城市面源污染物排放量监测技术方法研究

王军霞¹, 唐桂刚^{1*}, 罗彬², 李纳², 景立新¹, 傅德黔¹

(1.中国环境监测总站 北京 100012; 2.四川省环境监测中心站 四川 成都 610014)

摘要 我国城镇化水平快速发展,基础设施建设不完善,城市面源压力较大,但我国城市面源研究和管理均较滞后。城市面源污染呈现初始冲刷效应,并且不同城市下垫面和不同功能区的污染特性有比较明显的差异。基于对城市面源污染特征的研究,按照城市面源的形成与转移过程,针对城市面源不同尺度的体现,文章提出3种城市面源污染物排放量监测方法:基于城市下垫面监测、基于雨水/雨污合流排放口、基于地表径流监测的排放量监测。这3种方法之间存在逻辑校验关系,又存在各自的适用条件,在有条件的地区运用不同方法进行监测,并根据实测结果优化布点、频次等监测方案,从而形成较为规范的城市面源监测方法,具有现实意义。

关键词 城市面源; 排放量监测; 城市下垫面

中图分类号 X832 文献标志码 A doi:10.3969/j.issn.1003-6504.2013.08.012 文章编号:1003-6504(2013)08-0054-05

Methods of Urban Non-point Source Pollutant Emissions Monitoring

WANG Jun-xia¹, TANG Gui-gang^{1*}, LUO Bin², LI Na²,

JING Li-xin¹, FU De-qian¹

(1.China National Environmental Monitoring Centre, Beijing 100012 China;

2.Sichuan Environmental Monitoring Centre, Chengdu 610014 China)

Abstract: The urbanization develops rapidly in China, with imperfect construction of infrastructure facilities and great pressure of urban non-point source pollution, however the research and management of urban non-point source relatively lag behind. Urban non-point source pollutant presents a first flush effect. Besides, there is obvious differences of urban non-point source characteristics in different city underlying surfaces and different functional areas. Based on the research of the characteristics of urban non-point pollution, according to the process of formation and transfer of urban non-point source, and the manifestation of different scales for urban non-point source, this paper puts forward the methods of urban non-point source pollutant monitoring based on urban underlying surface, outfall of rain or sewage, monitoring of surface runoff. These three methods have relations and respective applying conditions. In the area where conditions permit, it is significant to form a standardized method of urban non-point source pollutant emissions monitoring by using different methods and optimize stationing and frequency based on the measured results.

Key words: urban non-point source; emission monitoring; urban underlying surface

降雨径流污染即通常意义(狭义)上的面源污染,是指溶解的或固体的污染物从非特定的地点,随降雨产生的地面径流进入受纳水体(河流、湖泊、水库、海湾等)引起的污染^[1]。城市面源污染是指城区降雨径流污染,即降雨冲刷城市地表,携带地表沉积物中的污染物质,对城市周边受纳水体造成的污染。

面源污染在美国等西方国家自20世纪60年代率先开展研究,并得到长足进步,成为国际上环境问题研究的活跃领域之一^[2-6]。我国的面源污染研究始于20世纪80年代的湖泊富营养化调查,真正意义上的城市面源污染研究始于北京市径流污染研究^[7],其后在苏州^[8]、杭州^[9]、上海^[10]、南京^[11]、成都^[12]等城市开展了城市面源污染研究。

《环境科学与技术》编辑部(网址)http://fjks.chinajournal.net.cn(电话)027-87643502(电子信箱)hjkxyjs@126.com

收稿日期 2013-01-24,修回 2013-04-19

基金项目 国家水专项课题:水污染源监测监管技术体系研究(2009ZX07527-002)

作者简介 王军霞(1984-)女,工程师,硕士,主要研究方向为环境统计与污染源监测(电话)010-84943175(电子信箱)wangjx@cnemc.cn,*通讯作者,(电子信箱)tanggg@cnemc.cn。

我国城镇化水平快速发展,基础化设施建设不完善。1949 年以来,经过几十年的发展,我国的城市建设出现了显著变化。但很多新城建设缺乏统一规划,有些在理念上存在着误区:在城市雨水排放设计方面偏重于考虑洪水威胁,过于强调快排快泄,不考虑面源水污染问题和资源的利用;在城市水环境建设中重景观、轻环境,重地上、轻地下,重近期效益、轻长远发展的现象十分普遍^[13]。

