

城市非点源污染研究进展*

李春林^{1,2} 胡远满¹ 刘淼^{1**} 徐岩岩^{1,2} 孙凤云^{1,2}

(¹森林与土壤生态国家重点实验室, 中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110164; ²中国科学院大学, 北京 100049)

摘要 城市非点源污染是伴随城市化而出现的新问题,其主要来源于城市中的工业排放、化石燃料燃烧、汽车尾气和土壤侵蚀等,通过暴雨径流的冲刷作用汇入城市水体,从而严重危害着城市水体水质和生态系统的安全。本文阐述了城市非点源污染的概念、形成过程及其影响因素;评述了城市暴雨径流的主要研究方法,即事件平均浓度(EMC)和初期冲刷(FF);介绍了国内外常用的SWMM和HSPF两种城市非点源污染模型的研究进展;总结了最佳管理措施(BMPs)和低影响发展(LID)在城市非点源污染控制中的应用;最后根据目前研究的不足,提出了未来研究要在加强污染物机理研究的基础上,进一步完善城市非点源模型,而中国要研究适合本国的城市非点源污染控制措施和将城市非点源污染治理与城市规划、景观设计相结合。

关键词 城市非点源污染;事件平均浓度;初期冲刷;最佳管理措施;低影响发展

中图分类号 X52 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2013)3-0492-09

Urban non-point source pollution: Research progress. LI Chun-lin^{1,2}, HU Yuan-man¹, LIU Miao^{1**}, XU Yan-yan^{1,2}, SUN Feng-yun^{1,2} (¹State Key Laboratory of Forest and Soil Ecology, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; ²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(3): 492-500.

Abstract: Urban non-point pollution is a new issue appeared with rapid urbanization, which mainly comes from city industrial emission, fossil fuel burning, vehicle exhaust, and soil erosion, etc., and seriously endangers the safety of urban water quality and ecosystem through the flush of storm runoff into urban waters. This paper elucidated the connotations of urban non-point pollution, its formation process, and affecting factors, introduced the research methods of urban storm runoff, including event mean concentration (EMC) and first flush (FF), and the research progress of two non-point source pollution models (SWMM and HSPF), and summarized the applications of best management practices (BMPs) and low impact development (LID) in controlling urban non-point pollution. In view of the shortages of current related studies, it was proposed that on the basis of strengthening the researches of pollutant movement mechanisms, the urban non-point source models should be further improved, and the suitable urban non-point pollution management practices should be developed, in combining with urban planning and landscape design.

Key words: urban non-point pollution; event mean concentration; first flush; best management practices; low impact development.

近年来,中国城市化进程不断加快,城市化对水环境的影响越来越受到人们关注。城市化过程中城市不透水面的增加,直接增加了径流量,使径流中的众多污染物(如SS、TN、TP、COD、BOD、微生物以及

重金属等)通过城市排水系统进入接纳水体,直接危害水生生物的生存和生态系统的安全。径流中污染物的种类、浓度、胶体形态和径流量大小都决定着对城市水体的影响程度。

随着科技的发展、治理措施的改进和治理投入的增加,点源污染的治理效果迅速提高,点源对水体污染的贡献率逐年下降,而非点源污染的负荷比例

* 国家自然科学基金项目(41171155和40801069)资助。

** 通讯作者 E-mail: lium@iae.ac.cn

收稿日期: 2012-07-04 接受日期: 2012-12-23

逐年增加(尹澄清,2009)。城市非点源污染已经成为城市水环境污染和生态退化的主要影响因素,是水体水质恶化和生态功能退化的第三大污染源(沈桂芬等,2005)。根据美国环境保护署(US EPA, 2000)的报告,美国江河湖海的污染负荷约2/3来自非点源。在2000年美国受污染水域的监测结果中,河流、湖泊和滨海分别有12%、17%和55%的主要污染源是城市非点源污染。城市非点源污染已经成为城市水体水质恶化、河流生态系统退化的重要原因(Goonetilleke *et al.*, 2005)。

西方发达国家对城市非点源污染的研究开始于20世纪60年代,经过半个世纪的发展,从污染源的监控、污染物迁移转化的模拟、对非点源污染的原因和关键环节进行管理控制等各个方面,形成了一整套较完善的监控、模拟和治理体系。城市暴雨径流作为非点源污染的驱动力和迁移的载体,始终是研究的热点和重点。而城市非点源污染模型则可以从流域尺度对非点源污染进行定量研究。中国关于城市非点源污染研究开始于20世纪80年代对北京(鲍全盛和王华东,1996)、苏州(温灼如等,1986)、杭州(吴林祖,1987)等城市的地表径流污染的研究。目前中国对城市非点源的研究尚处于起步阶段,在借鉴国外的研究方法、模型和管理措施基础上,进行应用推广。在城市水文(黄国如和聂铁锋,2012;李家科等,2012;马晓宇等,2012)、城市水利(荆红卫等,2012;张倩等,2012)和城市环境(杨德敏等,2006;职锦等,2010;沈虹等,2011)等方面都取得了一定的研究成果,但仍然存在一些问题和不足。

1 城市非点源污染

1.1 城市非点源污染概念及其污染物来源

城市非点源污染是指城市表面的污染物在降雨径流的淋溶冲刷作用下,以广域、分散的形式进入河湖而引发的水体污染(王龙等,2010)。城市暴雨径流作为污染物迁移转化的主要驱动力,是城市非点源污染的主要原因。城市非点源污染物晴天在城市表面积累,雨天时随降雨径流排放,具有非点源间歇式排放的特征。

