追求更好的生活质量对环境保护工作提出了更高的要求，其中水环境质量改善是重中之重。“十二五”规划中明确提出要“加快发展现代农业，推广清洁环保生产方式，治理农业面源污染”。可以说，流域水环境质量的改善已成为关乎我国社会经济又快又好发展、人民生活水平提高的关键，是国家重大需求。

非点源污染指溶解的和固体的污染物从非特定的地点，在径流冲刷作用下汇入受纳水体（包括河流、湖泊、水库和海湾等）引起的水体污染。非点源污染的发生具有随机性，污染源分布具有广泛性，污染物排放时间及途径具有不确定性，且污染负荷时空差异性大，防治较为困难。由于非点源污染的上述特性，因此难以在全流域范围内全面开展治理。因此，在明确非点源污染状况的基础上，识别流域内非点源污染的优先控制区，为非点源污染治理提供地点选择的科学依据，是非点源污染控制的前提和基础。

近年来，我们在国家杰出青年科学基金“流域水污染控制”（No.51025933）、国家创新研究群体科学基金“流域水环境、水生态与综合管理”（No.51121003）、环保公益性行业科研专项经费项目“三峡库区农业非点源污染特征及控制技术研究”（No.200709024）等共同资助下，在已经开展的流域非点源污染机理与污染负荷确定的基础上，进

一步结合非点源污染空间分布特征、流域上下游特征以及综合考虑对评估点的贡献,力图建立一套相对完整的流域非点源污染优先控制区识别方法。

本书具体安排如下所示:第1章对非点源污染优先控制区的相关概念、流程以及技术方法进行了系统总结。第2章侧重于传统的优先控制区识别技术,重点探讨了基于污染流失风险和污染产生量的识别方法及其具体应用。第3章针对非点源污染排放的特定位置,引入了排放负荷的计算方法和排放标准的确定方法,提出了基于污染排放量的识别方法。第4章在考虑对水环境影响的基础上,引入了马尔科夫链理论,将流域上下游关系和污染物迁移过程概化为矩阵运算,构建了基于污染贡献量的识别方法。第5章根据流域水环境管理的特点,提出了新的优先控制区识别思路,最终形成了一套完整的优先控制区分级方法。第6章对优先控制区的技术体系以及应用领域进行了总结和展望。

本书由沈珍瑶、陈磊组织写作,各章写作分工如下:

前言 沈珍瑶

第1章 沈珍瑶 陈磊

第2章 陈磊 初征 沈珍瑶

第3章 陈磊 黄琴 沈珍瑶

第4章 陈磊 沈珍瑶

第5章 陈磊 沈珍瑶

第6章 陈磊 沈珍瑶

参加本书写作和资料整理的还有阎铁柱、侯晓姝、谢晖、刘瑾、邱嘉丽、钟雨岑、王国波、吕关平、魏国元等。全书由沈珍瑶、陈磊统稿。

由于作者水平所限,定有不当之处,欢迎批评指正。

目 录

1	优先控制区概述.....	1
1.1	非点源污染概述.....	3
1.1.1	非点源污染来源	3
1.1.2	非点源污染控制的必要性.....	5
1.2	优先控制区概述.....	7
1.2.1	优先控制区研究的重要性.....	7
1.2.2	基本流程	8
1.2.3	识别技术	11
1.3	本书章节安排.....	15
	参考文献.....	16
2	基于流失风险和污染产生量的识别技术.....	19
2.1	基于污染流失风险的优先控制区识别	21
2.1.1	基本原理	21
2.1.2	方法流程	23
2.1.3	判别标准	25
2.1.4	方法特点	25
2.2	基于污染产生量的优先控制区识别	26
2.2.1	基本原理	26
2.2.2	方法流程	31
2.2.3	判别标准	34
2.2.4	方法特点	34
2.3	案例研究.....	35
2.3.1	研究区概述	35
2.3.2	数据库构建	38
2.3.3	方法构建	40