我国城市面源污染治理未在管理层面上得到重视,相关研究工作也相对薄弱,城市面源对环境质量的影响底数不清。目前,首先要明确界定面源污染的“源”及其“通量”,做到有的放矢,这是面源污染治理的一项基础工作和前提^[14]。尤其是在我国污染物总量减排工作中取得了较为显著的成效,而全国环境污染形势依然严峻的情况下,研究城市面源等非点源对环境质量的影响就显得非常的重要。

1 城市面源污染排放特征

1.1 初始冲刷效应

在通常情况下,初期雨水径流的污染物含量在整个径流过程中是最高的,这种现象被称为降雨初始冲刷效应(first flush effects, FFE),是城市面源污染过程的基本特征^[15]。初期冲刷效应使得初期径流携带大量污染物进入受纳水体。

1.2 不同城市下垫面面源污染特性

针对不同城市下垫面污染特征国内外学者做了大量相关研究,SS、COD、BOD 浓度基本表现为屋面<庭院<道路,不同材质的屋面污染特征有所差异,交通量对道路污染有影响^[16-22]。

1.3 不同功能区面源污染特性

由于人类活动的影响,城市被划分为商业区、居住区、工业区、交通区、餐饮区等不同的功能区,城市面源污染在这些不同的功能区也体现出不同的污染特性,而不同污染物各功能区之间的关系有所差异^[23-27]。

2 城市面源污染物排放量监测技术框架

2.1 3 种城市面源污染物排放量监测技术方法

城市面源是随着城市径流的形成与转移而形成并排入自然环境的。根据城市面源的形成过程,可以将城市面源排放和体现划分为 3 个不同的尺度。城市径流首先在不同下垫面上形成,并通过冲刷的方式形成城市面源。下垫面范围的城市面源是最小尺度的面源体现,也是城市面源的直接体现。一定汇流区域内,不同下垫面的径流最终汇流,在这个尺度范围内,城市面源为该汇流区域内,不同下垫面城市面源的综合体

现是城市面源中观尺度的体现。整个城市范围内,所有汇流区域城市面源的整体体现是城市面源较大尺度的体现。

针对城市面源 3 个不同尺度的体现,可以采取 3 种方法开展面源监测。方法一:基于城市下垫面监测的排放量监测;方法二:基于雨水/雨污合流排放口的排放量监测;方法三:基于地表径流监测的排放量监测。

2.2 基于城市下垫面监测的排放量监测技术

2.2.1 方法概述

该方法首先将城市区域范围按照水文效应和面源污染特性的不同划分为若干类的下垫面。然后,每类下垫面中选取一定比例的点进行排放量监测。最后,根据选取的典型点位的监测结果,推算整个城市区域范围的面源污染物排放量。

计算公式如下:

$$P = \sum_{i=1}^n C_i Q_i / \gamma_i \quad (1)$$

式(1)中: P 为城市面源污染物排放总量; C_i 为下垫面径流污染物浓度; Q_i 为不同下垫面地表径流量; γ_i 为不同下垫面占整个城市该类下垫面的百分比。

2.2.2 技术要点

(1)下垫面的划分与选择。该方法首先需要根据不同城市下垫面、不同功能区,将城市区域范围划分为若干类别的下垫面,选择典型下垫面进行监测。目前,国内外研究城市面源时,对下垫面类别的划分没有统一的标准。本文根据不同下垫面城市面源污染特征,以及受人类活动影响大小的不同,将城市下垫面分为屋面、庭院、道路、水面。其中屋面还可以根据材质的不同,分为陶瓦、水泥、沥青等。由于小区道路和庭院在下垫面透水性、人类活动影响等方面都有很强的相似性,因此,本文认为可以将小区道路归为庭院。根据道路受车辆等影响大小,将道路分为主干道和一般公路。

(2)监测频次确定。监测频次关系着监测结果的代表性,从而影响总量测算结果的可靠性。城市面源的监测频次主要依据城市面源的冲刷曲线确定。由于降雨前期,污染物浓度较高,且变化较快,累积污染负荷较高,应采用较密的监测频次。而降雨后期,污染物浓度趋于稳定,可以降低监测频次。国内外现有研究监测中,降雨前期多采取 5~10 min 的监测频次。