城市非点源的污染物包括:悬浮颗粒物(SS)、有机物、氮、磷、微生物和重金属等。这些物质的主要来源有:土壤侵蚀、化石燃料燃烧、工业排放、车辆尾气排放和部件磨损等。其中悬浮颗粒物主要来自土壤侵蚀、工业排放和化石燃料的燃烧,重金属则主

表1 城市非点源污染物的主要来源

Table 1 Main source of urban non-point source pollutants

污染物	土壤侵蚀	车辆磨损和排放	工业排放和化石燃料燃烧	公园和绿地的农药化肥	动物排泄物
悬浮颗粒物	M	N	M		
有机物	M	N			M
营养物质	M	N		M	M
重金属		M	M		
油类		M	M		
微生物					M
农药					M

M, 主要来源; N, 次要来源。

要来自工业排放、车辆磨损和尾气排放。城市主要的非点源污染物及其来源如表1(Zoppou, 2001)。

1.2 城市非点源污染的形成过程

城市非点源污染形成过程的核心为“源-过程-汇”。城市化改变了城市的土地利用类型,从“源”上改变了污染物的种类和空间分布;城市化对非点源污染“过程”的影响,主要体现在对降雨-径流过程的影响,改变了区域的水文过程;“汇”的变化主要通过“源”和“过程”的改变来体现(杨柳等,2004)。污染物在各种城市下垫面的分布不同,其中,屋面和公路是重金属、氮磷等污染物的主要分布区域。

屋面径流和路面径流是城市暴雨径流的主要组成部分。城市屋面由于其材质、建筑时间、坡度、暴露程度和位置的不同而产生不同的非点源污染物。屋面径流的典型污染物有Zn、Cu、Pb、Cd等重金属,主要是由于金属屋顶和落水管处的腐蚀、冲刷形成的(Chang & Crowley, 1993; Förster, 1996a; Gromaire *et al.*, 1999; He *et al.*, 2001)。路面径流是城市非点源污染的重要部分,污染物包括油脂、重金属、有机物、悬浮颗粒物、农药杀虫剂等,其来源是车辆及轮胎的磨损、汽车尾气排放、人类活动、道路的磨损、绿化带中农药和杀虫剂的使用等(Kern *et al.*, 1992; Sansalone & Buchberger, 1997; 任玉芬等, 2005; 李立青等, 2010)。

1.3 城市非点源污染的影响因素

城市非点源污染的成因复杂,影响因素众多。其主要影响因素可以概括为三大类:1)气候状况。降雨量、降雨强度、历时、时空分布、干期长度、大气污染状况。2)污染物特征。污染物的种类、胶体形态、属性特征、以及污染物的采样和测量方法。3)城市特征。城市不透水面积、土地利用类型、城市地表清扫频率及效果、雨污排放方式。

具体来说,降雨强度决定着淋溶、冲刷地表污染

物的能量大小;降水量决定着稀释污染物的水量;城市土地利用方式决定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的含量;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(李立青等,2006a)。干期长度是指两次降雨之间的晴天天数,因为污染物质在晴天通过大气沉降、路面磨损、土壤侵蚀等在地表积累,因此干期长度是影响污染物量累积的重要因素。城市街道清扫能去除30%~50%的典型污染物,也是最常用的减少污染物累积的措施(Hall & Ellis, 1985)。

城市化带来城市不透水面积的增加,降低了下渗率,增加了暴雨径流量,也缩短了径流峰值形成的时间,从而加大了径流对地表污染物的冲刷(Brezonik & Stadelmann, 2002)。城市非点源污染在不同土地利用类型上的分布差异很大, Lee 和 Bang (2000)研究发现,居住区的污染物浓度要高于工业区,污染物单位负荷是高密度居住区最大,其次是低密度居住区,然后是工业区,未开发区的负荷最低。不透水面对水体的影响力大小也会因为土地利用类型的不同而改变,比如直接连结城市水体的不透水面比连结到草地的不透水面对城市非点源污染的贡献率大(Wang *et al.*, 2001)。

非点源污染物的分布和浓度的大小与土地利用状况和大气的干湿沉降有密切关系(Förster, 1996a)。而污染物的形态(颗粒态或溶解态)、污染物的迁移性和属性特征都会对非点源污染的形成和迁移有重要的影响(Sheng *et al.*, 2008)。

雨污排放方式分为合流制和分流制,在中国大部分城市,特别是老城区,合流制排水系统仍然占主要地位。而大量研究表明,雨污合流制排水系统造成的非点源污染比分流制排水系统更加严重(Bachoc, 1992; Gupta & Saul, 1996; Cheebo *et al.*, 2003)。在全年的降雨径流中,合流制排水系统中总悬浮颗粒物的平均浓度(160~460 mg·L⁻¹)比分流制排水系统总悬浮颗粒物的平均浓度(90~270 mg·L⁻¹)高50%(李立青等,2006a)。

由于非点源污染的影响因素很复杂,而且不同的研究区状况差异很大,所以研究结果会有很大差异甚至结果相反。如,Goonetilleke 等(2005)发现,别墅式的低密度居住区的污染较重,而公寓式的高密度居住区污染较轻,作者分析这是由于污染物质多是从私人花园中冲刷出来的,并且提出高密度居

住区是减少城市非点源污染的重要措施。虽然干期长度能影响污染物积累,但有研究发现,污染物负荷与干期长度相关性不明显,而与总径流量显著相关(Charbeneau & Barrett, 1998; Deletic & Maksimovic, 1998; Wang *et al.*, 2011)。

