

城市雨水径流热污染及其缓解措施研究进展

李小静,李俊奇,戚海军,孙昆鹏,宋瑞宁

(北京建筑工程学院城市雨水系统与水环境省部级共建教育部重点实验室,北京 100044)

摘要:阐述了城市雨水径流热污染对受纳水体的影响,尤其是对鳟鱼、鲑鱼等冷水鱼的危害,分析了城市下垫面对雨水径流温度的影响,指出非渗透路面所储存的大量热量促使雨水径流的温度升高。综述了国内外城市雨水径流热污染效应及雨水管理措施对径流温度影响方面的研究现状,指出我国开展径流热污染研究及采取缓解措施的必要性。在对发达国家和我国的雨水管理措施缓解城市雨水径流热污染效果评析的基础上,结合我国典型城市特点提出了缓解城市雨水径流热污染效应的若干建议。

关键词:城市雨水;径流;径流温度;热污染;冷水鱼类;雨水管理

中图分类号:X52 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2013)01-0089-06

Advance in thermal pollution of urban rainfall runoff and its mitigation measures//LI Xiaojing, LI Junqi, QI Haijun, SUN Kunpeng, SONG Ruining (*Ministry of Education Key Laboratory of Urban Stormwater System and Water Environment, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China*)

Abstract: The influences of urban runoff thermal pollution on urban surface water and cold-water fishes like trout and salmon were studied. The influence analysis of the urban underlying surface on the temperature of rainwater runoff showed that thermal energy absorbed and stored by urban impervious surfaces caused the temperature increase of rainwater runoff. The research status of the influence of runoff thermal pollution and management practices on runoff temperature were summarized and it is pointed out that it is necessary to study runoff thermal pollution and to take mitigation measures. Based on the effects of mitigation measures on urban runoff thermal pollution in developed countries and China, some suggestions are made for reducing rainwater runoff thermal pollution according to the characteristic of typical cities in China.

Key words: urban rainwater; runoff; temperature of runoff; thermal pollution; cold-water fishes; management of rainwater

温度是水体的一个重要物理指标,水体温度升高后,会对水生动植物的生存环境产生危害。水体的热污染会加快化学反应速率,促使细菌繁殖,降低水中溶解氧浓度。水生生物的新陈代谢、行为活动、酶的活性、繁殖行为以及食物链上的生命体等都会直接或间接受到水温升高的影响,生活在冷水域的水生动物(如鳟鱼、鲑鱼等)对温度尤为敏感。究其根源,流域水环境温度的升高有自然因素和人为因素两方面原因。自然因素主要为气候变暖、河流形态改变、地表水汇入和河道遮阴植物消失等。虽然河流水温随季节和日常变化呈自然波动,但人为活动对其温度升高也有很大的影响,如工业高温废水、发电站冷却水等未经处理排放后都会造成受纳水体温度上升。除此之外,由于人类开发利用土地使城市非渗透下垫面比例大幅增加,雨水径流入渗量减少,滨水遮阴植物移除和城市热岛效应的综合人为因素,使城市雨水径流所携带热量也成为水体热污染的另一重要来源^[1-3]。随着城市规模的不断扩大,城市雨水径流热污染源对受纳水体温度升高的贡献率在不断加大。从整体来看,尽管工业排放的点源热污染大多通过换热等工艺得到缓解,但受纳水体温度激升的现象并未因此得到改善。因此,要想全面保护流域生态水环境,城市雨水径流热污染问题应予以重视,并且有必要通过合理的场地开发,人工模拟自然水文条件,采取有效的雨水综合管理措施来控制因开发而导致的城市雨水径流热污染效应和降低城市雨水径流对受纳水体的影响。为此,本文对城市雨水径流热污染效应及相关的雨水管理措施