2.3.4 识别结果	56
2.4 本章小节	60
参考文献	60
3 基于排放量的优先控制区识别方法	63
3.1 基本原理	65
3.2 方法流程	71
3.3 判定标准	75
3.4 方法特点	75
3.5 案例研究	76
3.5.1 研究区概述	76
3.5.2 数据库构建	80
3.5.3 方法准备	84
3.5.4 结果分析	87
3.6 本章小结	94
参考文献	95
4 基于贡献量的优先控制区识别	97
4.1 基于模型耦合的贡献量计算	99
4.1.1 基本原理	100
4.1.2 方法流程	105
4.1.3 方法特点	107
4.2 基于马尔科夫链模型的贡献量计算	108
4.2.1 基本原理	108
4.2.2 方法流程	110
4.1.3 方法特点	113
4.3 判定标准	114
4.4 案例研究	116
4.4.1 方法准备	116
4.4.2 结果分析	120
4.4.3 与传统方法的对比	122
4.5 本章小节	131
参考文献	132

5 优先控制区识别的新方法.....	135
5.1 多级优先控制区识别方法.....	137
5.1.1 基本原理	138
5.1.2 方法流程	140
5.1.3 判定标准	141
5.1.4 方法特点	141
5.1.5 案例研究	142
5.2 多污染物的优先控制区识别方法.....	151
5.2.1 基本原理	152
5.2.2 方法流程	154
5.2.3 判定标准	157
5.2.4 方法特点	158
5.2.5 案例研究	158
5.3 多评估点的优先控制区识别方法.....	165
5.3.1 基本原理	165
5.3.2 方法流程	167
5.3.3 判定标准	170
5.3.4 方法特点	170
5.3.5 案例研究	171
5.4 本章小节.....	176
参考文献.....	176
6 结 论	179
6.1 主要结论.....	181
6.2 应用展望.....	182
附录 A 传统优先控制区识别技术	185
附录 B 彩图.....	227



1

优先控制区概述

1.1 非点源污染概述

1.1.1 非点源污染来源

我国社会经济的高速发展和人民群众生活水平的提高对环境保护提出了更高的要求,其中水环境质量改善是重中之重。显然,高效的水环境管理是在现有的技术条件基础上,对水体污染的成因和污染源分布进行判断,并在此基础上对主要污染源采取有效的控制措施。目前,水环境的主要污染源包括了点源污染(Point Source Pollution)和非点源污染(Non-point Source Pollution)两大类(Karr and Schollosser, 1978)。其中,点源污染指污染物通过市政污水处理厂和工业排污口(管道)直接进入受纳水体,其污染具有稳定性、集中性、强度大等特征。而非点源污染则指地表积累的各种污染物质,随着降雨(或融雪)所产生的地表径流、土壤侧向水或地下水最终迁移进入受纳水体所造成的污染(李明涛等, 2013)。非点源污染的典型发生方式是降雨径流污染,此外还包括废物堆放区的废液下渗和大气沉降等。根据美国《清洁水法》修正案的描述,非点源污染往往是广域的、分散的、微量的形式;因而,相对于点源污染而言,非点源污染物往往会随地表和地下径流在环境中进行更为复杂的迁移和转化,因此其危害规模更大,防治也更困难。

通常,非点源污染的起因是降雨、融雪或灌溉过程中,由于突然的扰动而引起流域中土壤颗粒、氮磷、农药及其他有机或无机污染物质借助地表径流、灌溉系统和地下渗漏等途径而大量地进入水体造成的污染(Caruso, 2001)。与之相对应的,主要的非点源污染来源包含了种植业、养殖业、城市地表径流和生活污水等四部分,在此对各种污染源进行简单的介绍。

(1) 种植业源

由于长期使用化学肥料、农膜、农药等物质,污染物在农业系统中大量残留,直接影响土壤生态系统的结构和功能,导致土壤生产力下降,造成农产品质量下降和农作物减产,从而对水环境、食品安全和农业可持续发展构成威胁。在我国,随着大量化肥等化学品的加入,有机磷和有机氮对水环境造成了较为严重的污染,其中总氮的流失主要来源于种植业,而农业源的总磷流失(排放)则由种植业、畜禽养殖业和水产养殖业三部分组成。