2 城市暴雨径流

2.1 城市暴雨径流概况

城市暴雨径流作为污染物迁移转化的主要驱动力,是城市非点源污染的研究热点和重点。城市非点源污染具有明显的时间尺度性。在年际降雨过程中,污染物表现为晴天累积,雨天排放。而在场次降雨过程中,城市非点源污染的产生和迁移过程随着降雨特征及污染物累积状况的不同而表现出复杂的变化。不仅是不同降雨场次的污染物浓度不同,而且在同一场次降雨中不同的污染物排放情况也有较大差异,甚至同种污染物在降雨的不同时段内也有不同的浓度和排放速率。目前城市暴雨径流研究主要集中在事件平均浓度(event mean concentration, EMC)和初期冲刷效应(first flush, FF)。EMC反映了场次降雨的污染物浓度差异,适用于不同降雨事件的横向对比;而FF则是研究污染物在降雨不同阶段的排放特征。国内外学者研究集中在北京(董欣等,2008;欧浪波等,2011)、上海(常静等,2006;王彪等,2008)、武汉(李立青等,2006b)、深圳(马振邦等,2011;Ma *et al.*, 2011)、澳门(黄金良等,2006;黄金良等,2009)、美国(Carle *et al.*, 2005)、法国(Gromaire *et al.*, 2001)、德国(Obermann *et al.*, 2009)、意大利(Gnecco *et al.*, 2005)等地区,主要是研究不同城市屋面、路面和城市功能区的降雨径流污染物排放特征。

2.2 事件平均浓度(EMC)

事件平均浓度表示的是在一场完整降雨过程中,污染物相对于径流量的平均浓度。其计算公式为:

$$EMC = \frac{M}{V} = \frac{\int_0^T C_t Q_t dt}{\int_0^T Q_t dt} \cong \frac{\sum C_t Q_t \Delta t}{\sum Q_t dt \Delta t}$$

式中,EMC为污染物事件平均浓度;M为污染物排放量;V为径流量;T为总径流时间;t为时刻;C_t为t时刻污染物浓度;Q_t为t时刻径流量;Δt为时间间隔。EMC计算的是整场降雨历时的污染物平均浓

度,当 T 为某一时刻 t_1 时,得到的就是 t_1 之前的污染物平均浓度,称为偏事件平均浓度(PEMC)。

事件平均浓度作为一种常用的定量评价场次降雨非点源污染水平的方法,能够有效地表示出污染物的平均浓度,利于对不同场次或不同样点的污染物浓度进行比较。国内外许多学者对同不同下垫面的污染物 EMC 状况做了大量的研究(Kayhanian *et al.*, 2007; 李俊奇等, 2010; 欧阳威等, 2010; 李青云等, 2011; 张千千等, 2012; 周栋等, 2012), 结果显示,不同城市不同下垫面的污染物 EMC 有很大不同,总体来说,重金属的 EMC 值是路面径流和工业区较大,草地径流和居住区较小;氮磷等营养元素的 EMC 值则一般是草地径流和居民区较大。

不同季节的气温、降雨特征及人类活动差异较大,所以污染物的 EMC 值有明显的季节差异(Brezonik & Stadelmann, 2002),融雪水和春秋径流中的悬浮颗粒物、氮、磷等污染物浓度要比夏季径流高(Kappel *et al.*, 1986; Wilson, 1993)。不同地区污染物的 EMC 值也有较大差异,林莉峰等(2007)研究了上海市城区地表径流污染物的 EMC 中值,发现各种污染物均明显高于欧美发达国家。

不同的交通状况和屋面材料对污染物的产生和分布有重要影响。金属材料的屋面能导致暴雨径流中重金属含量升高。屋面径流中,铜和锌的 EMC 值是最高的。路面径流中,高速公路的 BOD、COD、Cd、Pb、Ni 和 Cr 浓度最高,主路的 TSS、TP、NH₄、NO₃ 和 Cu 的浓度最高,辅路的 PAH 浓度最高,而在自行车道、人行道和路边草地中的 Zn 浓度最高(Förster, 1996b)。

2.3 初期冲刷(FF)

初期冲刷效应是指在城市暴雨径流的初始阶段中会携带大量的污染物质。初期冲刷是污染物冲刷的重要和独特的现象,会导致径流初期产生一个较高的污染物浓度峰值,大量的污染物质会排放到接纳水体,使城市水环境受到严重威胁(Bertrand *et al.*, 1998)。长期以来,城市污水排放系统是基于初期冲刷现象对初期径流采用截留措施,将其截流到污水处理厂处理。因此,初期冲刷现象对管理和治理城市暴雨径流具有重要经济意义和生态意义。初期冲刷受多种因素影响,如流域面积、降雨强度、不透水面积、干期长度和取样方式等。众多研究者对城市径流的初期冲刷效应进行了研究,发现不同的初期冲刷定义、采用不同的采样与数据收集方法

所得的结论也不尽相同(Deletic, 1998)。

最早由 Geiger (1987) 根据污染物-径流量积累曲线(M/V)定义了初期冲刷现象:当曲线的初期阶段大于对角线时,就发生了初期冲刷,而当曲线与对角线差值大于 0.2 时就是发生了明显的冲刷现象。该方法对初期冲刷效应的判定条件比较宽松。

Lee 等(2002)在 Geiger 的基础上根据污染物和径流量积累率提出了积累率差值(Δ)和初期冲刷系数(b)两个测度指标。积累率差值(Δ)的公式是:

$$L = \frac{m(t)}{M}; F = \frac{v(t)}{V}; \Delta = L - F$$

式中, Δ 为积累率差值; $m(t)$ 为 t 时刻的污染物质量; M 为总污染物质量; $v(t)$ 为 t 时刻的径流量; V 为总径流量。当 $\Delta > 0.2$ 时,就发生了初期冲刷,而 Δ 越大表示初期冲刷越强烈,污染物的累积速率越快于径流量的累积速度。所以用这种方法就需要选择适当的 t 时刻。