1 城市雨水径流热污染效应及其污染源

1.1 雨水径流温度对受纳水体的影响

近年来,城市化加速发展带来了诸多雨洪问题,其中除了受到广泛重视的生态环境恶化、内涝频发、河道泄洪压力大、地下水位大幅下降、城市下游受到洪涝威胁等问题以外,城市径流污染受纳水体的问题也十分突出。虽然城市雨水径流中的沉淀物和化学污染物对水体的影响已引起重视,但往往忽视了受纳水体温度因城市地表径流汇入而短时内迅速升高的现象。James 等^[4]的研究表明,城市温热的沥青铺装形成的雨水径流会引起受纳河流温度升高 5℃,在极端条件下甚至高达 10 ~ 12℃。据美国国家气候资料中心的数据显示,雨水排水管道出水的场径流平均温度(event mean temperature, EMT)为 12℃(偏差±7℃),比作为冷水河流水源的地下水平均温度 8.3℃要高^[5]。Herb 等^[6]研究发现,在以下 3 种条件雨水热污染对受纳水体的影响更为严重:①气温和露点温度比河流水温高的情况,如一些以地下水作为水源且其温度比环境温度低的河流;②降雨历时短、强度大和降雨过程中同时出太阳的情况;③非渗透面积所占比例较大的汇水区域。

屋顶、路面、停车场、混凝土铺装等城市硬化地表均有高储热能力,降雨在其表面形成径流的温度会升高,从而排入受纳水体后对水体造成热污染。这种超过水体正常温度水平的雨水径流一方面直接对水生生物造成不利影响,如影响水生生物正常的产卵、生长及新陈代谢;另一方面热污染引起水质恶化而改变水生生物的生境,水体中溶解氧含量降低,水体富营养化进程加快,致病菌的数量增加,并且会加速水中重金属的溶解和有机毒物的形成^[7]。此外,研究表明城市雨水径流温度升高还会导致合流制溢流(combined sewer overflow, CSO)中氨的释放量增加^[8]。对于冷水鱼类来说温度是其生存的关键因素。鳟鱼和鲑鱼是许多国家和地区重要的垂钓鱼和食用鱼,一般栖息在较凉的淡水中,最适宜温度为 10 ~ 16℃,在所有鱼类中它们对水温变化最敏感。美国环境保护局制定的太平洋西北部州县水体温度导则中显示,成年鳟鱼和鲑鱼的致死温度为 21 ~ 22℃(暴露时间为 7 d),而冷水鱼健康成长、产卵阶段则需要更低的温度^[9]。在 Rossi 等瑞士学者进行的雨水温度对棕鳟鱼栖息地影响评估研究中,根据棕鳟鱼所能承受的最大水温变化,确定降雨初期径流引起受纳水体温度的激增不得超过 7℃^[8]。

1.2 下垫面对雨水径流温度的影响

城市雨水径流引起受纳水体的热污染与城市不透水面积增加有很大关系。一方面不透水面积导致洪峰流量增加、渗透量减少、汇流时间缩短,造成排入受纳水体的径流量在短时间内激增;另一方面,在夏季,一些城市规划区域由不透水地面占主导的热岛效应明显,不仅气温比城市周围偏高,而且不透水铺装表面温度较绿地等透水性地表的温度要高很多。降雨产流过程中,大面积不透水铺装表面储存的太阳辐射热量转移至地表径流,温度较高的雨水径流排入受纳水体将对冷水域生物的栖息环境造成危害。特别是以沥青类材料铺设的道路、停车场、广场等,由于沥青的热导率和反射率低,大量太阳辐射的热量蓄积在材料表层,径流温度呈现出短期内迅速升高,之后随降雨的持续逐渐降低的规律。

