

海绵城市

## 北方严寒地区LID设施建设面临的挑战及优化策略

王思思<sup>1,2</sup>, 任朝阳<sup>1</sup>, 王文亮<sup>1,3</sup>, 苏毅<sup>2,4</sup>, 袁冬海<sup>1,2</sup>, 孙喆<sup>4</sup>

(1. 北京建筑大学 城市雨水系统与水环境教育部重点实验室, 北京 100044; 2. 北京建筑大学  
北京未来城市设计高精尖创新中心, 北京 100044; 3. 北京建筑大学 海绵城市研究院, 北京  
100044; 4. 北京建筑大学 建筑与城市规划学院, 北京 100044)

**摘要:** 由于北方严寒地区独特的气候特点, 海绵城市的建设尤其是低影响开发设施的设计及维护, 都面临着极大的挑战。通过分析严寒气候对低影响开发设施的影响, 并依据国内外研究经验, 对严寒地区低影响开发设施的规模计算、结构优化、维护管理等方面提出相应策略, 以期加强我国海绵城市建设在严寒地区的应对能力。

**关键词:** 严寒地区; 低影响开发设施; 优化策略; 运行维护

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)10-0001-07

## Challenges and Optimization Strategies for Construction of LID Facilities in the Cold Regions of Northern China

WANG Si-si<sup>1,2</sup>, REN Chao-yang<sup>1</sup>, WANG Wen-liang<sup>1,3</sup>, SU Yi<sup>2,4</sup>, YUAN Dong-hai<sup>1,2</sup>,  
SUN Zhe<sup>4</sup>

(1. Key Laboratory of Urban Stormwater System and Water Environment <Ministry of Education>, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 2. Beijing Advanced Innovation Center for Future Urban Design, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 3. Institute of Sponge City and Stormwater Management, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 4. School of Architecture and Urban Planning, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China)

**Abstract:** The unique climate characteristics in the cold regions of northern China have caused the great challenges to the construction of the sponge cities, especially design and maintenance of LID facilities. By analyzing the impact of cold weather on the LID facilities and the domestic and foreign research experience, this paper summed up the methods of scale calculation, optimization, maintenance and other aspects of LID facilities, to strengthen the construction of sponge cities in cold regions of China.

**Key words:** cold region; LID facilities; optimization strategy; operation and maintenance

基金项目: 北京建筑大学市属高校基本科研业务费专项资金资助项目(X18180); 北京未来城市设计高精尖创新中心  
资助项目(UDC2016040100); 国家自然科学基金资助项目(51578037); 广西重大科技专项  
(AA17202032); 国家自然科学基金面上项目(31870704)

通信作者: 苏毅 E-mail: suyi@bucea.edu.cn

针对城市发展过程中出现的水环境恶化、内涝风险加剧、径流污染严重、雨水资源流失等问题,我国基于低影响开发(Low Impact Development, LID)理念,通过建设海绵城市缓解上述问题并实现水生态修复、水环境改善、水安全保障等多重目标<sup>[1]</sup>。然而我国国土辽阔,不同地区的气候差异较大,统一的LID设施技术指标要求难以在我国广阔的地区普遍适用。例如,在我国以东北、内蒙和青海等地为主的北方严寒地区,其独特的严寒气候给LID设施带来冻胀、融雪剂径流等危害,造成LID设施的实际控制效果不佳,使得北方严寒地区海绵城市建设受到极大限制。近50年来,东北地区呈现出年降雨强度逐渐增加趋势,海绵城市建设的需求逐年增加,而冬季降雪量占全年降水总量7%~25%的气候特点,使得融雪剂的使用问题更加突出<sup>[2]</sup>。面对严寒地区海绵城市建设的诉求,如何根据严寒地区独特的水文、气候等条件建设海绵城市是迫切需要探索的。针对严寒地区LID设施的设计、处理效果和运行维护等方面,美国、加拿大、挪威等国家已经进行了大量研究。首先,相关研究发现严寒气候对设施的结构设计提出了更高的要求;其次,严寒气候下雨雪水径流中污染物浓度更高,但设施的实际控制效果却难以达到设计标准;最后,严寒气候下LID设施往往需要更加频繁的维护,且选择的植物应该更加耐寒和耐盐碱<sup>[3]</sup>。针对严寒地区的海绵城市规划设计,我国部分学者已经提出了一些指导原则。例如,在黑龙江省和吉林省编制的海绵城市技术导则中,针对融雪剂的控制使用和海绵设施维护方面提出一定的要求;吉林白城为解决融雪剂和冻融技术难题,创新研发了道路雨水与含融雪剂的融雪径流生态处理与抗冻融透水铺装组合系统集成技术<sup>[4]</sup>。但国内的相关研究及设计导则中,对严寒地区特有问题的分析尚有欠缺,落地性不强。因此,针对严寒地区LID设施存在的部分问题,总结国内外经验,对LID设施的规模计算、系统结构和维护管理提出优化策略,以期加强我国海绵城市建设在严寒气候方面的应对能力。