通常而言,农业非点源污染的流失量和肥料输入量是成正相关关系的,即施肥量越大,化肥流失风险将加大,对水环境的影响也会加剧。从污染流失的角度,土壤氮污染流失以地表径流损失为主,淋溶损失相对较少;除此以外,土壤氮素也随着反硝化过程转化为气体而损失掉。相对而言,土壤中的磷元素更容易被固定,转变为不溶性或缓效磷,而可溶性磷则容易与土壤中的铁、铝氧化物和水化物、层状铝硅酸盐、碳酸钙以及钙、铁、铝等发生沉淀反应和吸附反应,因而磷元素更容易随土壤侵蚀发生迁移损失。常见的对非点源污染贡献较高的作物主要包括谷物、油料、豆类、棉、麻、蔬菜、花卉、茶、果类及中药材的种植等。

(2) 养殖业

由于我国畜牧养殖特征,大量畜禽粪便并没有经过处理便任意排放。畜牧动物粪便中含有的病毒等污染物质很容易经雨水冲刷、地表径流、灌溉水地下径流等途径最终进入河流、湖泊,尤其是粪便中的抗生素残留物更会对水环境和土壤环境造成严重的污染。另外,养殖场中,用来冲洗圈棚的污水,在我国通常也并未经过处理,直接被排放到水环境中,从而对水环境质量构成直接威胁。

从国外的经验来看,畜禽养殖污染主要来自于规模化畜禽养殖场,而我国畜禽散养的模式,决定了养殖业污染主要来自于养殖小区和养殖散户等。猪、奶牛、肉牛、蛋鸡和肉鸡的存栏量、饲养阶段、饲养周期等都会对畜禽污水的产生量造成影响;而清粪方式、粪便和污水处理利用方式则会影响粪便和污水的排放量及排放去向。另外,水产养殖由于大量饲料、肥料等投入,养殖水体中的残饵排泄物、鱼药残留物、氮磷污染以及其他有机或无机物质将大幅增加,给流域水质、底质以及生物带来影响,如不加以控制必然将破坏流域水环境。

(3) 城市污染源

城市的高速发展带给人们方便、快捷的生活,也伴随着大量林地的消失、人口的过度集中、不透水面比例的迅速增加。传统的城市发展方式对自然水文循环的改变导致了城市径流量的增加、径流流速峰值的升高、峰值时间的提前和水环境的退化。同时,降雨径流能携带和迁移多种化学物、重金属石油产品、沉积物和人类、动物粪便污染物。降雨径流作为城市非点源污染的主要来源,含有许多与疾病暴发、水生生物毒性效应和水环境质量下降相关的污染物,被广泛认为是人类和生态系统健康的潜在威胁。尤其在目前我国城市普遍面临内涝频发等状况下,城市雨水与溢流的污水混合在一起,给人们的身体健康构成威胁。人类与各种病原微生物接触有可能引发急性肠胃疾病、呼吸道疾病、皮肤疾病、耳部感染、眼部不适等症状。

(4) 其他生活源

农村生活污水、生活垃圾的产生、处理、利用、排放也是流域水环境的重要污染源。农村生活污染源主要为居民洗涤、做饭、淋浴污水，人和家畜的粪便，有机和无机垃圾等。目前，我国大部分农村并未建立集中的污水处理设施及排水系统，农村生活污水除地表截留外一般就近流入溪流或山涌，对河流造成直接的污染。另外，农村餐厨垃圾、人畜粪便等污染物除部分被土壤截留、植物吸收以及自然降解外，也会随地表径流流失，从而造成严重的流域水环境问题。主要生活源污染物指标为氮、磷；另外，研究生活污水径流的化学物质和病毒微生物，将对流域水环境健康的保护至关重要。