(3)径流量计算。径流量可以通过实际监测获得,也可以通过模型进行计算。降雨量的监测技术相对成熟,而对城市下垫面的径流监测则存在很多操作上的难题。国际上,有较为成熟的径流技术模型,根据降雨量的大小,估算出不同下垫面的径流量。本文认为,实

际监测方法既存在操作上的困难,而且监测误差范围不易控制,采取模型进行径流量计算是比较好的选择。常见的径流量计算模型有径流曲线法(简称 SCS 法)和径流系数法^[14]。

2.3 基于雨水/雨污合流排放口的排放量监测技术

2.3.1 方法概述

该方法的核心思想是通过监测一定汇流区域内雨水或雨污水中污染物排放量,从而得出该汇流区域内的面源污染物排放量,进而推算整个城市面源的污染排放总量。根据由汇水区域向整个城市推广的方法不同,可以将该方法分为 2 种。

(1)比例推算法。典型汇流小区与整个城市下垫面的组成相似,或者对城市面源排放总量数据精度要求不高,可以采取比例推算法由典型汇流小区污染物排放总量推算整个城市面源污染物排放总量。该方法是指通过监测获得典型汇流小区雨水/雨污合流排放的污染物浓度和流量,同时调查典型汇流小区总面积占整个城市建成区总面积的比例,根据典型汇流小区占整个城市建成区面积的比例,由监测结果推算整个城市面源污染物排放总量。

$$P = \left(\sum_{t=1}^t C_t Q_t - P_0 \right) \div \eta \quad (2)$$

式(2)中 P 为面源污染物排放总量; C_t 为汇流小区雨水污染物 t 时刻时的浓度; Q_t 为汇流小区雨水 t 时刻时的累积流量; P_0 为雨污排放口本底污染物排放量; η 为汇流小区面积占城市总面积的比例;

(2)单位综合下垫面排放强度法。若典型汇流小区与整个城市下垫面的组成差异大,就不能简单地通过面积占比推算整个城市面源污染总量。这种情况下,由典型汇流小区的污染物排放量推算整个城市的面源污染物排放量,则需要获得单位综合下垫面面源污染物的排放量。单位综合下垫面面源污染物的排放量是指将典型汇流小区总的污染物排放量除以该小区综合下垫面面积。综合下垫面面积是指不同下垫面的加权求和结果。权重为各类下垫面的次降雨径流平均浓度与单位面积雨水径流量的乘积与各类下垫面次降雨径流平均浓度与单位面积雨水径流量的乘积的比值。其中,各类下垫面的污染排放权重可以借鉴国内外相关研究或者基于实际监测的结果。计算公式为:

$$p = P_n / S_n \quad (3)$$

$$P = \sum_{t=1}^t C_t Q_t - P_0 \quad (4)$$

$$S_n = \sum_{i=1}^i a_i S_i \quad (5)$$

$$a_i = EMC_i \times Q_i / EMC_0 \times Q_0 \quad (6)$$

式(3)~(6)中 p 为单位综合下垫面的面源污染物

的排放量; P_n 为汇流小区面源污染物排放总量; S_n 为汇流小区综合下垫面面积; C_t 为汇流小区雨水污染物 t 时刻的浓度; Q_t 为汇流小区雨水 t 时刻的累积流量; P_0 为雨污排放口本底污染物排放量; S_i 为汇流小区内 i 类下垫面的面积; a_i 为 i 类下垫面单位面积污染物排放权重; EMC_i 为 i 类下垫面的次降雨径流平均浓度; Q_i 为 i 类下垫面单位面积雨水径流量; EMC_0 为各类下垫面的次降雨径流平均浓度; Q_0 为各类下垫面单位面积雨水径流量。