初期冲刷系数(b)的定义是,对于某一场降雨的某种污染物,若 b 满足 $L = F^b$,则 b 就是该污染物的初期冲刷系数。当 $b < 1$ 时,污染物就发生了初期冲刷效应, b 越小代表冲刷越强烈。但是这种方法的缺点是没有考虑积累率随时间的变化,所以计算出的冲刷效应不一定发生在降雨的初期。

FF_n 也是被众多研究者用来判定初期冲刷现象的方法。FF₃₀ 表示前 30% 径流量携带的污染物质,如果污染物质 > 80%,就说明发生了初期冲刷(Saget *et al.*, 1996)。另外,也有人用 FF₂₅、FF₅₀ 等方法判定初期冲刷现象(Vorreiter & Hickey, 1994; 张科峰等, 2012)。

初期冲刷影响因素复杂,汇流区面积、降雨强度和干期长度对初期冲刷效应有显著影响,但大约只有 60% ~ 80% 的降雨事件能产生初期冲刷现象(Hall & Ellis, 1985)。相同影响因素在不同研究区的影响效果是不同的(Deletic, 1998)。根据 Lee 等(2002)的研究结果,汇流区面积越小,干期长度越长,冲刷效应越强烈;而降雨强度对 COD、SS、TKN 和 Fe 有显著影响,但对 P、HEM 和 Pb 的影响不显著。而且使用不同的评价方法,得出的结果是不同的,用积累率差值分析居住区和工业区初期冲刷效应最强的分别是 SS 和 PO₄-P,而用初期冲刷系数得出都是 TKN 的初期冲刷效应最强。

合流制相对于分流制排水方式而言,排水管网里沉积了大量的底泥,在降雨径流时能冲刷、释放出

更多的污染物,因而更容易发生初期冲刷现象(Gupta & Saul,1996)。但有研究认为,合流制排水方式的影响因素更加复杂,生活污水的排放会使初期冲刷现象难以被发现(Saget *et al.*,1996)。自动取样和人工取样方法对 EMC 和 FF 的计算有重要影响,人工取样方法需要增加降雨初期的采样频率,才能有利于计算 FF,而自动取样方法采集的样品数量多且频率高,能有效提高计算的精度(Ma *et al.*,2009)。

3 城市非点源污染常用模型

3.1 城市非点源污染模型研究进展

城市非点源污染模型是非点源污染特征研究的重要工具和手段,能预测非点源污染的时空分布特征及负荷大小,也是目前城市非点源污染研究的热点。利用城市非点源污染模型,模拟非点源污染的积累和迁移过程,确定污染的重点治理区域,分析土地利用变化对城市水环境的影响,从而制定科学合理的非点源污染治理措施,并评价其效果(王龙等,2010)。

城市非点源污染模型由 20 世纪 60—70 年代的非点源污染负荷与土地利用的经验关系模型,发展到 20 世纪 70—80 年代的基于污染物积累冲刷、土壤侵蚀和污染物运动的机理模型,最后发展到现在的与 GIS 紧密耦合应用阶段,能利用 GIS 强大的空间分析能力为模型提供更加准确的参数输入,提高了模型的模拟精度。目前,用于模拟城市非点源污染的模型有 SWMM(Storm Water Management Model)、STORM(Storage Treatment Overflow Runoff Model)、DR3M-QUAL(Distributed Routing Rainfall-Runoff Model)、QQS(Quantity-Quality Simulation)、HSPF(Hydrologic Simulation Program-Fortran)、SLAMM(Source Loading and Management Model)等,而被国内外广泛应用的模型主要是 SWMM 和 HSPF。

3.2 SWMM 模型

SWMM 是美国环境保护署(USEPA)1971 年为解决日益严重的城市非点源污染而推出的城市暴雨水质水量预测和管理模型。模型由径流模块、输送模块、扩展输送模块、存储处理模块和一个服务模块组成。SWMM 将研究区划分为多个子汇流区,模拟不透水区的地表径流、透水区的下渗、排水管内径流和溢流,并且能够模拟 TSS、TN、TP、BOD、COD 等 10 种污染物和用户自定义污染物的积累和冲刷现象。

模型的最敏感参数依次是不透水洼蓄量、曼宁系数、下渗系数和透水区洼蓄量(Tsirikintzis & Hamid,1998)。该模型的缺点是不能对污染物的生化反应和转化进行模拟。

SWMM 模型能模拟开发区城市化前后的水文特征,有效地预测城市化过程中水文状况的变化(Jang *et al.*,2007)。采用不同划分精度的子汇流区,虽然子汇流区的分辨率降低,划分的子汇流区数量减少,但是 SWMM 的最终模拟结果并没有显著改变。而把不同土地利用类型的子汇流区合并后,污染物的总量会减少,因此为了模拟结果的准确,应该尽量保证子汇流区的土地利用类型相同(Park *et al.*,2008)。

SWMM 通过模拟分析城市化对不同重现期降雨的影响。城市化能明显增加十年一遇的降雨场次,而对重现期较长的降雨影响不显著,并且城市化过程往往显著增加径流量较小的发生频率较高的城市洪水,而对发生频率低的径流量巨大的城市洪水却基本没有受到影响(Camorani *et al.*,2005)。

3.3 HSPF 模型

HSPF 是由 Johanson(1983)提出的,在 1998 年被美国环保署嵌入多功能水质分析模拟的 BASINS 系统。该模型是一个优秀的半分布式综合模型,在国外应用广泛,但在中国应用较少(李兆富等,2012)。通过 BASINS 系统,HSPF 模型与功能强大的 ArcGIS 相整合,从而为模型提供所需的地形、地貌、土地利用、土壤、流域划分等数据的处理和叠加提供了更加方便的手段。该模型的优点是能紧密的与 GIS 相结合,而且可以模拟污染物的转化过程,缺点是不能进行排水管内水流的计算。

