

Current Situation and Prospect of Urban Non-Point Source Pollution Research

Hanliang Gui, Chunping Zhang*

Wuhan Institute of Technology, Wuhan Hubei

Email: 1358224614@qq.com, *zhangchunping@chinhangroup.com

Received: Oct. 31st, 2019; accepted: Nov. 18th, 2019; published: Nov. 25th, 2019

Abstract

With the city industrial wastewater discharge and other point source pollution has been effectively controlled, the proportion of urban water environment pollution from non-point sources is increasing. Based on the research status at home and abroad, this paper introduces the concept, impact, and emission characteristics of non-point source pollution, as well as the control measures of urban non-point source pollution, and pointed out that the research on non-point source pollution will be the future development trend of sponge city reconstruction.

Keywords

Urban Non-Point Source Pollution, Emission Characteristics, Engineering Measures, Sponge City Transformation

城市面源污染研究现状及展望

桂晗亮, 张春萍*

武汉工程大学, 湖北 武汉

Email: 1358224614@qq.com, *zhangchunping@chinhangroup.com

收稿日期: 2019年10月31日; 录用日期: 2019年11月18日; 发布日期: 2019年11月25日

摘要

随着城市工业废水排放等点源污染得到有效的控制,城市水环境污染中来源于面源污染的比例逐年提高。本文结合国内外的研究现状,介绍了面源污染的概念、影响、排放特征及相关的控制措施,提出了城市面源污染的相关研究对接海绵城市改造为今后的发展趋势。

关键词

城市面源污染, 排放特征, 工程措施, 海绵改造

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年以来, 随着我国经济水平的迅速提高、城市化的进程越来越快, 我国水污染的问题已不容乐观。如国内的太湖蓝藻水华爆发、兰州自来水厂污染等, 国外的日本水俣病事件、莱茵河剧毒污染事件等, 重大的水污染事故频发, 水环境污染问题已日渐成为中国社会乃至国际社会必须考虑的问题。

水环境污染, 是指在人为因素直接或间接的影响下, 污染物质进入水体, 使其物理、化学或生物特性发生改变, 以致影响水的正常用途和水生态系统的平衡、危害国民健康和生活环境[1]。

水污染源根据进入水体的途径方式的不同可以分为点源、面源和内源; 点源污染一般包括企业排放污水、城市生活废水排放, 有明显的负责人, 这种污染一般易于管控和处理。城市面源污染是指在降水条件下, 雨水等形成的径流冲刷城市地面, 使平时积聚于地面的污染物从非特定的地方汇入受纳水体, 引起的水体污染[2], 这种污染源没有明确的负责人, 且不利于控制; 内污染源指已经进入水体、平时累积在底泥或其他地域的污染物, 在一定条件下又被重新释放出来。

城市的快速发展, 一方面造成污染负荷量增大, 如工业排放污染和城市机动车交通量增加, 另一方面造成城市自然处理、净化能力下降, 如城市绿化率减少, 不透水下垫面比例增加等, 均造成城市地表污染物不断增加。在国外发达国家, 由于点源污染基本得到有效地控制, 径流所造成的面源污染已经成为城市受纳水体污染的主要因素, 如美国约有 60% 的河流和 50% 的湖泊污染与面源污染有关。国内由于雨水径流而造成的城市面源污染问题也很严峻, 资料表明, 国内 90% 以上城市水体污染严重, 经过初步估算, 其中北京和上海城区雨水径流污染占水体污染负荷的比例约占 10% 左右, 并在逐年上升。

2. 城市面源污染对水环境的影响及排放特征

2.1. 城市面源污染对水环境的影响

随着我国城镇化进程的加快, 不透水的硬化地面面积比例越来越大, 城市路面通行车流量也越来越多, 由雨水径流所产生的城市面源污染已成为城市水环境恶化的重要原因之一。资料表明, 在我国 90% 以上城市水体污染严重, 大部分城市的水体有黑臭现象或富营养化, 严重影响我国城市的可持续发展和对周边城市圈的辐射影响[3]。