## 1 北方严寒地区LID设施建设面临的挑战

### 1.1 严寒气候对低影响开发设施结构的影响

严寒气候最明显的特征是低温,极端低温天气会导致水体快速冰冻,持续低温天气会导致水体厚冰层的形成。低温环境给LID设施结构造成的影响

主要表现在以下两个方面:

① 管道冻结。LID设施管道在严寒条件下存在结冰风险,冰的膨胀作用会导致管道破裂,造成维修或更换的负担,同时也使得LID设施不能很好地调蓄净化雨雪水。

② 冻融循环。严寒条件下,土壤孔隙水在结冰时发生不均匀膨胀,这可能导致设施会随着冻胀造成的压力不平衡而破裂,且长期的冻融循环会改变设施内部的孔隙度,从而降低LID设施对污染物的去除效果。

### 1.2 严寒气候对LID设施渗透性能的影响

严寒气候下表层土壤冻结,而冻结土壤的渗透性是有限的,降水以降雪形式出现且融雪水携带更多的颗粒物,从而影响LID设施的渗透性能。

① 土壤渗透性降低。首先,土壤冻结时,依靠渗透作用的LID设施基本是无效的;其次,土壤冻结后积雪融化后的产流量增加。

② 土壤孔隙堵塞。研究发现,严寒气候下碳氢化合物、盐、重金属和TSS浓度显著增加,这是由低温下车辆发动机效率较低而产生较多污染物,以及融雪剂的使用所共同造成的<sup>[5]</sup>。这些颗粒物和污染物会严重影响LID设施的渗透性能和运行效果。

### 1.3 严寒气候对LID设施净化效果的影响

严寒气候下LID设施内部的生命活动和物理反应减弱,这就会导致设施净化效果大大降低,具体体现在以下几点:

① 净化路径改变。低温下冰层的形成造成调蓄体积的减少,同时雨雪水进入设施会形成两条路径,一是在冰下流动会造成底层沉积物的冲刷;二是冰上流动,这种情况下雨雪水几乎没有进行任何处理,甚至先前的沉积物很容易重新悬浮起来<sup>[3]</sup>。

② 氧含量降低。严寒条件下,空气-水界面之间的氧气交换受到冰层限制不能进行。此外,温暖的水会下沉到底部,水中大部分分解反应在底部发生而造成水体底部氧浓度急剧减少。在缺氧条件下沉积物中的正离子从底部沉积物中释放出来,这样就会导致LID设施对营养物质和金属离子的处理能力减弱。

③ 生物活性降低。众多LID设施,如湿地、生物滞留设施都是依靠生物作用而达到净化效果。然而严寒气候下,植物处于休眠状态,微生物活性急剧

减弱,净化效果大大降低。

④ 沉降速率降低。在严寒地区,当水变冷时其黏度也逐渐增加,降低了粒子的沉降速率,这种机制的变化明显影响了任何依赖沉降机理的 LID 设施的处理效果<sup>[6]</sup>。

#### 1.4 严寒气候对 LID 设施植被的影响

严寒气候和融雪剂的大量使用导致 LID 设施的植被生存非常困难。

① 短生长期。严寒气候地区植被的生长期被缩短,LID 设施植被的栽种和维护变得更加困难。

② 融雪剂的使用。研究发现,融雪剂会破坏土壤结构,降低土壤的渗透性和可耕种性,同时也会对动植物的生长和生存产生影响<sup>[7-8]</sup>。部分植物在电导率  $>10.4 \text{ mS/cm}$  的环境下难以存活,并丧失吸收氮的能力,还可能导致先前同化的氮从植物中释放出来<sup>[5]</sup>。