在夏季,由于沥青混凝土表面与绿地在蓄积热量和向雨水径流转移热量的能力等方面存在明显差异,非渗透表面所产生的径流温度要比草坪等自然渗透表面高很多。Thompson 等^[10]通过人工模拟降雨,对两块面积相近的沥青路面与草坪的产流温度特性进行了监测比较,结果表明:降雨前沥青路面的平均温度达 43.6℃,60 min 的模拟降雨历时中沥青路面的温度平均下降了 12.3℃,这部分热量绝大部分被径流带走;沥青混凝土下垫面的初期径流平均温度高达 35℃,直到降雨结束时平均温度下降了 4.1℃;与此相反,草坪地表在降雨前平均温度只有 23.3℃,降雨后草坪的平均温度却上升了 1.3℃;草坪下垫面产生的径流平均温度也只有 25.5℃,而且温度在降雨过程中基本保持不变。通过计算证明沥青路面径流的热量是草坪径流热量的 3.6 倍^[10]。可见,大面积的沥青路面产生温度大幅变化的径流一旦在短时间内排入受纳水体,将会对那些温度波动适应性差的冷水鱼类产生威胁。因此,在有冷水鱼分布的地区进行土地利用规划时,同一汇水区域内应采用不透水面积与绿地相结合的形式,发挥绿地在缓解雨水热效应中的作用。

透水性路面由于其表面产流少或不产流及内部渗流作用,它对雨水径流热污染也有改善作用。Barbis 等^[11]研究了表层铺设多孔渗透铺装的渗滤床对径流温度的影响。采用多孔渗透铺装作为温度缓解措施,将雨水径流的热量通过多孔渗透铺装传导至底层的石灰岩渗滤床,从而达到有效降低高温径流温度的目的。Barbis 团队对位于宾夕法尼亚州的维拉诺瓦大学内一个停车场地面(30 m×9 m)采用多孔渗透铺装进行了改造,其中一半采用可渗透水泥混凝土构造,另一半采用多孔沥青混凝土构造,

2009 年夏季实测分析了 9 场雨水,结果显示径流出水平均温度降低,温度波动范围缩小。分析其原因,渗透路面较为常用的材料是无砂混凝土和多孔沥青,虽然这些材料的表面也会像普通沥青一样储存太阳辐射的热能,但其不同之处在于雨水径流能够穿过多孔渗透铺装渗入底部没有受阳光直射的石料储水层。底层石料的温度比流经表层的径流温度要低,二者因存在温差而进行热交换,使得径流温度降低。此外,透水性路面起到了大幅度减少径流量和延迟洪峰的作用,也有利于缓解雨水径流热效应。

2 国外雨水管理措施对缓解城市径流热污染的效果评析

目前,城市化对周围水体的影响日益受到重视,其中,人为因素所带来的水生生物栖息环境恶化已成为一个重要的研究课题,但大多数研究集中于水流流态、沉淀物及化学污染等方面。美国、加拿大、瑞士等发达国家已注意到由城市化引起的径流热污染是冷水鱼类栖息地环境恶化的一个重要因素。一些生态和环境领域内的学者研究了雨水径流温度对受纳水体以及鳟鱼等冷水鱼类的影响,并提出了一些评估其影响的模型^[2-3,12-13]。近几年,才逐渐开展最佳管理措施(best management practices, BMPs)和低影响开发(low impact development, LID)对径流温度的影响研究^[14-17]。

2.1 生物滞留措施对径流温度的影响

生物滞留措施是在地势较低的区域种植植物,通过植物截流、土壤过滤滞留处理小流量雨水径流的人工生态措施。生物滞留措施是 BMPs 及 LID 中一项将雨水滞留减排和景观、绿化结合且适应性很广的措施。生物滞留措施能够促进雨水渗透而减小径流量,再加上饱和土壤的热容较高且降低雨水径流温度的能力强,使其较雨水湿地和湿塘措施在一些水温敏感区域减少径流热污染方面有很好的应用前景。