不同的非点源污染源界定如表 1-1 所示。

表 1-1 主要非点源污染来源及其污染物的界定

分类	污染物来源	
种植业	地表径流	硝态氮、铵态氮、总氮、总磷以及 1~2 种农药
	地下淋溶	硝态氮、铵态氮、总氮以及 1~2 种农药
畜禽养殖业	污水	化学需氧量、铵态氮、总氮、总磷、铜、锌
	固体废物	总氮、总磷、铜、锌
水产养殖业	进入自然水体中的化学需氧量、总氮、总磷、铜、锌	
农村生活污染源	污水	化学需氧量、氨氮、总氮、总磷
	固体废物	总氮、总磷
城市地表径流	雨水管网前的地表径流	微生物、重金属等

1.1.2 非点源污染控制的必要性

研究表明，流域非点源污染物主要包括泥沙、营养盐（氮、磷）、重金属、病毒等，其来源通常包括农田土壤表层中的化肥、农药，城市地表的重金属或其他颗粒物。从流域水环境管理的发展来看，20 世纪六七十年代国内外主要着眼于点源污染排放对河流水环境的影响，不大关注城市街道、建筑工地、农业生产和农村生活的降水径流污染。但从 20 世纪 80 年代后期开始，国内外已逐渐关注降雨径流所导致的非点源污染。就目前来看，非点源已成为了世界范围内地表水与地下水污染的主要来源。地球表面水体中的 30%~50%已不同程度上受到非点源污染影响，全世界退化的 12 亿 hm² 耕地中约 12%由农业非点源污染引起。在美国，

非点源污染已经成为水环境污染的第一因素, 80%的河流与湖泊受非点源污染影响, 其中 60%的地表水环境污染事件起源于非点源污染 (USEPA, 2003)。在欧洲, 过量的施用化肥导致德国部分河流的磷浓度达 0.2 mg/L , 已超过其对应的水环境浓度限制; 荷兰农业非点源输出的氮、磷污染负荷分别占污染物总量的 60% 和 40%~50%; 奥地利北部地区进入水环境的非点源氮负荷量远比点源大; 丹麦国内的 270 条河流中, 94%的氮负荷、52%的磷负荷来自于非点源的贡献; 瑞典西海岸的拉霍尔姆湾, 60%的氮污染输入来自于农业活动, 而对于南部的谢夫灵厄流域, 来自农业的氮污染输入则高达污染排入总量的 84%~87% (Delgado and Scalenghe, 2008; Haidary et al., 2013)。

我国的非点源污染问题也日益严重。研究表明, 富营养化已成为我国大型淡水湖泊中最主要的水环境问题, 63.6%的河流、湖泊存在各种程度的富营养化 (夏敏等, 2013)。第一次全国污染源普查结果表明, 农业生产排放的氮、磷分别占我国河流污染物总量的 57%和 67%。在太湖、巢湖和滇池流域, 由于人口密集, 农业生产集约化程度高, 流域总氮、总磷负荷比二十年前提高了十倍以上, 其中 50% 以上的污染负荷是由农业活动贡献的 (李明涛等, 2013)。安徽省调研结果表明, 非点源污染已成为区域水环境污染的主要因素, 其中仅农业活动即贡献了非点源污染总量的 60%~80%。可以说非点源污染已逐渐超越点源污染, 成为导致我国河流、湖泊水体水质恶化的主要污染源, 进而成为制约我国社会经济可持续发展的重要因素。

当今, 世界各国已经逐渐意识到非点源污染, 尤其是农业非点源污染的严重性和形势的紧迫性, 纷纷开展了流域非点源污染防治。而目前我国还处于非点源污染控制技术的储备阶段, 相关实践才刚刚开始, 亟需建立一套流域非点源污染防治的技术体系, 从而指导我国非点源污染防治的实践工作。由于受到气候、下垫面特征和人类活动等多种因素的影响, 流域内非点源污染的来源和排放具有间歇性和随机性, 污染负荷的时空变化幅度大, 如何从流域整体开展非点源污染治理已成为国内外关注的热点和难题。通常而言, 非点源污染的形成过程复杂、机理模糊, 分布范围广、影响因素多, 排放时间、排放数量和排放途径具有不确定性, 潜伏周期不定且危害大, 污染负荷时空差异性显著等, 使得非点源污染的研究与控制有较大的难度。对非点源污染的研究是当前水环境研究和水污染控制实践的难点和热点之一, 寻求一种经济、简便、科学、高效的流域非点源污染的最佳控制途径已成为当务之急。