### 2 北方严寒地区 LID 设施的规模优化

根据《海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建(试行)》,LID 设施的调蓄容积一般通过“容积法”来计算,在此过程中并未考虑雪水问题,这是因为大部分地区降雪较少且融雪所形成的径流量较小。然而,在严寒地区冬季降雪量较大,同时积雪不能够在冬季全部融化,部分积雪会积存到春季并在短时间内融化而形成大量径流,而此时地面的表层土壤可能还未完全“解冻”,下渗量有限,因此需要 LID 设施有足够的调蓄空间以应对春季融雪径流事件。为了有效控制、净化和回用融雪径流,因此需要对这部分径流量进行计算并与现有调蓄容积进行对比校核,在不能达到控制要求时需要增大设施调蓄容积。

#### 2.1 冬季积雪损耗量

在北方严寒地区,积雪的收集回用、雪本身的升华以及积雪融化致使冬季积雪被损耗,而这部分损耗量的计算方法可参考美国设计手册 *Stormwater BMP Design: Supplement for Cold Climates*,具体见下式<sup>[3]</sup>:

$$V_{\text{损}} = V_1 + V_2 + V_3 \quad (1)$$

式中  $V_{\text{损}}$ ——冬季积雪损耗量,  $\text{m}^3$

$V_1$ ——集中管理积雪融化体积量,  $\text{m}^3$

$V_2$ ——冬季积雪升华损失量,  $\text{m}^3$

$V_3$ ——冬季积雪融化损失量,  $\text{m}^3$

① 基于严寒地区冬季积雪管理模式,即部分清洁积雪会被收集起来统一存放并回用,这对于降雪较大的地区是一项重要的水资源回用方式。其回收比例可根据当地具体降雪情况而定,对于大降雪事件频发的地区其回收比例可适当提高,定为 20%;对于大降雪事件较少,收集和存放困难地区可减小收集比例,定为 10%,这部分被收集积雪融化后的水量体积为<sup>[3]</sup>:

$$V_1 = 10 \times a \times S \times A \quad (2)$$

式中  $a$ ——被移走积雪的比例, %

$S$ ——降雪量,  $\text{mm}$

$A$ ——汇水面积,  $\text{hm}^2$

② 冬季降雪事件发生后,由于温度和太阳辐射而使积雪升华,在这过程中有一部分雪被损耗。但在实际情况中,对大多数地区来说升华不是很重要,因此可在没有准确资料的情况下忽略这一部分损耗,即  $V_2 = 0$ 。

③ 整个冬季都在发生小型融雪事件,可以通过“经验法”来简单估算冬季融雪量。参考国外资料,该方法假设冬季融雪主要受温度影响,以 1 月份的平均日最高温度为基准,当 1 月平均日最高温度  $< -4^\circ\text{C}$  时,假定 1/2 的积雪融化;当 1 月平均日最高温度  $< 2^\circ\text{C}$  时,假定 2/3 的积雪在冬季融化<sup>[5]</sup>。冬季积雪融化量参考下式:

$$V_3 = 10 \times (1 - a) \times S \times \beta \times A \quad (3)$$

式中  $\beta$ ——积雪融化的比例, %

#### 2.2 春季融雪径流量

① 冬季积雪的损耗使得春季积雪只包含了冬季降雪的一部分,因此春季积雪量  $V_{\text{春积}}$  可通过下式计算:

$$V_{\text{春积}} = 10 \times S \times A - V_{\text{损}} \quad (4)$$

② 城市发展过程中会出现部分不透水区域,由于下垫面的特殊性以及积雪中沉积物的积存,由此设定不透水区域的积雪融化后 100% 产流,透水区域存在部分融雪下渗,因此春季积雪融化所产生的径流量为:

$$\begin{aligned} V_{\text{径流}} &= V_{\text{透水区域径流量}} + V_{\text{不透水区域径流量}} \\ V_{\text{径流}} &= (1 - b) \times (V_{\text{春积}} - 10 \times \text{Inf} \times A) + \\ &\quad b \times V_{\text{春积}} \end{aligned} \quad (5)$$