在美国北卡罗来纳州西部, Jones 等^[14]沿美国鳟鱼栖息地进行了一项生物滞留区域对径流温度影响的研究。2006 和 2007 年夏季对 4 块不同大小的生物滞留系统进行了监测,结果表明,生物滞留措施能够有效缓解径流热污染。生物滞留系统的土壤厚度、有效面积等设计参数是降低径流温度的关键。研究发现,出水温度与生物滞留系统的土壤厚度有关,越深处出水温度越低, Jones 等^[14]推荐生物滞留的最佳排水深度范围为 90 ~ 120 cm。此外,系统有效面积占汇水区域比例决定了进入生物滞留系统设计雨水径流量,研究显示这一比例较小的生物滞留系统

(4% ~ 7%) 在出水口相对于入水口水温的最高值和中位数都有显著降低。相比之下,有效面积所占比例较大的生物滞留系统(11% ~ 16%) 由于出水量大幅减少对径流最高温度降低效果也同样显著,但出口温度中位数降低幅度不如较小的系统明显。

2.2 雨水湿地和湿塘对径流温度的影响

雨水湿地和湿塘均具有滞蓄减排雨水、削减峰流量、减轻对下游的侵蚀和生态净化雨水等功能。 Jones 等^[15]在鳟鱼生存的温度敏感水域研究了雨水湿地和湿塘对径流温度的影响,结果表明,由于雨水湿地和湿塘的水面温度波动较大,一般出水口设在水面上层的雨水湿地、湿塘都不能起到降低径流温度的作用,甚至出现出水温度高于进水温度的结果,反而成为热污染的来源。针对这一负面影响, Jones 等^[15]提出并证实了经雨水湿地或湿塘处理雨水后,与系统表层出水相比采用地下管道输送会缓解温度升高,水面以下的管道遮阴和热传导作用能够显著降低出流水温。试验表明,在水温敏感区域,这些 BMPs 系统在实现去除沉淀物、营养物和重金属目标的前提下,能够通过合理设计、优化出水口构造(塘或湿地底部设塑料穿孔管且周围堆置卵石与出水管连接构造见图 1)、种植浮叶植物以及采用地下管道运输等方式将热污染最小化。

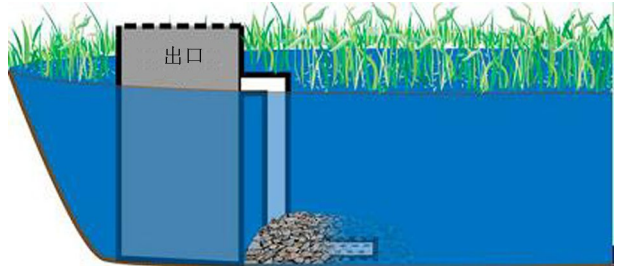


图 1 雨水湿地和湿塘底部出水口优化构造示例

2.3 平流式植物过滤带对径流温度的缓解效果

Winston 等^[16]进行了平流式植物过滤带(level spreader-vegetative filter strips, LS-VFS)对径流温度影响和热负荷的研究,2008 和 2009 年夏季监测了两个 LS-VFS 排水系统。雨水径流分别经过盲沟进入水平布水器分配至植物过滤带处理,其中一个较小的植物过滤带宽 4 m、长 7.6 m,且植被全部为草坪缓冲带,另一个较大的植物过滤带宽 4 m、长 15.2 m,其长度方向上前 7.6 m 为草坪缓冲带,后 7.6 m 为树木缓冲带。研究结果显示,两个 LS-VFS 系统都明显降低了径流温度的中位数和最高值。由于过滤沟宽度的增加和树木遮阴的作用,15.2 m 过滤带出水温度中位数和最高值略低于 7.6 m 过滤带出水温度。与主要依靠调节的雨水控制措施(如湿塘和雨水湿地)相比,LS-VFS 能够较明显降低径流