1.2 优先控制区概述

1.2.1 优先控制区研究的重要性

一般而言,当有害物质在空间分布上和持续时间内足以危害人和生物界的生存与发展,即称该空间单元为重点污染源。对于点源而言,重点污染源主要包括流域内排污较高的重点行业、重点工业、重点工厂等。与之相对应的,由于非点源污染发生的广泛性和区域性,水环境污染的产生总是由流域大范围内的多个空间单元共同作用造成的。通常,受气候、水文、地形、土壤、土地利用和管理方式等众多因素的影响,非点源污染空间变异性强,流域内各空间单元的污染负荷差异显著。根据已有研究成果,就流域整体而言,少数区域输出的污染物往往占据全流域污染负荷的绝大部分(Kovacs et al., 2012)。非点源污染优先控制区即指流域内对水环境质量有着决定性影响的敏感区域。显然,由于非点源污染存在显著的空间差异性,且非点源污染控制措施需要投入大量的人力、财力、物力,因而在制定非点源污染防治规划时,并非一定要在全流域实施全面治理(Rao et al., 2009)。相反,识别出流域内的污染高负荷区,再根据各区的污染发生风险顺序,将治理重点和有限的资源投入到流域内污染负荷最高且对水体危害可能性最大而范围相对较小的敏感地区和地段,优先加强管理措施并安排治理工程的布局,则可以提高投资效益并节约土地资源,大大降低污染控制工作的难度,更好地实现预期的治理目标,协调人类开发活动和环境保护工作之间的矛盾。可以说,优先控制区识别已成为流域非点源污染控制的理念和关键所在。在制定流域水环境污染控制方案时,按照优先次序依次治理对水环境最不利的污染源,已成为国外流域非点源污染控制的基本思路(Qiu, 2009)。

此外,从控制措施的角度,非点源污染控制往往需要结合小尺度微景观变量或工程措施,如河岸带植被生态系统、滞留池或人工湿地等,来减少或消除农业生产等人类活动带来的影响和危害(李明涛等, 2013)。优先控制区使得非点源污染控制更有针对性,如减少农田生态系统的化学品投入是控制非点源污染的有效方法,但这一措施往往会以牺牲农产品的产量为代价,因而难以大面积推广;而建立植被缓冲区、树篱等绿色廊道和湿地等生态工程措施则需要占有一定数量的土地资源,亟需寻找出非点源污染产出的关键区域进行相对集中的污染控制(沈

珍瑶等, 2012)。美国等发达国家将基于优先控制区的污染控制措施设置方法称为靶标定位法。研究表明, 在优先控制区内布设管理或工程等污染控制措施可更有效地削减流域非点源污染, 实现流域水环境的保护。可以说, 明确非点源污染优先控制区并从管理的角度进一步探讨影响污染输出的关键因素, 可以使控制措施有的放矢, 从而为流域非点源污染控制提供更为有利的视角。

从我国现行的重点污染源调查技术来看, 工业源等各类点源污染往往是在多年环境统计工作的基础上开展的, 重点污染源相关指标的选择、解释乃至计算方法是与现行的环境统计资料是一致的。因此, 在工业源和生活源大口径一致的前提下, 基于国内现有的污染源普查数据和各级别环保部门日常管理所掌握的数据, 更容易获取点源污染重点污染源的分布地区和行业情况, 更重要的是点源污染也是相对容易控制的。然而, 农业种植业、畜禽养殖、农村生活等非点源污染源尚未纳入我国的常规环境统计中, 且国内独特的种植业生产模式、畜禽养殖场污染排放方式和农村生活污染特征也使得优先控制区识别往往需要关注不同的调查范围、计算方法以及识别技术。这大大加剧了非点源污染优先控制区识别的难度。本书正是在这种背景下编著的, 为广大读者提供合理的优先控制区识别方法也是作者编著本书的初衷。