城市面源污染物主要来源于城市地表所累积的污染物, 城市地表累积污染物主要包括重金属污染物 (Cd、Pb 等)、多环芳烃类有机物、氮磷等营养物质, 这些污染物大多来源于人类活动如汽车尾气、工业废物、植物施肥等改变自然环境属性的行为。由于这些污染物的危害很大, 容易对自然环境和人体健康造成很大的危害。下面对城市面源污染物中耗氧有机物、有毒污染物两种具有代表性的污染物质进行阐述。

1) 耗氧有机物对城市水体的影响

城市地表径流携带大量的耗氧有机物进入城市的自然水系中, 一方面, 大量的耗氧有机物造成水中

的溶解氧迅速消耗, 给城市自然水系里的需氧水生物造成很大的影响, 如 2007 年武汉市蔡甸区的暴雨污染事件, 造成大面积水生物缺氧死亡。另一方面, 耗氧有机物所携带的大量有机物氨态氮、硝酸盐、氮和磷酸盐等植物营养元素通过城市排水系统直接进入城市自然水系, 容易造成水系统中的富营养化。

2) 有毒污染物对水质的影响

有毒污染物包括人造有机物和重金属[1]。20 世纪 40 年代以来, 人类为满足现代化的生产、生活需要, 大规模的使用人工合成化合物和重金属的物质, 产生了大量对环境有害的物质, 并且这些有害物质在自然条件下很难被分解, 能够在自然界中长时间的存在, 对人类的健康存在着很大的潜在危害[4]。在水生生态系统中, 大量的有害物质由于种种人为因素直接排放入自然水体中, 从而进入了食物链, 人类处于食物链的顶端, 由于食物链的富集作用, 导致有毒物质在食用受污染生物的人类体内积累, 对人类的健康造成极大的危害。如 1956 年的日本水俣病事件, 就是由于未经处理的大量工业废水直接排放污染造成的公害病。

2.2. 城市面源污染特征

研究表明, 城市降雨径流向接纳水体输入的污染负荷占很大的比例, 是引起城市水环境质量恶化的主要原因[5]。城市地表径流中的污染物主要来自降雨对城市地表的冲刷[6]。道路径流是城市地表径流中污染程度最高的部分, 严重影响着城市水体水质[7]。通过对城市面源污染排放特征的研究, 有利于对城市面源污染物的监测与控制, 能够为相关治理措施提供理论支持。

1) 初期冲刷效应

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期冲刷效应(First Flush Effects, FEE), 是城市面源污染过程的基本特征[3]。初期冲刷效应使得初期径流携带大量污染物进入接纳水体。

2) 不同城市下垫面源污染特性

有大量研究表明, 不同材质的城市下垫面, 其污染物特征也不同; 如 SS、COD、BOD 浓度表现为道路 > 屋面[8]; 城市路面材质的差异性也对面源污染有很大的相关性。

3) 不同功能区和区域面源污染特性

根据人类的活动, 城市可被划分为商业区、居住区、工业区、交通区、餐饮区等不同的功能区[9], 人们对土地的利用形式和水污染有着关系[10], 城市面源污染在不同的功能区体系体现不同的特性, 而不同污染物各功能区之间的关系有所差异。

常静等对上海市市内四个不同功能区进行的测量监测数据中, 结果如表 1 所示, 污染物在不同功能区之间显示出相似分布趋势, 能够体现不同功能区主要污染物含量也和区域有极大的关联性。

Table 1. Pollutant concentration of rainfall runoff in central Shanghai (mg/L)

表 1. 上海市中心城区降雨径流污染物浓度(mg/L) [11]

| 功能区 | TSS | COD | TP | NH ₃ -N | NO ₃ -N | NO ₂ -N |
|-----|----------|---------|-------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 交通区 | 1731.355 | 748.705 | 1.005 | 2.185 | 0.605 | 0.33 |
| 商业区 | 699.875 | 448.25 | 0.87 | 2.58 | 0.405 | 0.11 |
| 工业区 | 580.905 | 256.53 | 0.555 | 1.29 | 0.48 | 0.13 |
| 居民区 | 430.72 | 150.415 | 0.425 | 0.865 | 0.425 | 0.24 |