式中  $V_{\text{径流}}$ ——春季融雪径流量,  $\text{m}^3$

$b$ ——不透水率, %

$\text{Inf}$ ——下渗量,  $\text{mm}$



## 2.3 典型案例计算

以长春市(1981 年—2010 年)平均月降水数据为例,全年降水量约为 577.3 mm,其中降雪量约为 41.5 mm,假定汇水面积为 5 hm<sup>2</sup>,下垫面不透水比例为 50%,10% 的降雪会被收集并回用,则收集的积雪融化后产出的水量体积  $V_1$  为 207.5 m<sup>3</sup>,这部分水量可保存至春季作为园林用水;冬季积雪融化量  $V_2$  为 933.8 m<sup>3</sup>;冬季积雪损耗量  $V_{损}$  为 1 141.3 m<sup>3</sup>;春季积雪量  $V_{春积}$  为 933.7 m<sup>3</sup>;春季融雪径流量  $V_{径流}$  为 683.7 m<sup>3</sup>。在长春市海绵专项规划中 80% 的年径流总量控制率对应设计降雨量为 20.8 mm,综合

径流系数为 0.5,则该地区相应的调蓄容积为 520 m<sup>3</sup>。春季融雪相对冬季融雪速率加快,并且部分 LID 设施因结冰的缘故会占用一部分调蓄容积,因此需加大现有设施的调蓄容积,为使 LID 设施能够发挥更大作用,笔者建议严寒地区城市在计算年径流总量控制率与设计降雨量时考虑降雪。

## 3 严寒地区 LID 设施的优化与管理

### 3.1 低影响开发设施在冬季需要注意的问题

以常见 LID 设施为例,分析其在严寒气候条件下的运行状况,得出各类设施在北方严寒地区冬季所需注意的问题,具体见表 1。

表 1 常规 LID 设施在冬季所需注意问题

Tab. 1 Problems of conventional LID facilities in winter

项 目		注意问题
调蓄设施	湿塘	冬季仍然有效,但需要改造以防止出水管冻结;冰封期间污染物处理能力和生物活性降低;融雪剂影响植被生存
	延时调节塘	需要对调蓄容积进行改造
	湿地	类似于湿塘的改造,植物选择应注意耐寒和耐盐;融雪剂影响植被生存
渗透设施	透水铺装	严寒气候下受到限制,孔隙堵塞严重,冻融破坏设施结构,需加强维护
	渗管/渠	部分有效,但融雪剂含有的氯化物可能会影响地下水;冰冻地面会抑制雨雪水的渗透
	生物滞留设施	融雪剂影响植被生存;增设预处理,可以用来存放积雪
转输设施	植草沟	植被休眠和渗透能力减弱,冬季有效性降低;融雪剂影响植被生存
	植被过滤带	植被休眠和渗透能力减弱,冬季有效性降低;融雪剂影响植被生存

### 3.2 严寒地区调蓄设施的优化设计和维护管理

通过对严寒地区部分 LID 设施运行状况的分析,发现调蓄设施的优化应主要关注设施结构、调蓄容积和植被维护等方面,因此从简易延时调节塘出发进行优化改造,以期对其他调蓄设施的优化设计提供支撑。

#### 3.2.1 延时调节塘进、出水管的优化改造

严寒气候下,为了维持调节塘的正常运行,需要对设施的结构进行优化设计,而这些改进措施大部分都与管道冻结有关。调节塘进水管构造见图 1。

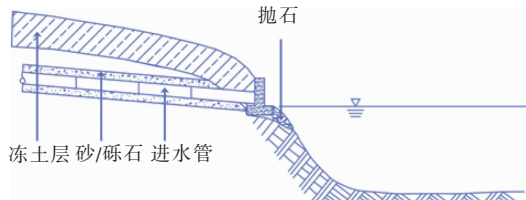


图 1 调节塘进水管构造

Fig. 1 Structure of inlet pipe of regulating pond

#### ① 调整管道埋深

一般情况下管道宜埋设在冰冻线以下,然而在严寒地区其冻土深度过大,实际工程中管道埋深过

大会增加建设成本,并且由于雨水管网平常处于空置状态,冬季小流量的融雪水对其影响较小。同时有学者提出因为污水管网温度高于周边土壤温度,故污水管道最小管底埋深可采用  $0.6H$  ( $H$  为最大冻深值)<sup>[9-10]</sup>。因此可利用污水管网的这一特性来减缓雨水管道冻结,从而降低管道埋深。北方严寒地区部分城市最大冻土深度与埋深见表 2。

表 2 北方严寒地区部分城市最大冻土深度与管道埋深

Tab. 2 Maximum frozen soil depth and pipeline buried depth of some cities in cold areas of northern China