整个城市区域面源污染物排放量总量为单位综合下垫面的面源污染物的排放量与城市综合下垫面面积之和的乘积。其中城市综合下垫面面积之和为各类下垫面的加权求和值。

$$P = p \times S \quad (7)$$

式(7)中 P 为城市面源污染物排放总量; p 为单位综合下垫面的面源污染物排放量; S 为城市综合下垫面面积。

2.3.2 技术要点

(1)选择汇水区域,确定汇水边界。城市地形复杂,城市径流流向四通八达,一定区域范围的面源并不一定能够汇流到统一的排口,因此,运用该方法进行城市面源的监测,最关键的是选择汇水区域。该汇水区域的城市径流流向要明晰,整个汇水区域范围内的城市径流最终汇流到同一个排放口(雨水排放口或雨污合流排放口),这样通过监测汇流后的排放口的污染物排放量,就可以获得该汇水区域范围的城市面源总量。选择汇水区域,需要调查城市地形和下水道管网图,确定雨水流向,找到能够反映一定面积汇水域雨水排放情况的排放口。

(2)确定不同下垫面排放权重。确定不同下垫面的排放权重是通过汇水区域城市面源排放量推算整个城市面源排放总量的基础。不同下垫面的排放权重是基于不同下垫面的排放监测结果而获得,具体的监测方法同基于城市下垫面监测的城市面源排放监测中的方法。该权重既可以通过实测获得,也可以通过现有的研究基础获得,不需要在每次监测时重复测定。

2.4 基于地表径流监测的排放量监测技术

对于整个城市区域的面源污染有确定的目标河流,且城市径流流向比较确定的城市,可以通过监测城市径流流入的目标河流上下游的水污染物排放通量获得城市面源的排放量情况。

$$P = P_{\text{下}} - P_{\text{上}} = C_{\text{下}} Q_{\text{下}} - C_{\text{上}} Q_{\text{上}} \quad (8)$$

式(8)中 P 为城市面源污染物排放总量; $P_{\text{下}}$ 为目标河流下游污染物通量; $P_{\text{上}}$ 为目标河流上游污染物通量; $C_{\text{下}}$ 为目标河流上游污染物浓度; $Q_{\text{下}}$ 为目标河流

上游径流流量; $C_{上}$ 为目标河流上游污染物浓度; $Q_{上}$ 为目标河流上游径流流量。

2.5 3种监测技术之间的关系

理想状况下,3种监测技术方法均可以获得城市面源污染物排放总量,3种方法获得的排放总量应可比。

而实际情况下,由于3种方法是针对城市面源形成与转移的不同环节,在不同尺度上开展的监测,监测结果的代表性是有所差异的。方法一是对城市面源的选择性监测,监测点位的选择是否具有代表性直接决定了监测结果是否能够反应城市面源的排放总量;方法二是对城市中一定汇水区域范围城市面源排放结果的综合监测,监测结果能够较好地代表监测区域范围的城市面源;方法三是对城市面源综合排放量的直接监测。

考虑到具体操作,方法一具有比较广的适用性,在各个城市均可以用该方法进行城市面源的监测,而方法二和方法三对城市的自然条件要求较高,并不适宜广泛推广,只有在容易划定汇水域边界,雨污排出口(雨排口)规范,具备监测条件的城市才可以选用方法二,对于整个城市区域的面源污染有确定的目标河流,且城市径流流向比较确定的城市适用方法三。但是,方法一对监测点位的代表性要求高,因此,监测点位的选择尤为重要,需要专门研究监测点位的选择方法。可以在一定汇水区域范围内,通过方法二的监测数据校验方法一监测结果,从而确定监测点位选择原则与方法。

3 主要结论和建议

(1)按照城市面源的形成与转移过程,针对城市面源不同尺度的体现,可以采取3种方法开展面源监测:基于城市下垫面监测、基于雨水/雨污合流排出口、基于地表径流监测的排放量监测。这3种方法之间存在逻辑校验关系,又存在各自的适用条件。基于城市下垫面监测的排放量监测技术适用性最广,但对布点的代表性要求高。基于雨水/雨污合流排出口的排放量监测技术、基于地表径流监测的排放量监测技术对城市自然条件要求高,并非所有城市都可使用。但由于这2种方法是对城市面源综合排放量的直接监测,可以用于检验基于城市下垫面监测的排放量监测技术中布点的代表性,提高该方法的科学性。

(2)建议在有条件的地区运用不同方法进行监测,优化城市面源监测方案。对于城市面源监测,监测布点、监测频次设置是决定监测结果是否可靠的关键因素,但用一种方法很难验证采样点、监测频次设置的