侯培强等对城市面源污染特性的研究中指出, 我国城市面源污染在全国的大尺度上存在着不同的污

染特性, 表 2 可以看出南方城市道路雨水径流中主要污染物浓度普遍高于北方城市, 具有一定的地域特征。

Table 2. Pollutant concentration of rainwater runoff from urban roads in China (mg/L)

表 2. 我国城市道路雨水径流污染物浓度(mg/L) [12]

| | SS | COD | BOD | TN | TP |
|---------------|--------|--------|-------|------|------|
| 南方城市均值 | 572.08 | 316.27 | 71.11 | 8.59 | 0.85 |
| 北方城市均值 | 436.01 | 238.67 | 39.29 | 6.65 | 0.64 |
| 特大城市均值 | 552.36 | 310.94 | - | 8.17 | 0.76 |
| 中等城市均值 | 340.03 | 199.13 | - | 6.04 | 0.89 |
| 地表水环境质量 V 类标准 | 150 | 40 | 10 | 2 | 0.4 |

3. 城市面源污染的研究现状

城市面源污染是指在降水的条件下, 雨水和径流冲刷城市地面, 使污染物进入受纳水体引起的环境问题[13]。城市降雨径流中包含大量的污染物, 使得其初期径流产生的污染负荷明显较高, 由城市面源引起的水环境污染已成为当前城市水环境综合治理中亟待解决的主要问题之一。我国城市面源污染研究开始于 20 世纪 80 年代, 从在北京多个城市相继进行, 但是仅局限于数据收集和观测以及进行概率统计分析和建立一些简单的经验公式, 大部分研究通过调查城区面源污染的宏观性质和基于国外模型的污染负荷研究[14]。几乎没有系统、全面的城市面源污染监测资料。

长期以来, 我国研究重点在点源污染控制方面, 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, 对于城市面源污染尚未给予足够的重视。美国、英国、荷兰等发达国家在 20 世纪 70 年代就已经对城市地表径流开展了大量的测试及研究工作; 我国城市地表水环境面源污染的研究起步较晚, 20 世纪 80 年代初才开始对北京的城市径流污染进行研究, 随后在上海、广州、西安、武汉、澳门、珠海、苏州等大中城市逐渐开展起来。

城市面源污染复杂多变性、监控困难等难题, 并且城市面源污染物的种类复杂、毒性大、随机性大等, 现在已经成为各国环境治理所必须要考虑的重要性问题。近几十年来各国都对其进行不同程度的研究, 从初期的观测统计, 收集面源污染物资料, 进而建立经验公式或概率公式进行有关预报与模拟, 最后发展到数学建模模拟和预测, 从简单的统计分析到后期的机理研究, 非点源污染研究正逐步走向成熟[15]。

在国外发达国家, 城市面源污染开始与 20 世纪 70 年代, 早期的研究工作重点在于大量实测数据的获取, 为后期的研究模型提供数据支持; 80 年代, 西方国家在大量的实测数据的支持下, 开发出了大量的统计模型、机理模型及管路和开发, 如著名的暴雨管理模型(SWMM)、贝特尔市城市径流管理模型、储存处理和流模型(STORM)、化学污染物径流负荷与流失模型(CREAMS)、非点源污染环境评价模型(ANSWERS)等[16], 在这些研究的基础上, 美国对城市和农村的面源污染控制提出了“最佳管理措施(Best Management Practices BMPs)”方案, BMPs 方案因高效、经济、符合生态学原则, 在世界范围内得到广泛的认可与应用。同时, 英国的可持续排水系统(SUDS)、新西兰的低环境影响开发技术(LID)等也同样是城市面源污染有效控制的经典实例; 90 年代引入的地理信息系统(GIS)技术应用于水环境面源污染的研究, 极大方便了面源污染的模拟、预测和管理决策; 近年来, 由于计算机技术的高速发展和 3S 技术的应用基于流域大尺度的超大模型被开发出来, 如 BASINS 等, 提升了城市面源污染定量化研究的边界[17]。