温度,可能是雨水与较冷填料基质有一定接触时间,以及初期温度较高的雨水入渗的原因。

2.4 多种 BMPs 措施缓解效果对比

滞留塘(湿塘)、调节塘(干塘)、植草沟、生物滞留、卵石湿地都是 BMPs 中较为常用的措施。大部分 BMPs 系统设计时并没有考虑降低热污染效应,然而这些措施在收集和处理雨水径流时也会对径流温度有所影响。Roseen 等学者组成的新罕布什尔大学雨水团队,在 2005—2008 年监测了一系列采取 BMPs 雨水管理措施的径流温度,分析了其对雨水径流温度的影响及与已有环境指标的关系^[17]。初步研究表明,卵石床湿地对缓解径流热污染最有效,调节塘和滞留塘都会明显增加径流温度。有水面直接暴露在阳光下的系统会使径流温度升高,但渗滤和过滤的处理系统通过与地下的低温物质发生热交换能够降低径流温度。处理系统的表面积越大水温变化幅度越大,而地表以下结构越大的处理系统缓解径流温度的作用越强。

目前,最为常用的雨水径流温度指标是场径流平均温度,用来表示一场降雨全过程排放雨水径流的平均温度(见式(1)),与场降雨平均污染物浓度一并用于表达雨水管理措施的性能。Roseen 等^[17]提出了将河流 7 月平均温度作为监测指标的观点,虽然详细的场径流平均温度能够较为准确地反映一个系统对径流温度的影响,但其测试过程花费过多时间和精力,监测过程中发现采取雨水管理措施的下游河流 7 月的平均温度与其对径流温度影响有一定的相关性。因此,Roseen 等^[17]探讨了评价系统运行状况时引入河流 7 月平均温度(mean July temperature)这个环境指标^[17]。

$$T_{EM} = \frac{C_{th}}{V} = \frac{\int_0^T t(t)q(t)dt}{\int_0^T q(t)dt} \tag{1}$$

式中: T_{EM} 为场径流平均温度,℃; C_{th} 为热容,J/K; V 为总径流量, m^3 ; T 为径流持续时间,min; $t(t)$ 为径流瞬时温度,℃; $q(t)$ 为径流瞬时流量, m^3/min 。

3 国内雨水径流热污染研究

目前,我国城市正经历历史上规模最大、速度最快的扩张,城市化对周围水体的影响会日益增大。我国许多城市内河、水库在夏季暴雨后常常出现水体溶解氧升高、藻类大量繁殖乃至严重的水华现象,并且大面积死鱼的事件也时有发生,在其中一些事件中环保部门采样监测结果未检出重金属、氰化物等污染物,仅是河水中溶解氧低于渔业水质标准。

尽管雨水径流温度是否是一大诱因还需要进一步调查和研究,但在我国冷水鱼分布的地区雨水径流对受纳水体温度的影响应予以重视。我国北起黑龙江,南至广东,西自四川,东到江浙一带的江河湖泊中均有鳊鱼的分布,它具有很高的药用、食用和垂钓价值。夏季城市地表汇集的高温径流排入冷水鱼类的栖息水体,会对其产生不可逆转的危害。然而,不仅是鳊鱼等冷水鱼类会受到雨水径流污染的影响,在城市雨水受纳水体中其他水生动物生存和市内水体水质也会受到不同程度的不利影响。为避免因雨水径流排放而导致水域温度升高、溶解氧下降、水体水质恶化、鱼类大面积死亡的现象,针对局部区域采取有效缓解径流热污染的保护性措施是有必要的。

我国 GB3838—2002《地表水环境质量标准》中规定:人为造成的环境水温变化应限制在周平均最大温升小于 1℃^[18]。这里所指的“人为”仅考虑了工业企业等温热废水的排放,却忽视了“城市化”这一整体化的人为影响。面对城市雨水径流污染如何实现“谁污染谁治理”,由此造成的损失又由谁来负责,应该意识到这一责任需要政府、开发商、业主以至于全民来共同承担,应以雨水排放许可制度为核心,各地因地制宜地实施雨水管理措施。