项 目	呼和浩特	沈阳	长春	吉林	哈尔滨
最大冻土深度	156	148	169	182	205
管底埋深	125	118	135	146	164

#### ② 调整管道最小设计坡度和管径

严寒地区一些特殊地形中管道埋深不能达到设计要求,如调节池进水管部分管段处于冻土区内,此时可参考国外资料<sup>[3]</sup>和《室外排水设计规范》(GB 50014—2006,2016 年版)将管道的最小坡度调整为 1%,或增大管径,防止管道积水冻结成冰堵塞管道从而影响 LID 设施的发挥,但此种情况在面对极端严寒气候时应注意对管道的检测,必要时进行人工

除冰作业。

### ③ 砂或砾石回填

严寒地区除了管道冻结外还有一个重要灾害便是冻胀。冻胀发生时,较薄的管壁更易损坏,因此可考虑适当增加冻土区管道的壁厚<sup>[11]</sup>。同时,管道铺设完毕后可用砂或砾石进行回填,因为这种粗粒度的材料不易发生冻胀,但这种做法会增加海绵建设成本。

### ④ 调整管道出流方式及防止飞溅

严寒地区进水管应尽量避免淹没出流,以防冬季水下管道因结冰而造成堵塞<sup>[12]</sup>。但管道的自由出流会形成水花飞溅造成冰块聚集,因此也需要注意。首先,容易引起飞溅的区域应避免管道落差;其次,设计管径时应避免出现变径,这会导致管道水体紊流,从而引起水花飞溅;最后,管道坡度不宜有巨大变化,避免引起管道湍流和飞溅<sup>[3]</sup>。

### 3.2.2 延时调节塘永久池的优化改造

调节塘永久池主要承担调蓄和净化两大任务,然而严寒气候下,设施冻结、生物活性降低导致调节塘并未达到最初的设计要求,因此需要针对这一问题进行优化改造。调节塘简易构造见图 2。

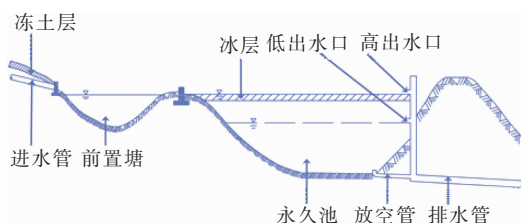


图 2 调节塘简易构造

Fig. 2 Simple structure of regulating pond

#### ① 增大调蓄空间

冬季调节塘冻结导致永久池调蓄空间变小,为此需要根据调节塘结冰量和春季融雪径流量进行调整。如果路面撒融雪剂、撒砂现象较为普遍,可以增加前置塘的容积,以应对额外的污染负荷量。

#### ② 季节性控制

有研究提出针对调节塘的出水口可以采用季节性控制的方式,在夏季,低出水口闸阀关闭,采用高出水口出流;在秋季和冬季,低出水口打开增大调蓄空间;当春季融雪开始时,低出水口关闭以滞留融雪水,通过这种方法来扩大设施容积<sup>[3]</sup>。

#### ③ 培养耐寒微生物

严寒地区无霜期较短,气温偏低,为维持调节塘

的处理效果可培养耐寒微生物。研究人员通过实验发现了三种嗜冷菌,其氨氮去除率可达到 57.7% ~ 59.0%<sup>[13]</sup>。这种嗜冷菌的培养有利于调节塘在严寒气候下也能起到很好的氨氮去除效果。

#### ④ 植物配置

严寒地区的植物配置与其他城市多有不同,既要注意植物本身的生物属性,又要结合不同植物对光照的需要、生长速度的快慢、植根深浅的不同而进行合理的配置。对于北方严寒地区,LID 设施应选择耐淹、耐寒、抗旱和耐盐碱等植物,如:黄菖蒲、水葱、芦苇、千屈菜、马莲、三七景天、紫丁香、连翘、水曲柳等。

### 3.2.3 延时调节塘的维护

在严寒气候条件下,调节塘若疏于管理更易导致渗透性降低,雨雪水滞留时间过长,进而引发水质恶化<sup>[14]</sup>。为此,对调节塘的维护提出以下几点特殊建议:

① 极端严寒条件下(1 月份最高温度 < -4℃),此时需要对设施进行检查和布置除冰系统,其他情况下可不必设置。

② 春季调节塘的水不应该被排走,由于水温的分层和底部的高浓度氯离子,水会变得缺氧和酸化,如果此时将水排走可能会对下游造成不良影响。

③ 严寒地区应涉及到雪的管理,对于污染物浓度较高的积雪可以集中在大型设施中统一处理继而排放,而清洁的雪则可以被储存在设施中作为回用水资源。由于积雪较之雨水会携带更多的污染物,因此设施的清淤维护应更加频繁。