我国早期的城市面源污染的研究, 仅仅局限在测量数据、概率统计分析、建立简单经验公式等方面,

还停留在面源污染模型应用研究阶段, 多数采用国外的成熟模型或结合实际的研究情况加以修正, 对模型结构改进不大。近年来, 国内关于城市面源污染问题有着很高的关注度, 相应的研究也发展较快, 同时也有大量的研究成果。胡成等人利用 SCS 模型建立了不同土地利用类型条件下城市雨水径流系数与年降雨量的相关关系[18]; 刘勇华等指出城市雨水径流污染初始冲刷效应(FEE), 单一 BMPs 技术难以实现污染控制, 应该采用多种 BMPs 相结合的方法[19]。

目前, 我国国内对于城市面源污染的相关研究缺乏大尺度的系统性和创新性。我国幅员辽阔, 南北城市污染存在很大的差异性, 城市的发展规划历程与国外也不同, 国外的理论模型并不能够完全的适用国内的城市, 所以城市化进程的快速发展中, 需要从我国的实际情况出发, 提出一套具有中国特色的城市面源[20]污染控制方案和技术体系。

4. 城市面源污染的控制措施

近年来, 城市工业废水和生活污水的压力逐渐变大, 城市水环境的情形越来越令人堪忧, 城市面源污染的问题越来越突出。城市面源污染物的种类随机因素太大, 使得在防治过程中存在着很大的困难。

城市面源污染控制与治理在于对城市暴雨径流污染的产生与输出进行调控。要针对城市面源污染产生的原因, 控制进入城市水体的面源污染物总量; 进而改善城市水环境、提升城市水生态系统的服务功能、构建人水和谐的生态城市。

在城市面源污染控制措施中, 美国的暴雨最佳管理措施[20] (Best Management Practice, BMP)最为系统和全面, 也得到了国内外很多国家广泛的认可。实践证明, 最佳管理措施的实施, 可以减缓接纳水体的水质污染程度。BMP 措施分为非工程性措施和工程性措施两种。

4.1. 非工程性措施

1) 理念的转变

理念的转变包括城市建设部门。长期以来, 在我国城市建设中缺乏可持续和长远的规划, 城市的基本建设规划中, 缺乏城市与自然的和谐理念。很多老城区在设计过程中, 城市排水系统仅仅局限于防洪排涝, 并未关注到由此带来的径流污染、雨水资源流失、生态恶化等严重问题, 因此, 当务之急是要转变我国城市道路排水设计的观念, 从而减轻城市面源污染问题的严重性。

2) 相关法律法规的完善和加强环境教育

主要有针对性地完善相应的法律法规和部门规章, 制定监督检查办法, 让环境责任问题落实在明确的负责人身上, 还需进一步加强法律法规的可实施性, 从污染的源头全面防治面源污染; 通过标语、宣传片等途径对广大市民进行思想教育和科普环境保护意识, 全面提高社会的环境保护意识, 市民从身边小事做起, 切实让环境保护意识融入人们的生产生活活动中。

3) 清扫路面和抑制除冰剂、杀虫剂等的使用

长期以来, 路面清扫一直被认为是控制径流污染的有效方法, 贺问彦等的研究中表明, 传统的路面清扫方式能在一定直径范围内的颗粒物起到很好的作用[21]。Sartor 等人的研究表明, 常规的路面清扫最多仅能去除 30%的污染物[22]; 当务之急在于寻找一个去污效率高的城市路面的清扫方法; 国内大部分城市, 尤其是北方城市, 在冬季为了创造良好的交通环境, 大量的使用除冰剂等, 如除冰剂的大量使用一方面增加了 NaCl 等盐类和沙砾等研磨物, 另一方面使得路面车流量在通过该路段时, 车轮与路面的磨损程度加重, 磨损物质随冰雪融化的径流进入接纳水体。