我国在雨水管理措施对雨水径流温度影响的深入研究方面仍处于起步阶段。户园凌^[19]在 LID 雨水系统综合效益的分析研究中涉及 LID 雨水措施对雨水径流温度的影响,选取北京长河湾为研究对象,2011 年 8 月分别在普通屋顶下、雨水花园出口、植被缓冲带出口处监测了雨水径流温度。结果表明,非渗透屋面汇流的雨水径流有明显的初期高温效应,相比之下采取就地入渗型 LID 措施——雨水花园和植被缓冲带的径流温度明显低于屋面雨水径流温度。

北京建筑工程学院城市雨水系统与水环境生态技术研究团队于 2012 年 9 月在深圳市光明新区开展了径流温度监测试验。监测了牛山公园内路面、河河北路混凝土路面和沥青路面、滨河苑小区停车场(混凝土)、法政路沥青路面、行政配套区 36 号路和 38 号路的共计 5 场降雨径流温度。由于深圳夏季日照时间长且太阳辐射强,降雨时地表和雨水径流温度较高。野外监测表明,夏季沥青和混凝土路面中储存的热量会向雨水径流中转移,降雨过程中沥青路面和混凝土路面的径流温度(30.2 ~ 34.1℃)明显高于路面温度(25.4 ~ 32.0℃)和大气温度(22.7 ~ 29.4℃)。特别地,LID 示范区 36 号路和 38 号路的行车道构造为开级配沥青(OGFC)的透水沥青路面,道路两侧绿化带为斜槽沉沙池与植

生滞留槽的 LID 设施组合系统。虽然吸热性能强的透水沥青路面和混凝土沉淀池出水径流温度在 30℃ 以上,但从径流温度随降雨过程呈现出逐渐升高的趋势,可以看出相对于传统非渗透路面其初期热污染效应减弱,延缓了径流升温时间。同时,高温的雨水径流经过植生滞留槽后出水温度明显降低,降雨后期约 30 min 后系统出水温度降至 26.4℃。

我国大多数城市雨水径流多以雨水管道或合流管道排泄,偏重于雨水快速排放,未曾注意过雨水径流热污染这一影响。目前,分流制排水管道系统的设计原则要求尽量利用自然地形坡度,将雨水就近排入池塘、河流、湖泊等水体中,这将引起水体温度激增,尤其是在夏季城市道路雨水径流短时间内排入水体时。雨污合流制系统在暴雨天时,部分雨水截留至污水厂处理,流量超过截流干管的设计输水能力后,雨水携带混合污水直接溢流到就近的受纳水体中。合流制溢流不仅会使混合污水中的污染物溢入水体造成污染,而且雨水径流和生活污水所携带的热量也一并传输至水体,是造成城市内河等水体热污染的潜在威胁。不同排水体制对径流温度的影响程度仍有待进一步监测与分析。

4 我国城市雨水径流热污染缓解建议

LID 雨水管理措施的集蓄利用、延时排放和渗透等功能是控制径流热污染的有效方式。21 世纪初,我国相当多的城市逐渐开始重视雨水利用及渗透,积极采取自然截流下渗、人工强化增渗、延时滞留与调蓄排放、初期径流污染控制和合流制溢流污染控制等综合性雨水管理措施。然而,在推行雨水管理措施的过程中,仍然因缺乏深入的技术研究和科学的实践指导而面临诸多问题。大量实际工程的实施证明,采取 LID 措施有利于城市径流污染控制及防治城市内涝,但在温度敏感水域缓解热污染效应方面应注意科学选择 LID 设施类型。为此提出缓解我国城市雨水径流热污染的几点建议:

a. 城市场地开发时应注意下垫面材料的选择,减少城市非渗透表面所占比例,增加城市绿化面积,保护区域生态环境。推荐在公园、居民区及人行道等适宜地区采用多孔渗透铺装、透水沥青路面、嵌草砖等透水路面,减少场地径流外排量的同时降低城市下垫面平均温度。此外,推荐采用绿色屋顶,避免采用沥青等吸热性能强的材料直接铺设于屋面表层,同时可以收集屋面雨水。通过源头生态措施模拟自然水文条件削减径流量,可从根本上减少排入受纳水体的径流热污染总量。