是否合理,监测结果是否能够反映城市面源的总体排放水平。因此,选择有条件的地区,选择范围较小,监测结果基本可控的范围,运用上述2种甚至3种监测方法对城市面源总量同时进行监测,通过对比分析监测结果,调整和优化监测方案,形成城市面源监测技术指南,从而使得城市面源监测技术便于推广,为摸清全国城市面源排放总量具有非常重要的意义。

[参考文献]

- [1] Novotny V, Olem H. Water Quality: Prevention, Identification and Management of Diffuse Pollution[M]. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1993: 2-6.
- [2] 袁铭道. 美国水污染控制和发展概况[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1986.
Yuan Ming-dao. Water Pollution Control and Development Overview in U S[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1986. (in Chinese)
- [3] 汪慧贞, 李宪法. 北京城区雨水径流的污染及控制[J]. 城市环境与城市生态, 2002, 15(2): 16-18.
Wang Hui-zhen, Li Xian-fa. Pollution of runoff from Beijing urban area and its control[J]. Urban Environment and Urban Ecology, 2002, 15(2): 16-18. (in Chinese)
- [4] 李宝贵, 尹澄清, 单宝庆. 非点源污染控制与管理研究的概况与展望[J]. 农业环境保护, 2001, 20(3): 190-191.
Li Bao-gui, Yin Cheng-qing, Shan Bao-qing. Current situation and prospect of control and management on non-point source pollution[J]. Agro-environmental Protection, 2001, 20(3): 190-191. (in Chinese)
- [5] 胡艳, 张洪举. 非点源污染计算与控制研究进展[J]. 安徽农业科学, 2003, 31(5): 788-790, 824.
Hu Yan, Zhang Hong-ju. Research progress of calculation and control of non-point source pollution[J]. Journal of Anhui Agricultural Science, 2003, 31(5): 788-790, 824. (in Chinese)
- [6] 郑一, 王学军. 非点源污染研究的进展与展望[J]. 水科学进展, 2002, 13(1): 105-110.
Zheng Yi, Wang Xue-jun. Advances and prospects for nonpoint source pollution studies[J]. Advances in Water Science, 2002, 13(1): 105-110. (in Chinese)
- [7] 夏青. 城市径流污染系统分析[J]. 环境科学学报, 1982, 2(4): 271-277.
Xia Qing. Study on pollution system of urban runoff[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 1982, 2(4): 271-277. (in Chinese)
- [8] 温灼如, 苏逸深, 刘小靖, 等. 苏州水网城市降雨径流污染的研究[J]. 环境科学, 1986, 7(6): 2-6.
Wen Zhuo-ru, Su Yi-shen, Liu Xiao-jing, et al. Study on water network rainfall runoff pollution in Suzhou[J]. Environmental Science, 1986, 7(6): 2-6. (in Chinese)
- [9] 吴林祖. 杭州城市径流污染特征的初步分析[J]. 上海环境科学, 1987(6): 33-36.