4.2. 工程性措施

利用工程性措施可以分为三个方面: 一是从源头着手对城市面源污染物进行处理, 将雨水径流污染

物在源头上控制在最低限度;二是针对在雨水污染物的扩散途径上进行控制,通过适当的措施,减少污染物进入城市排水系统的污染物总量,进而减少对城市水系的污染;三是末端处理,通过自然生态技术或人工净化技术来降解带入城市水系中的径流污染物。

城市面源污染在流域尺度上,形成源-迁移-汇[23]的处理链模式,从源头开始处理、在迁移过程中层层处理,这样能够起到很好的净化效果。源-迁移-汇的城市污染物控制系统在处理污染物的实践中不断被验证和完善,已经得到国内外广泛的认可。以下结合实际措施来解释源-迁移-汇污染处理系统。

1) 源控制技术。在源头区域内采用“透水铺装技术”、“增大渗水面积”等技术都能够在源头区域对城市面源污染物的数量进行有效的控制。

2) 迁移控制技术。如现在较为广泛的植草沟、生物滞留设施、下沉湿地等技术都是对迁移过程中的污染物进行处理,通过绿色植被对污染物的吸附作用,使得迁移过程中的大部分的污染物被处理掉。

3) 汇控制技术。生态浮床技术和人工湿地是城市污染物的汇控制技术应用较广的措施。类似生态浮床技术等一系列通过生态植物对污染物的生态效应来处理的措施,一方面可以大量处理城市径流带来的污染物,另一方面可以增加城市绿化率,为城市增添一抹绿色风景。

4.3. 可行性分析

源-迁移-汇的城市污染物控制系统在城市环境污染物的治理中得到不断地验证,非工程性措施和工程性措施也是基于这套系统提出,制定相关法规和进行相应的科普教育等均是减少污染物的排放,植草沟、生态浮床等 LID 设施的应用则是在污染物迁移过程中对污染进行拦截、削减,非工程性措施和工程措施主要借鉴于美国五大湖区成功治理的案例,并在实际应用中不断地完善。

5. 展望和方向

2012 低碳城市与区域发展技术论坛首次提出“海绵城市”的相关概念。住建部[24] 2015 年也对“海绵城市”给出明确的定义,通过海绵城市改造技术对现有城市地区进行海绵改造,使得城市能够像海绵一样,在适应环境变化和应对自然灾害等方面具有良好的“弹性”,下雨是吸水、蓄水、渗水、净水,当需要水时,将蓄存的水重新释放出来使用,减少水资源的浪费和提高城市生态系统功能[25]。海绵城市是我国未来城市发展的方向,近年来,已经有越来越多的城市建设海绵试点,并且取得了很好的效果;城市海绵改造技术是由雨水净化系统、雨水渗透系统和雨水蓄积利用系统组成;海绵城市是城市水力学、环境科学等多学科协同的产物,所进行的城市面源污染相关的研究能都很好的对接到海绵城市的相关理论研究。

1) “源-迁移-汇”技术在实际运行过程中的协调性,探究源控制技术、迁移控制技术和汇控制技术在实际运行时对污染物处理的贡献率。

2) 针对城市污染物的测量与监测,使得城市面源技术融入到新型海绵城市的建设,通过测量比较路面污染物的种类和浓度,模型评估城市道路的海绵改造效果。

3) 对城市降雨径流的在线监测技术的研究,通过对城市雨水径流实时的监测,可以为污染处理提供更加准确有效方法。

6. 结语

我国海绵城市改造建设为城市面源污染研究发展的一大契机。但我国缺乏长期的系统监测数据的支持,对于城市面源污染的总负荷和海绵改造设施作用效果无法有效地估计,故进行城市面源典型特征污染物的监测,有利于了解污染物的分布规律,同时能为城市水环境的治理提供基础数据支持。