HSPF 通常用于流域的水量和水质的模拟,但也适用于快速城市化地区。Brun 和 Band(2000)通过 HSPF 模型模拟城市化过程中不透水面积的增加对径流量和基流的影响,发现不透水面积的影响有一个阈值:当不透水面积低于 20% 时,影响不明显,但是超过 20% 后,随着不透水面积比率的增加,径流量会明显增加。Choi 和 Deal(2008)将土地利用变化模型与 HSPF 模型结合起来,定量预测流域尺度的河道径流对未来城市扩展的响应。Lee 等(2010)研究表明,HSPF 在单一或复合的土地利用类型小流域的水量和水质模拟中均有较好的表现。邢可震等(2004)则利用 HSPF 模型对滇池流域的水文水质状况进行了模拟,结果表明,SS 是滇池流域

非点源污染的首要污染物,有 80% 的 SS 流入湖中;而在枯水年,非点源污染贡献了约 1/3 的 TN、TP 入湖负荷量。

4 城市非点源污染的控制管理

4.1 主要城市非点源污染控制管理措施

城市非点源污染的控制管理研究主要是美国学者提出的最佳管理措施(best management practices, BMPs)和低影响发展(low impact development, LID)。BMPs 经过 40 年的研究和发展,已经在欧美国家形成较完善的理论和技术体系,并有了广泛的工程应用,其最大优点是控制效果可以进行量化。凭借 BMPs 功效评价工具可以对各项 BMPs 措施对不同污染物的消减量给予量化评价。LID 虽然提出时间较短,但由于结合了经济发展、环境保护、景观生态等要求,模拟自然水文特征,利用天然景观元素控制城市径流和非点源污染,而且具有规模小、布局离散、美化环境等特点,更加适合高密度的城市区域,近来越来越受到重视,成为城市非点源控制的发展方向。

4.2 最佳管理措施(BMPs)

BMPs 是指用工程措施或者非工程措施,为减少地表径流量和各种污染物浓度,保护收纳水体水质,对不同地表状况采取合理的措施来控制 and 减轻非点源污染。而实践证明,BMPs 是一套有效的径流控制措施,对其合理使用,可以有效减缓地表径流对受纳水体水质的污染。

BMPs 方法有工程措施和非工程措施两大类。工程措施主要依靠工程设施来控制污染物,如多孔路面、滞留池/塘、人工湿地和绿化缓冲带等。非工程措施是指用管理措施来达到控制污染的目的,如城市环境管理、路面清扫、限制除雪剂的使用等。结合降雨径流管理决策支持系统 SUSTAIN,可以进行各种 BMPs 模拟、BMPs 的选址和布局优化,有利于决策者在城市非点源污染控制目标下达到效益最大化。

北京奥运村实施了绿色屋顶、多孔路面、植草沟、下渗渠等最佳管理措施,通过运用 SWMM 模型对 BMPs 实施前后的城市暴雨径流进行模拟,发现 BMPs 实施后研究区的暴雨径流峰值和径流总量都有明显降低,为控制城市暴雨径流提供了范例(Jia *et al.*, 2012)。植被过滤带能有效滞缓暴雨径流、沉降泥沙,从而控制非点源污染,已经作为重要的

BMP 得到应用。李怀恩等(2006)介绍了 3 种典型的过滤带带宽的计算方法,并对其进行了比较和讨论,为今后的实际应用提供了指导。

北京密云县太师屯镇的最佳管理措施,是根据其非点源污染特点设计的,包括退耕还林、推广沼气池、植被保护带、平衡施肥技术等,并利用环境经济学方法进行了污染控制效果的经济效益评价,使污染控制方案既满足改善流域环境的目的,又具有经济上的可行性(王晓燕等,2009)。

4.3 低影响发展(LID)

LID 是以维持或者复制区域天然状态下的水文机制为目标,通过一系列分布式的措施创造与天然状态下功能相当的水文和土地景观,以对生态环境产生最低负面影响的设计策略来控制非点源污染(孙艳伟等,2011)。LID 结合了经济发展、环境保护、景观生态等要求,利用天然景观元素控制城市径流和非点源污染,是一种基于经济、社会和生态环境可持续发展的设计策略。LID 是由“自然、和谐”的理念发展而来的第二代 BMPs,而与调控措施相比,它强调与植物、水体等自然条件和景观相结合的生态设计。通过各种分散、小型、多样化、本地化的技术和设计,使城市水文特征接近开发前的水文状况。主要的 LID 措施有滞留塘/池、透水路面、绿色屋顶、植被过滤带等。

传统地区和 LID 地区相比,随着城市化发展,传统地区不透水面积不断增加,总径流量有显著增加,而 TSS、重金属等污染物则呈现指数增长。但在 LID 地区,由于实行了低影响发展措施,在小流域内模拟自然水文条件,通过下渗、过滤、蒸发和蓄流等方式,径流量没有明显增加。同时能有效地在源头去除径流中的营养物质、重金属等,减少和降低对周围环境的影响(Dietz & Clausen, 2008)。

绿色屋顶能有效减少城市径流量,即便是十分简单的绿色屋顶,在合适的气候条件下,大约 36 cm 厚即可降低约 50% 的年径流量(Liaw *et al.*, 2001)。植草沟在城市非点源污染控制方面也有重要作用,通过合理设计和施工,良好的运行维护,植草沟可以高效的收集和處理徑流雨水,可以代替傳統的雨水管道,并具有显著的景观生态效应(刘燕等,2008)。邢薇等(2011)基于 LID 理念,构建了将雨水源头控制措施、雨水排水管网和雨水集中处理设施统一结合的可持续城市雨水系统。