### 3.3 严寒地区渗透设施的优化设计和维护管理

严寒地区,冻土可以显著减少或阻止雨雪水的下渗;高氯化物的融雪水可能会影响地下水;融雪水中大量的颗粒物会堵塞设施的孔隙。因此渗透类设施在冬季选用时应该非常注意。

① 研究发现严寒气候下,多孔路面不仅可以防止污染物进入水系统,而且减少了对除冰和防冰措施的需求<sup>[15]</sup>。但多孔路面的维护要求非常高,在选用时应结合实际情况。

② 渗管/渠在严寒地区布置时也存在限制条件。首先,不能在永久冻土层地区使用,因为长时间渗透可能会使永久冻土层融化从而导致塌陷;其次,应监测地下水氯化物浓度,特别是在地下水水位较浅的地区,避免融雪水中的氯化物污染地下水;最后,

道路路基与渗透设施应保持一定距离,避免潜在的冻胀破坏而影响道路路基,参考美国设计标准两者距离最少为7.6 m<sup>[12]</sup>。

③ 道路旁的生物滞留设施可参考吉林省白城市的发明专利技术——道路雨水弃流系统及道路雨水渗滤系统,该系统避免了融化雪水直接流入土壤或者直接渗入地下,从而防止夹杂在雪水中的融雪剂对土壤、植物以及地下水造成污染<sup>[4]</sup>。

### 3.4 严寒地区转输设施的优化设计和维护管理

严寒气候下转输设施的改造是最小的,但这类设施用来存放积雪时应注意以下几点:

① 道路旁的植草沟/植被过滤带作为积雪存放场地时,积雪中大量的氯化物会影响植被的生长发育,因此这些设施需要进行特殊维护,必要时可换土,以维持其正常运行。

② 针对这些特殊点处的设施,在选用植物时应着重选择耐寒和耐盐碱的植物品种,这样可以减少污染物对设施的影响,降低维护成本。

③ 承担处理融雪径流的设施需要设置预处理设施。因为植草沟截留的污染物主要是颗粒物,预处理设施能减少融雪径流中的颗粒物含量,有利于维持植草沟的下渗能力。

## 4 结论

通过对北方严寒地区低影响开发设施的分析,依据国内外研究经验,对常规低影响开发设施的系统结构进行了优化设计并对设施的维护提出要求,使其能够在严寒气候条件下稳定运行,并能够应对融雪径流事件。

① 严寒地区在选择 LID 设施时应全方面比较,充分考虑到管道冻结和土壤冻胀对设施结构的破坏,低温和融雪径流对植被生长的影响,以及 LID 设施特殊的维护需求和容积计算,从而减轻严寒气候对 LID 设施的影响,使其雨季与雪季都能够充分发挥作用。

② 严寒地区在布置管道时应利用污水管温度高于周边环境的特性,在其周边布置雨水管,从而设计更加经济合理的管道埋深和设计坡度;同时,为了减轻土壤冻胀对管道的危害应采用砂或砾石回填并增加管道壁厚;最后,选择合适的管道出流方式以控制管道的冻结。

③ 严寒地区为了减轻积雪和融雪水所携带的大量颗粒物和氯化物对设施的影响,LID 设施应增

设预处理设施,有效拦截径流中的污染物,同时选择更加耐寒和耐盐碱的本土植被并加强设施的维护和管理。

针对北方严寒地区的地域特点进行低影响开发设施的优化探索,增强了海绵城市建设的落地性,有利于海绵城市建设在北方严寒气候地区得到进一步推广。

致谢:在本文写作过程中,得到了王二松、赵梦圆的大力支持,特此感谢!