b. 当受纳水体为温度敏感水域时,保护自然滨

水植物或人工种植植物以起遮阴作用,设计 LID 措施应充分考虑它们对径流温度的影响,尽量选择具有较强渗透功能的措施,如生物滞留、卵石湿地、植物过滤沟等,以利用其较大的地下结构对高温径流进行冷却。特别是高速公路汇集的高温雨水径流直接排入附近水体的情况,应采用以上措施缓解高温径流对水体的污染。

c. 对于湿塘、雨水湿地及多功能调蓄水体等具有水面宽阔特点的雨水管理措施,可通过合理设计系统深度和有效面积,优化植物种植和出水口构造,出口采用地下管道及底部铺设卵石等改进设计,以抵消其因阳光照射而造成出水升温的现象,从而达到缓解雨水径流热污染的效应。

5 结 语

缓解城市雨水径流热污染也是径流控制的重要方面。国外城市在选择雨水管理措施时,已开始评价并重视其对雨水径流温度的影响,然而我国有关防治雨水径流热污染方面的研究还很少。采取有效的雨水综合管理措施来控制城市径流热污染效应和降低雨水径流对受纳水体的影响是非常有必要的。除加强技术手段之外,还要加大科研力度,不断完善各项控制手段和措施,加强监测与管理。同时,还要不断完善城市雨水管理的政策法规,逐步推行雨水排放许可等管制手段与经济激励手段协同作用机制,充分发挥宣传教育与示范引导的作用,提高技术人员和公众的意识,多管齐下,协作共管,方可对包括热污染在内的径流污染进行科学控制,维护城市生态水系统的健康。

参考文献:

[1] NELSON K C, PALMER M A. Stream temperature surges under urbanization and climate change: data, models, and responses [J]. American Water Resources Association, 2007, 43 (2): 440-452.

[2] THOMPSON A M, WILSON T, NORMAN J M, et. al. Modeling the effect of summertime heating on urban runoff temperature [J]. American Water Resources Association, 2008, 44 (6): 1548-1563.

[3] HAQ R U, JAMES W. Thermal enrichment of stream temperature by urban storm water [C] // STRECKER E W, HUBER W C. Global Solutions for Urban Drainage. Portland: American Society of Civil Engineers, 2002: 1-11.

[4] JAMES W, XIE J. Modeling thermal enrichment of streams due to solar heating of local urban stormwater [C] // JAMES W. New Applications in Modeling Urban Water