LID 对径流量和污染物中的悬浮颗粒物、重金

属的消减作用非常明显,但由于农药化肥的不合理使用或操作的不规范,使得生物滞留、绿色屋顶等措施对磷的消减不明显,甚至会成为污染源。而对维护人员的合理培训能有效避免这种情况的发生(Dietz,2007)。今后仍需要对LID的效果进行长期监控,并且进一步研究适合去除微生物的LID措施。

5 问题与展望

未来城市非点源污染研究应继续加强污染物运动机理方面的研究,研究污染物迁移转化的规律,特别是悬浮颗粒物对其他污染物的吸附、运载作用,并且要提高实验数据的准确性和加强数据的共享,便于城市非点源污染的定量化研究。

城市非点源污染模型仍需要进一步完善。虽然国外城市非点源污染研究起步较早,但模型仍不成熟,时常会出现模拟结果与实际偏差过大的情况。目前模型多数过于复杂,参数较多,增加了模型的不确定性,而且降低了适用性。因此,今后城市非点源模型将进一步向模块化发展,使模型既具有大尺度上的统一适用性,又具有小尺度上的差异针对性。

提高非点源控制措施在中国的适用性。当今流行的、完善的非点源控制措施以及效果评价体系都是欧美发达国家根据其自身特点制定的,由于自然条件、社会经济状况的差异,中国在利用这些控制措施时会遇到各方面的问题。因此,对国外非点源控制措施进行适当改进,使之适合中国城市状况,并且进一步发展自己的管理措施,是中国城市非点源研究的一个重要方面。

将城市非点源污染治理与城市规划、景观设计相结合。城市规划对中国城市发展的影响巨大,因此,在城市规划时该考虑非点源的防治,从城市发展的初始阶段重视非点源污染,在“源-过程-汇”各个阶段都加强对非点源污染的控制。而景观设计与城市非点源治理的结合,是利用景观设计将非点源管理措施恰当地融入城市景观之中,使其既能将发挥非点源控制的功能,又具有城市旅游、居民休闲、美化城市的效果。

参考文献

鲍全盛,王华东. 1996. 我国水环境非点源污染研究与展望. 地理科学, (1): 66-72.
常静,刘敏,许世远,等. 2006. 上海城市降雨径流污染时空分布与初始冲刷效应. 地理研究, 25(06): 994-1002.

董欣,杜鹏飞,李志一,等. 2008. 城市降雨屋面、路面径流水文水质特征研究. 环境科学, 29(3): 607-612.
黄国如,聂铁锋. 2012. 广州城区雨水径流非点源污染特征及污染负荷. 华南理工大学学报(自然科学版), 40(2): 142-148.
黄金良,杜鹏飞,欧志丹,等. 2006. 澳门城市小流域地表径流污染特征分析. 环境科学, 27(9): 1753-1759.
黄金良,涂振顺,杜鹏飞,等. 2009. 城市绿地降雨径流污染特征对比研究:以澳门与厦门为例. 环境科学, 30(12): 3514-3521.
荆红卫,华蕾,陈圆圆,等. 2012. 城市雨水管网降雨径流污染特征及对收纳水体水质的影响. 环境化学, 31(2): 208-215.
李怀恩,张亚平,蔡明,等. 2006. 植被过滤带的定量计算方法. 生态学杂志, 25(1): 108-112.
李家科,李怀恩,董雯,等. 2012. 西安市城区非点源污染特征与负荷估算. 水力发电学报, 31(4): 131-138.
李俊奇,毛坤,向露露. 2010. 京承高速公路径流污染负荷及初期冲刷效应研究. 中国给水排水, 26(18): 59-63.
李立青,尹澄清,何庆慈,等. 2006a. 城市降水径流的污染来源与排放特征研究进展. 水科学进展, 17(2): 288-294.
李立青,尹澄清,何庆慈,等. 2006b. 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. 环境科学学报, 26(7): 1057-1061.
李立青,朱仁肖,郭树刚,等. 2010. 基于源区监测的城市地表径流污染空间分异性研究. 环境科学, 31(12): 2896-2904.
李青云,田秀君,魏孜,等. 2011. 北京典型村镇降雨径流污染及排放特征. 给水排水, 37(7): 136-140.
李兆富,刘红玉,李燕. 2012. HSPF水文水质模型应用研究综述. 环境科学, 33(7): 2217-2223.
林莉峰,李田,李贺. 2007. 上海市城区非渗透性地面径流的污染特性研究. 环境科学, 28(7): 1430-1434.
刘燕,尹澄清,车伍. 2008. 植草沟在城市面源污染控制系统的应用. 环境工程学报, 2(3): 334-339.
马晓宇,朱元励,梅琨,等. 2012. SWMM模型应用于城市住宅区非点源污染负荷模拟计算. 环境科学研究, 25(1): 95-102.
马振邦,李超骥,曾辉,等. 2011. 快速城市化地区小流域降雨径流污染特征. 水土保持学报, 25(3): 1-6.
欧浪波,胡丹,黄晔,等. 2011. 北京城区屋面径流中PAHs的初期冲刷效应. 环境科学, 32(10): 2896-2903.
欧阳威,王玮,郝芳华,等. 2010. 北京城区不同下垫面降雨径流产污特征分析. 中国环境科学, 30(9): 1249-1256.
任玉芬,王效科,韩冰,等. 2005. 城市不同下垫面的降雨径流污染. 生态学报, 25(12): 3225-3230.
沈虹,张万顺,彭虹,等. 2011. 汉江中下游非点源磷负荷对水质的影响. 武汉大学学报(工学版), 44(1): 26-31.
沈桂芬,张敬东,严小轩,等. 2005. 武汉降雨径流水质特