1.2.2 基本流程

流域非点源污染的重点区域, 其空间分布往往是与流域气候特征、自然地理环境、社会经济发展状况等紧密相关, 其影响因素往往是众多且错综复杂的。只有全面而重点地了解非点源污染源的各种特征值, 如污染物的种类、数量、性质及其时空分布规律, 才有可能真正实现非点源污染的有效控制和科学管理, 从而达到防止水环境污染、保护流域自然环境的目的。从这一根本目的出发, 非点源污染优先控制区识别的基本流程, 不仅包括了流域系统污染物质的产生过程, 即污染源的时空分布特征, 也包括了汇水区系统与水环境系统的结合部, 即污染物的排放特征。如果从受纳水体环境的角度, 还应该包括污染物从流域系统排放到水环境系统特定位置的部分, 即污染物在水环境中的迁移转化特征。只有把整个流域当成一个系统来研究, 才有利于将汇水区系统和水环境系统有机地结合在一起, 把环境损益和社会效益统一起来, 进而促进环境保护与区域社会经济的同步发展。图 1-1 简明地揭示了非点源污染发生的过程和对环境污染的认识与控制过程。

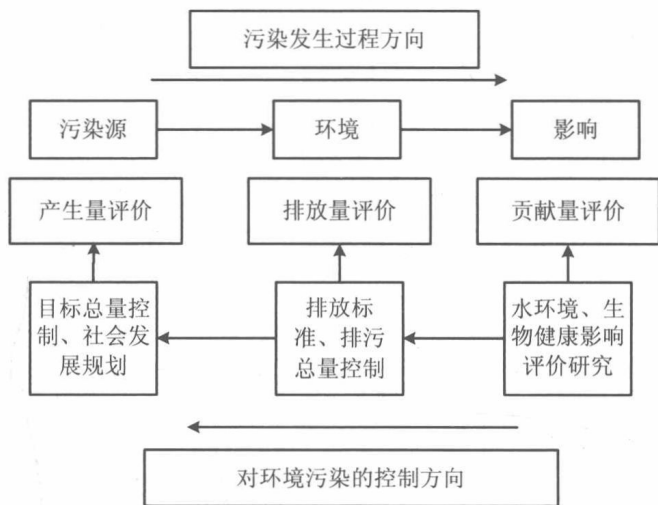


图 1-1 非点源污染发生过程及其对应的管理方案

与之相对应的是，优先控制区识别也可简要地划分为基于污染发生过程、基于污染排放过程和基于污染影响三部分。因此优先控制区识别也包括了三层内容，一是在整个流域内识别出非点源污染发生风险高的区域，即关键源区的识别；二是量化各污染物的排放量，圈定流域内对水环境污染影响较大的地段和部位；三是评估受纳水环境的响应，以采取针对性的调控措施，提高投资效益和治理成效，达到事半功倍的效果。其中有效的污染源调查、非点源污染空间分布核定、关键源区识别以及评估标准确定是优先控制区识别的基础，也是优先控制区识别的一般流程。相关流程如图 1-2 所示。

该流程包括 5 个主要步骤：①根据各空间单元内的污染源特征开展资料收集整理，这里应包括污染源强的核定，收集的资料应满足非点源污染时空分布估算方法的准确性和数据的合理性、有效性，从而实现与优先控制区的对应。②进一步评估地表水通量以及污染物进入受纳水体的途径，并以此核定非点源污染时空分布特征，编制污染物的排放清单，为优先控制区识别提供基础。③根据污染物在流域的迁移转化过程，核定、调查或估算各空间单元的污染物产生量、排放量、贡献量，识别流域内的主要污染源。④根据研究目的选择合适的评估标准和评估方法，在此基础上开展优先控制区识别。⑤基于优先控制区内非点源污染的关键影响因素，选择合适的污染控制措施，在此基础上完成流域非点源污染控制方法的编制。对该流程的前 2 个步骤在此作简要说明，第 3 个步骤和第 4 个步骤是本书的重点，具体内容可见本书的 2~5 章。第 5 个步骤从略。