### 参考文献:

- [1] 章林伟,牛璋彬,张全,等. 浅析海绵城市建设的顶层设计[J]. 给水排水,2017,43(9):1-5.  
Zhang Linwei, Niu Zhanbin, Zhang Quan, et al. Brief analysis of top-level design of sponge city construction [J]. Water & Wastewater Engineering, 2017, 43(9): 1-5 (in Chinese).
- [2] 徐苏宁,赵蕾. 东北地区城市水系雨雪水利用潜力研究[J]. 城市发展研究,2017,24(1):82-88.  
Xu Suning, Zhao Lei. The potential of rain and snow water utilization of urban water system in northeast China [J]. Urban Development Studies, 2017, 24(1): 82-88 (in Chinese).
- [3] Caraco D, Claytor R. Stormwater BMP Design: Supplement for Cold Climates [M]. US: US Environmental Protection Agency, 1997.
- [4] 国家海绵城市建设创新实践课题组. 中国北方寒冷缺水地区海绵典范——吉林白城海绵城市建设实践路径[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2018.  
National Sponge City Construction Innovation Practice Group. A Model of Sponge in the Cold and Water-scarce Regions of Northern China—Practical Approach to Sponge City Construction in Baicheng, Jilin [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018 (in Chinese).
- [5] Kratky H, Li Z, Chen Y, et al. A critical literature review of bioretention research for stormwater management in cold climate and future research recommendations[J]. Front Environ Sci Eng, 2017, 11(4): 22-36.
- [6] Roseen R M, Ballesteros T P, Houle J J, et al. Seasonal performance variations for storm-water management systems in cold climate conditions[J]. J Environ Eng, 2009, 135(3): 128-137.
- [7] Sjøberg L C, Viklander M, Blecken G T. The influence of temperature and salt on metal and sediment removal in



- stormwater biofilters[J]. Water Sci Technol, 2014, 69 (11):2295-2304.
- [8] 严霞,李法云,刘桐武,等. 化学融雪剂对生态环境的影响[J]. 生态学杂志,2008,27(12):2209-2214.  
Yan Xia, Li Fayun, Liu Tongwu, *et al.* Effect of deicing chemicals on ecological environment [J]. Chinese Journal of Ecology, 2008, 27 (12): 2209 - 2214 (in Chinese).
- [9] 王永恒,刘继香. 寒冷地区污水管道浅埋的追踪观察[J]. 中国给水排水,2001,17(7):74-76.  
Wang Yongheng, Liu Jixiang. Tracking observation on the shallow burying of sewer in cold region[J]. China Water & Wastewater, 2001, 17 (7): 74 - 76 (in Chinese).
- [10] 北京市市政工程设计研究总院. 给水排水设计手册(第5册):城镇排水[M]. 2版. 北京:中国建筑工业出版社,2004.  
Beijing General Municipal Engineering Design & Research Institute. Water Supply and Drainage Design Manual. Fifth volumes, Urban Drainage[M]. 2nd ed. Beijing:China Architecture & Building Press, 2004 (in Chinese).
- [11] 狄彦,帅健,孔令圳. 冻土冻胀及其对管道的作用分析[J]. 地下空间与工程学报,2016,12(3):634-639,728.  
Di Yan, Shuai Jian, Kong Lingzhen. The frost heave of frozen soil and its effect on the pipeline [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12 (3): 634 - 639, 728 (in Chinese).
- [12] 斯考特·斯蓝尼. 海绵城市基础设施:雨洪管理手册[M]. 潘潇潇,译. 桂林:广西师范大学出版社,2017.  
Slaney Scott. Stormwater Management for Sustainable Urban Environments [M]. Pan Xiaoxiao, translated. Guilin: Guangxi Normal University Press, 2017 (in Chinese).
- [13] 邢奕,钱大益,应高祥. 应用耐冷菌株改善寒冷地区冬季人工湿地系统生物脱氮效果[J]. 北京科技大学学报,20017,29(增刊2):53-57.  
Xing Yi, Qian Dayi, Ying Gaoxiang. Application of psychrotrophs in improving bio-treatment efficiency of nitrogen in constructed wetland in cold area during winter [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2007, 29 (S2): 53 - 57 (in Chinese).
- [14] 王琦,宫永伟,张维伟,等. 源头径流控制设施的运行维护及相关问题探讨[J]. 中国给水排水,2017,33(7):144-148.  
Wang Qi, Gong Yongwei, Zhang Weiwei, *et al.* Discussion on operation and maintenance of source runoff control facilities and related issues[J]. China Water & Wastewater, 2017, 33 (7): 144 - 148 (in Chinese).
- [15] Roseen R M, Ballester T P. Porous asphalt pavements for stormwater management in cold climates [J]. Hot Mix Asphalt Technol, 2008, 13 (5): 22 - 26, 29, 33 - 34.



作者简介:王思思(1983- ),女,吉林长春人,博士,副教授,从事城市雨洪控制利用研究工作。

E-mail:ren\_chao\_yang@163.com

收稿日期:2018-09-16