- Wu Lin-zu. Preliminary analysis of urban runoff pollution characteristics in Hangzhou[J]. Shanghai Environmental Science, 1987(6) :33-36.(in Chinese)
- [10] 林莉峰, 李田, 李贺. 上海市城区非渗透性地面径流的污染特性研究[J]. 环境科学, 2007, 28(7) :1430-1434.
Lin Li-feng, Li Tian, Li He. Characteristics of surface runoff pollution of Shanghai urban area[J]. Environmental Science, 2007, 28(7) :1430-1434.(in Chinese)
- [11] 刘曼蓉, 曹万金. 南京市城北地区暴雨径流污染研究[J]. 水文, 1990(6) :15-23.
Liu Man-rong, Cao Wan-jin. North urban area of Nanjing stormwater runoff pollution[J]. Hydrology, 1990(6) :15-23.(in Chinese)
- [12] 陈西平, 廖仿明. 成都城市降雨径流水体中氮磷含量及分布特征[J]. 上海环境科学, 1991, 7(12) :34-368.
Chen Xi-ping, Liao Fang-ming. Chengdu urban rainfall runoff of nitrogen and phosphorus in water content and distribution characteristics[J]. Shanghai Environmental Science, 1991, 7(12) :34-368.(in Chinese)
- [13] 尹澄清. 城市面源污染问题: 我国城市化进程的新挑战[J]. 环境科学学报, 2006, 26(7) :1053-1056.
Yin Cheng-qing. Urban diffuse pollution: a new challenge to the rapid urbanization in China[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2006, 26(7) :1053-1056.(in Chinese)
- [14] 尹澄清. 城市面源污染的控制原理与技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
Yin Cheng-qing. Urban Diffuse Pollution Control Principles and Technologies [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2009.(in Chinese)
- [15] Yusop Z, Tan L W, Ujang Z, et al. Runoff quality and pollution loadings from a tropical urban catchment[J]. Water Science and Technology, 2005, 52(9) :125-132.
- [16] Gromaire Mertz M C, Garnaud S, Gonzalez A, et al. Characterisation of urban runoff pollution in Paris[J]. Wat Sci Tech, 1999, 39(2) :1-8.
- [17] Clark D L, Asplund R. Composite sampling of highway runoff[J]. Envir Engrg Division, ASCE, 1981, 107(EE5) :1067-1081.
- [18] Wu J S, Allan C J. Characterization and pollutant loading estimation for highway runoff[J]. Envir Engrg ASCE, 1998, 124(7) :584-592.
- [19] 侯培强, 王效科, 郑飞翔, 等. 我国城市面源污染特征的研究现状[J]. 给水排水, 2009, 35 :188-193.
Hou Pei-qiang, Wang Xiao-ke, Zheng Fei-xiang, et al. Research on China's urban non-point source pollution [J]. Water and Wastewater Engineering, 2009, 35 :188-193.
- [20] Geiger W. Flushing Effects in Combined Sewer Systems[A]. Proceedings of the 4th International Conference Urban Drainage[C]. Lausanne, Switzerland, 1987, 4 :40-46.
- [21] 车伍, 刘燕, 李俊奇. 国内外城市雨水水质及污染控制[J]. 给水排水, 2003, 29(10) :38-42.
Che Wu, Liu Yan, Li Jun-qi. Domestic and international urban stormwater quality and pollution control[J]. Water and Wastewater Engineering, 2003, 29(10) :38-42.(in Chinese)
- [22] 赵磊, 杨逢乐, 王俊松, 等. 合流制排水系统降雨径流污染物的特性及来源[J]. 环境科学学报, 2008, 28(8) :1562-1570.
Zhao Lei, Yang Feng-le, Wang Jun-song, et al. Characterization of storm water pollutant sources in a combined sewer network[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2008, 28(8) :1562-1570.(in Chinese)
- [23] 赵剑强. 城市地表径流污染与控制[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
Zhao Jian-qiang. Urban Surface Runoff Pollution Control [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.(in Chinese)
- [24] 蒋海燕, 刘敏, 顾琦, 等. 上海城市降水径流营养盐氮负荷及空间分布[J]. 城市环境与城市生态, 2002, 15(1) :15-17.
Jiang Hai-yan, Liu Min, Gu Qi, et al. Nutrient nitrogen loading and spatial distribution of stormwater runoff in Shanghai[J]. Urban Environment and Urban Ecology, 2002, 15(1) :15-17.(in Chinese)
- [25] 常静, 刘敏, 许世远, 等. 上海城市降雨径流污染时空分布与初始冲刷效应[J]. 地理研究, 2006, 25(6) :994-1002.
Chang Jing, Liu Min, Xu Shi-yuan, et al. Temporal-spatial distribution and first flush effect of urban stormwater runoff pollution in Shanghai[J]. Geographical Research, 2006, 25(6) :994-1002.(in Chinese)
- [26] 王吉苹, 朱木兰. 厦门城市降雨径流氮磷非点源污染负荷分布探讨[J]. 厦门理工学院学报, 2009, 17(2) :57-61.
Wang Ji-ping, Zhu Mu-lan. Nitrogen and phosphorus non-point pollution for urban stormwater runoff in Xiamen [J]. Journal of Xiamen University of Technology, 2009, 17(2) :57-61.(in Chinese)
- [27] 李立青, 朱仁肖, 郭树刚, 等. 基于源区监测的城市地表径流污染空间分异性研究[J]. 环境科学, 2010, 31(12) :2896-2904.
Li Li-qing, Zhu Ren-xiao, Guo Shu-gang, et al. Research on spatial differentiation of urban stormwater runoff quality by source area monitoring[J]. Environmental Science, 2010, 31(12) :2896-2904.(in Chinese)