- 征及主要影响因素分析. 水资源保护, **21**(2): 57-63.
- 孙艳伟, 魏晓妹, Pomeroy CA. 2011. 低影响发展的雨洪资源调控措施研究现状与展望. 水科学进展, **22**(2): 287-293.
- 王彪, 李田, 孟莹莹, 等. 2008. 屋面径流中营养物质的分布形态研究. 环境科学, **29**(11): 3035-3042.
- 王龙, 黄跃飞, 王光谦. 2010. 城市非点源污染模型研究进展. 环境科学, **31**(10): 2532-2540.
- 王晓燕, 张雅帆, 欧洋, 等. 2009. 最佳管理措施对非点源污染控制效果的预测——以北京密云县太师屯镇为例. 环境科学学报, **29**(11): 2440-2450.
- 温灼如, 苏逸深, 刘小靖, 等. 1986. 苏州水网城市暴雨径流污染的研究. 环境科学, (6): 2-6.
- 吴林祖. 1987. 杭州城市径流污染特征的初步分析. 上海环境科学, (6): 34-36.
- 邢薇, 赵冬泉, 陈吉宁, 等. 2011. 基于低影响开发(LID)的可持续城市雨水系统. 中国给水排水, **27**(20): 13-16.
- 邢可霞, 郭怀成, 孙延枫, 等. 2004. 基于HSPF模型的滇池流域非点源污染模拟. 中国环境科学, **24**(2): 102-105.
- 杨柳, 马克明, 郭青海, 等. 2004. 城市化对水体非点源污染的影响. 环境科学, **25**(6): 32-39.
- 杨德敏, 曹文志, 陈能汪, 等. 2006. 厦门城市降雨径流氮、磷污染特征. 生态学杂志, **25**(6): 625-628.
- 尹澄清. 2009. 城市面源污染的控制原理和技术. 北京: 中国建筑工业出版社.
- 张倩, 苏保林, 罗运祥, 等. 2012. 不同排水体制下城市降雨径流污染负荷核定方法. 北京师范大学学报(自然科学版), **48**(1): 86-91.
- 张科峰, 傅大放, 李贺. 2012. 不同屋面雨水径流中PAHs污染特性对比分析. 东南大学学报(自然科学版), **42**(1): 99-103.
- 张千千, 王校科, 郝丽玲, 等. 2012. 重庆市路面降雨径流特征及污染源解析. 环境科学, **33**(1): 76-82.
- 职锦, 郭太龙, 廖义善, 等. 2010. 非点源污染对人类健康影响的研究进展. 生态环境学报, **19**(6): 1459-1464.
- 周栋, 陈振楼, 毕春娟. 2012. 温州城事降雨径流磷的负荷及其初始冲刷效应. 环境科学, **33**(8): 2634-2643.
- Bachoc A. 1992. Solids transfer in combined sewer networks. Toulouse: Institute National Polytechnique de Toulouse.
- Bertrand JL, Chebbo G, Saget A. 1998. Distribution of pollutant mass vs volume in stormwater discharges and the first flush phenomenon. *Water Research*, **32**: 2341-2356.
- Brezonik PL, Stadelmann TH. 2002. Analysis and predictive models of stormwater runoff volumes, loads, and pollutant concentrations from watersheds in the Twin Cities metropolitan area, Minnesota, USA. *Water Research*, **36**: 1743-1757.
- Brun SE, Band LE. 2000. Simulating runoff behavior in an urbanizing watershed. *Computers, Environment and Urban Systems*, **24**: 5-22.
- Camorani G, Castellarin A, Brath A, et al. 2005. Effects of land-use changes on the hydrologic response of reclamation systems. *Physics and Chemistry of the Earth*, **30**: 561-574.
- Carle MV, Halpin PN, Stow CA. 2005. Patterns of watershed urbanization and impacts on water quality. *Journal of the American Water Resources Association*, **41**: 693-708.
- Chang M, Crowley CM. 1993. Preliminary observations on water quality of storm runoff from four selected residential roofs. *Journal of the American Water Resources Association*, **29**: 777-783.
- Charbeneau RJ, Barrett ME. 1998. Evaluation of methods for estimating stormwater pollutant loads. *Water Environment Research*, **70**: 1295-1302.
- Chebo G, Ashley R, Gromaire MC. 2003. The nature and pollutant role of solids at the water-sediment interface in combined sewer networks. *Water Science and Technology*, **47**: 1-10.
- Choi W, Deal BM. 2008. Assessing hydrological and land use change modeling for the Kishwaukee River basin. *Journal of Environmental Management*, **88**: 1119-1130.
- Deletic A. 1998. The first flush load of urban surface runoff. *Water Research*, **32**: 2462-2470.
- Deletic AB, Maksimovic CT. 1998. Evaluation of water quality factors in storm runoff from paved areas. *Journal of Environmental Engineering*, **124**: 869-879.
- Dietz ME, Clausen JC. 2008. Stormwater runoff and export changes with development in a traditional and low impact subdivision. *Journal of Environmental Management*, **87**: 560-566.
- Dietz ME. 2007. Low impact development practices: A review of current research and recommendations for future directions. *Water, Air and Soil Pollution*, **186**: 351-363.
- Förster J. 1996a. Heavy Metal and Iron Pollution Patterns in Roof Runoff. Seventh International Conference on Urban Storm Drainage, Proceedings, vol. I.
- Förster J. 1996b. Patterns of roof runoff contamination and their potential implications on practice and regulation of treatment and local infiltration. *Water Science and Technology*, **33**: 39-48.
- Geiger WF. 1987. Flushing effects in combined sewer systems. Proceedings of the 4th International Conference Urban Drainage, Lausanne.
- Gnecco I, Berretta C, Lanza LG, et al. 2005. Storm water pollution in the urban environment of Genoa, Italy. *Atmospheric Research*, **77**: 60-73.
- Goonetilleke A, Thomas E, Ginn S, et al. 2005. Understanding the role of land use in urban stormwater quality management. *Journal of Environmental Management*, **74**: 31-42.
- Gromaire MC, Garnaud S, Gonzalez A, et al. 1999. Characterisation of urban runoff pollution in Paris. *Water Science and Technology*, **39**: 1-8.
- Gromaire MC, Garnaud S, Saad M, et al. 2001. Contribution of different sources to the pollution of wet weather flows in combined sewers. *Water Research*, **35**: 521-533.