- Systems. Toronto: Computational Hydraulics International, 1999: 141-160.
- [5] National Climatic Data Center (NCDC). Climate maps of the united states: mean daily average temperature (annual) [R]. Washington D. C. : National Oceanic and Atmospheric Association, 2005.
- [6] HERB W R, JANKE B, MOHSENI O, et al. Thermal pollution of streams by runoff from paved surfaces [J]. Hydrological Processes, 2008, 22 (7) : 987-999.
- [7] VAN BUREN M A, WATT W E, MARSALEK J. Thermal enhancement of stormment runoff by paved surfaces [J]. Water Research, 2000, 34 (4) : 1359-1371.
- [8] ROSSI L, HARI R E. Screening procedure to assess the impact of urban stormwater temperature to populations of brown trout in receiving water [J]. Integrated Environmental Assessment and Management, 2007, 3 (3) : 383-392.
- [9] U. S. Environmental Protection Agency. EPA region 10 guidance for pacific northwest state and temperature water quality standards [R]. Seattle: Region 10 Office of Water, 2003.
- [10] THOMPSON A M, KIM K, VANDERMUSS A J. Thermal characteristics of stormwater runoff from asphalt and sod surfaces [J]. Journal of the American Water Resources Association, 2008, 44 (5) : 1325-1336.
- [11] BARBIS J, WELKER A L. Stormwater temperature mitigation beneath porous pavements [C] // RICHARD N. World Environmental and Water Resources Congress 2010: Challenges of Change. Providence: American Society of Civil Engineers, 2010: 3971-3979.
- [12] HERB W R, POSSLEY NELSON T M, CHAPMAN K A. Modeling the thermal impact of land use change in the Vermillion River trout stream watershed, MN [C] // KENNETH W. Watershed Management 2010. Madison: American Society of Civil Engineers, 2010, 1328-1339.
- [13] HERB W R, JANKE B, MOHSENI O, et al. Runoff temperature model for paved surfaces [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2009, 14 (10) : 1146-1155.
- [14] JONES M P, HUNT W F. Bioretention impact on runoff temperature in trout sensitive waters [J]. Journal of Environmental Engineering, 2009, 135 (8) : 577-585.
- [15] JONES M P, HUNT W F. Effect of storm-water wetlands and wet ponds on runoff temperature in trout sensitive waters [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2010, 136 (9) : 656-661.
- [16] WINSTON R J, HUNT W F, LORD W G. Thermal mitigation of urban storm water by level spreader-vegetative filter strips [J]. Journal of Environmental Engineering, 2011, 137 (8) : 707-716.
- [17] ROSEEN R M, DIGENNARO N, WATTS A, et al. Preliminary results of the examination of thermal impacts from stormwater BMPs [C] // RICHARD N. World Environmental and Water Resources Congress 2010: Challenges of Change. Providence: American Society of Civil Engineers, 2010: 3424-3451.
- [18] GB 3838—2002 地表水环境质量标准 [S].
- [19] 户园凌. 低影响开发雨水系统综合效益的分析研究 [D]. 北京: 北京建筑工程学院, 2011.
- (收稿日期: 2012-04-28 编辑: 熊水斌)

(上接第 61 页)

- [6] 汪基伟. 船闸裂缝成因及加固措施的研究 [J]. 水利水电技术, 2001, 32 (9) : 5-9. (WANG Jiwei. Study on cause of cracking and improvement measures of a lock [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2001, 32 (9) : 5-9. (in Chinese))
- [7] 汪基伟, 张雄文, 林新志. 考虑黏结滑移的平面组合式单元模型研究与应用 [J]. 工程力学, 2008, 25 (1) : 97-102. (WANG Jiwei, ZHANG Xiongwen, LIN Xinzh. Research and applications of a plane embedded combined element model considering bond and slip [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25 (1) : 97-102. (in Chinese))
- [8] 龙渝川, 张楚汉, 周元德. 钢筋混凝土嵌入式滑移模型 [J]. 工程力学, 2007, 24 (增刊 1) : 41-45. (LONG Yuchuan, ZHANG Chuhan, ZHOU Yuande. Embedded slip model for analyzing reinforced concrete structures [J]. Engineering Mechanics, 2007, 24 (Sup1) : 41-45. (in Chinese))
- [9] DARWIN D, PECKNOLD D A. Non-linear bi-axial stress-strain law for concrete [J]. Journal of the Engineering Mechanics Division, 1977, 103 (2) : 229-241.
- [10] 汪基伟, 朱虹, 王红. 平面应变状态混凝土等效单轴应变本构模型研究 [J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2002, 30 (1) : 6-10. (WANG Jiwei, ZHU Hong, WANG Hong. Equivalent uniaxial constitutive model of concrete in plane strain [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2002, 30 (1) : 6-10. (in Chinese))
- [11] 汪基伟, 陈玉泉. 平面应变混凝土强度变形试验与等效单轴应变本构模型 [J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2005, 35 (5) : 775-779. (WANG Jiwei, CHEN Yuquan. Strength-deformation test and equivalent uniaxial constitutive model of concrete in plane strain [J]. Journal of Southeast University: Nature Sciences, 2005, 35 (5) : 775-779. (in Chinese))
- [12] 康清梁. 钢筋混凝土有限元分析 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1996.
- (收稿日期: 2012-04-22 编辑: 熊水斌)