参考文献

- [1] 金立新. 美国和加拿大五大湖的水污染防治与管理[J]. 水资源保护, 1998(4): 7-9.
- [2] 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.
- [3] 尹澄清. 城市面源污染的控制原理和技术[M]. 北京: 中国建筑出版社, 2009.
- [4] Angrill, S., Petitbox, A. and Moralespinzon, T. (2017) Urban Rainwater Runoff Quality—A Potential Endogenous Resource in Cities. *Journal of Environment Management*, **189**, 14-21. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.12.027>
- [5] 李立青, 尹澄清, 何庆慈. 武汉汉阳地区城市集水区尺度降雨径流污染过程与排放特征[J]. 环境科学学报, 2006, 26(7): 1057-1061.
- [6] 丁程程, 刘健. 中国城市面源污染现状及其影响因素[J]. 中国人口资源与环境, 2011, 21(3): 86-89.
- [7] Choe, J.S, Bang, K.W. and Lee, J.H. (2002) Characterization of Surface Runoff in Urban Areas. *Water Science and Technology*, **45**, 249-254. <https://doi.org/10.2166/wst.2002.0251>
- [8] Gromaire Mertz, M.C., Garnaud, S. and Gonzalez, A. (1999) Characterization of Urban Runoff Pollution in Paris. *Water Science and Technology*, **39**, 1-8. <https://doi.org/10.2166/wst.1999.0071>
- [9] 李立青, 朱仁肖, 郭树刚. 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.
- [10] Massone, H.E. and Martize, D.E. (1998) Suburban Areas in Developing Countries and Their Relationship to Groundwater Pollution: A Case Study of Mar del Plata. *Argentina Environ Manage*, **22**, 245-254. <https://doi.org/10.1007/s002679900100>
- [11] 常静, 刘敏, 许世远. 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.
- [12] Kayhanian, M., Suverkraropp, C. and Ruby, A. (2007) Characterization and Prediction of Highway Runoff Constituent Event Mean Concentration. *Journal of Environmental Management*, **85**, 279-295. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2006.09.024>
- [13] 曹仲宏, 刘春光. 城市水环境面源污染及其控制[J]. 城市道桥与防洪, 2012(10): 69-71.
- [14] 葛永学. 城市非点源污染研究进展[J]. 生态学杂志, 2010, 31(1): 16-21.
- [15] 宫莹, 阮晓红, 胡晓东. 我国城市地表水环境非点源污染的研究进展[J]. 中国给水排水, 2003, 19(3): 21-23.
- [16] 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.
- [17] 陈伟伟, 詹小来. 城市雨水径流非点源污染的研究进展[J]. 节能灌溉, 2011(12): 50-52.
- [18] 胡成, 潘美霞. 城市非点源污染负荷估算研究[J]. 气象与环境学报, 2006, 22(2): 14-18.
- [19] 刘勇华, 高超, 王登峰. 城市降雨径流污染初始冲刷效应对 BMPs 选择的启示[J]. 水资源保护, 2009, 25(6): 29-31.
- [20] 尹澄清. 城市面源污染问题: 中国城市化进程的新挑战——代“城市面源污染研究”专栏序言[J]. 环境科学学报, 2006, 26(7): 1053-1056.
- [21] 贺文彦, 谢文霞, 赵敏华. 海绵城市试点区域内面源污染发生过程及其对水体污染负荷贡献评估[J]. 环境科学学报, 2018, 38(4): 1586-1597.
- [22] [英]WJ 霍尔, 著. 城市水文学[M]. 詹道江, 等, 译. 南京: 河海大学出版社, 1989.
- [23] 李亚, 孔令为, 等. 关于面源污染减排研究综述[J]. 环境与可持续发展, 2017, 42(5): 50-52.
- [24] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 海绵城市建设技术指南-低影响开发雨水系统建成(试行) [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- [25] 李璐, 熊太玲, 孙金玺. 基于海绵城市建设对城市面源污染治理的探讨[J]. 规划科研, 2017(12): 11-13.