- Gupta K, Saul AJ. 1996. Specific relationships for the first flush load in combined sewer flows. *Water Research*, **30**: 1244–1252.
- Hall MJ, Ellis JB. 1985. Water quality problems of urban areas. *GeoJournal*, **11**: 265–275.
- He W, Wallinder O, Leygraf C. 2001. A laboratory study of copper and zinc runoff during first flush and steady-state conditions. *Corrosion Science*, **43**: 127–146.
- Jang S, Cho M, Yoon J, et al. 2007. Using SWMM as a tool for hydrologic impact assessment. *Desalination*, **212**: 344–356.
- Jia H, Lu Y, Yu SL, et al. 2012. Planning of LID-BMPs for urban runoff control; The case of Beijing Olympic Village. *Separation and Purification Technology*, **84**: 112–119.
- Johanson RC, Kittle JL. 1983. Design, programming and maintenance of HSPF. *Journal of Technical Topics in Civil Engineering*, **109**: 41–57.
- Kappel WM, Yager RM, Zarriello PJ. 1986. Quantity and quality of urban storm runoff in the Irondequoit Creek basin near Rochester, New York. Water-Resources Investigations Report 85–4113.
- Kayhanian M, Suverkropp C, Ruby A, et al. 2007. Characterization and prediction of highway runoff constituent event mean concentration. *Journal of Environmental Management*, **85**: 279–295.
- Kern U, Wüst W, Daub J, et al. 1992. Abspülverhalten von Schwermetallen und organischen Mikroschadstoffen im Straßenabfluß. *Gwf-Wasser-Abwasser*, **133**: 567–574.
- Lee JH, Bang KW, Ketchum LH, et al. 2002. First flush analysis of urban storm runoff. *Science of the Total Environment*, **293**: 163–175.
- Lee JH, Bang KW. 2000. Characterization of urban stormwater runoff. *Water Research*, **34**: 1773–1780.
- Lee SB, Yoon CC, Jung KW, et al. 2010. Comparative evaluation of runoff and water quality using HSPF and SWMM. *Water Science and Technology*, **62**: 1401–1409.
- Liaw CH, Cheng MS, Tsal YL. 2001. Low-impact development: An innovative alternative approach to stormwater management. *Journal of Marine Science and Technology*, **8**: 41–49.
- Ma JS, Kang JH, Kayhanian M, et al. 2009. Sampling issues in urban runoff monitoring programs: Composite versus grab. *Journal of Environmental Engineering*, **135**: 118–127.
- Ma ZB, Ni HG, Zeng H, et al. 2011. Function formula for first flush analysis in mixed watersheds; A comparison of power and polynomial methods. *Journal of Hydrology*, **402**: 333–339.
- Obermann M, Rosenwinkel KH, Tournoud MG. 2009. Investigation of first flushes in a medium-sized Mediterranean catchment. *Journal of Hydrology*, **373**: 405–415.
- Park SY, Lee KW, Park IH, et al. 2008. Effect of the aggregation level of surface runoff fields and sewer network for a SWMM simulation. *Desalination*, **226**: 328–337.
- Saget A, Chebbo G, Bertrand-Krajewski J. 1996. The first flush in sewer system. *Water Science and Technology*, **33**: 101–108.
- Sansalone J, Buchberger SG. 1997. Partitioning and first flush of metals in urban roadway storm waters. *Journal of Environmental Engineering*, **123**: 134–143.
- Sheng Y, Ying G, Sansalone J. 2008. Differentiation of transport for particulate and dissolved water chemistry load indices in rainfall-runoff from urban source area watersheds. *Journal of Hydrology*, **361**: 144–158.
- Tsihrintzis VA, Hamid R. 1998. Runoff quality prediction from small urban catchments using SWMM. *Hydrological Processes*, **12**: 311–329.
- US EPA Office of Water. 2000. National Water Quality Inventory [EB/OL]. [2012-06-27]. <http://www.epa.gov/305b/2000report/>
- Vorreiter L, Hickey C. 1994. Incidence of the first flush phenomenon in catchments of the Sydney region. Institution of Engineers.
- Wang L, Lyons J, Kanehl P. 2001. Impacts of urbanization on stream habitat and fish across multiple spatial scales. *Environmental Management*, **28**: 255–266.
- Wang L, Wei JH, Huang YF, et al. 2011. Urban nonpoint source pollution buildup and washoff models for simulating storm runoff quality in the Los Angeles County. *Environmental Pollution*, **159**: 1932–1940.
- Wilson G. 1993. Analysis of urban stormwater quality from the Minneapolis chain of lakes watershed. MS Thesis. Minneapolis: University of Minnesota.
- Zoppou C. 2001. Review of urban storm water models. *Environmental Modelling & Software*, **16**: 195–231.

作者简介 李春林, 男, 1985年生, 博士研究生, 主要从事景观生态学、城市扩展与城市非点源污染的研究。E-mail: lichunlin1020@163.com
责任编辑 李凤芹
