

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.01.018

## 融雪剂对生物滞留池土层盐分的影响

王秀衡<sup>1,2</sup>, 曲睿卓<sup>2</sup>, 王奇凯<sup>2</sup>, 何宗保<sup>3</sup>, 魏亮亮<sup>1,2</sup>

(1. 城市水资源与水环境国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150090; 2. 哈尔滨工业大学环境学院, 黑龙江 哈尔滨 150090; 3. 中冶焦耐工程技术有限公司, 辽宁 大连 116085)

**摘要:** 针对北方冬季融雪剂对城市海绵设施的影响问题,以大连市为代表城市,基于气象数据和统计的融雪剂施用量,通过柱实验和HYDRUS-1D软件构建了生物滞留池水盐运移模型,分析了冬季施用融雪剂后生物滞留池的盐化程度以及春季降雨的淋溶效果。2015年冬季模拟结果表明,冬季多次施用融雪剂会导致生物滞留池的电导率(EC)逐渐升高,土壤盐分逐渐累积。春季降雨淋溶前,粉壤土、壤土和砂壤土种植土表层的EC值分别高达52.30、55.35和44.87 dS/m。2016年春季时,在降雨量较大、雨水充足的情况下能够充分淋溶土壤中的盐分,使土壤的EC值低于土壤盐害的阈值。综合模拟期的结果可知,种植土层的EC值高于换土层,不利于植物生存。与粉壤土和壤土滞留池相比,砂壤土滞留池的土壤孔隙较大,盐分不易积累,土壤盐化程度较低;而在降雨量较小时,砂壤土滞留池有利于减少盐分滞留量以及加快盐分的排放,可优先考虑砂壤土作为抗盐化种植土类型。此外,模拟冬季超量使用融雪剂的结果显示,增加融雪剂施用量会造成更严重的土壤盐化,而选择砂壤土滞留池有利于春季降雨淋溶。

**关键词:** 海绵设施; 生物滞留池; 融雪剂; 土壤盐化; 淋溶; HYDRUS-1D

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)01-0118-08

### Effect of Snowmelt Agent on Soil Salinity in Bioretention Pond

WANG Xiu-heng<sup>1,2</sup>, QU Rui-zhuo<sup>2</sup>, WANG Qi-kai<sup>2</sup>, HE Zong-bao<sup>3</sup>, WEI Liang-liang<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, Harbin 150090, China;

2. School of Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 3. China

Metallurgical Coking Engineering Technology Co. Ltd., Dalian 116085, China)

**Abstract:** To investigate the influence of winter snowmelt agent on urban sponge facilities in northern China, the water and salt migration model of bioretention ponds in a representative city Dalian was constructed by column experiment and HYDRUS-1D software based on meteorological data and statistical snowmelt agent dosage, and the salinization degree of bioretention ponds after the dispersal of snowmelt agent in winter and the leaching of soil salt after spring rainfall were analyzed. Winter simulation results in 2015 showed that multiple uses of snowmelt agent in winter resulted in a gradual increase in the electrical conductivity (EC) of the soil from bioretention ponds and a gradual accumulation of salinity in the soil. Before spring leaching, the EC values of the planting soil surface such as silt loam, loam and sandy loam were as high as 52.30 dS/m, 55.35 dS/m and 44.87 dS/m, respectively. In the spring of 2016, the salt in the soil was fully leached when there were heavy rainfall and sufficient rainwater, so the EC value of the soil was lower than the threshold of soil salt damage. The simulation results showed that the EC value of planting soil layer was higher than that of the replaced soil layer, which was not

conducive to plant survival. Compared with the silt loam and loam bioretention ponds, the sandy loam bioretention pond had a larger soil pore, less salt accumulation and lower soil salinization degree. When the rainfall was small, the sandy loam bioretention pond was beneficial to reduce the retention of salt and accelerate the discharge of salt, so it could be preferred as a salinization resistant planting soil. In addition, the simulation results of excessive use of snowmelt agent in winter showed that increasing the dosage of snowmelt agent would cause more serious soil salinization, and the application of sandy loam bioretention pond was conducive to spring rainfall leaching.

**Key words:** sponge facility; bioretention pond; snowmelt agent; soil salinization; leaching; HYDRUS-1D

北方冬季降雪会影响交通,一般施用成本低廉的氯盐类融雪剂来融雪除冰<sup>[1-2]</sup>。研究表明,施用的融雪剂约有75%~90%会通过径流和飞溅的方式进入沿路的绿化带和草坪<sup>[3]</sup>。部分融雪剂被植物吸收,对植物造成盐害胁迫<sup>[4]</sup>,其余部分则会随地表径流进入土壤,甚至进入地下水,对土壤和地下水造成污染<sup>[5-6]</sup>。在海绵城市试点建设中,白城的经验也表明,融雪剂的危害问题不可避免<sup>[7]</sup>。

大连市是海绵城市试点城市之一,冬季平均气温为-2~5.6℃,降雪频次较高;地貌多山地丘陵,少平原低地,地势复杂,坡路较多。施用融雪剂后的雪水由于来不及运送,直接或融化后随径流间接进入绿化带和海绵设施,容易引起土壤盐化,影响海绵设施的稳定运行。海绵设施中的生物滞留池是控制雨水径流及面源污染的代表性绿色设施之一<sup>[8]</sup>,具有渗、滞、净等多种功能,主要通过土壤填充材料实现削减雨水径流、去除污染物、回补地下水等作用。为明确冬季融雪剂对生物滞留池土壤的盐化影响以及次年春季降雨对缓解土壤盐化的作用,笔者以大连市为研究区域,根据实际降水和融雪剂的施用量,利用HYDRUS-1D软件模拟生物滞留池土壤中盐分的变化情况,对比粉壤土、壤土和砂壤土3种不同土壤种类的生物滞留池冬季的盐分积累程度以及次年春季雨水淋溶后的排盐效果,评估融雪剂的危害程度,判断北方海绵城市生物滞留池的适用类型,以期生物滞留池的盐化防治技术发展提供科学基础,并为北方地区海绵城市的建设和管理提供重要参考。

## 1 研究方法

### 1.1 研究方案

基于HYDRUS-1D软件中的水分和溶质运移,

模拟降雪后施加融雪剂及春季降雨后生物滞留池的盐分变化。为验证数学模型模拟的可行性,设置3种岩性种植土层的小型生物滞留池物理模型,对比不同深度土层电导率(EC)的实测值和软件模拟值。根据调研,选用价格适中、盐危害程度相对较低的混合氯盐融雪剂——钙镁混合盐( $\text{CaCl}_2:\text{MgCl}_2=6:4$ )。依照城市融雪剂施用规划,小雪、中雪和大雪天气的融雪剂施用量分别为50、60和100 g/m<sup>2</sup>。具体实施情况:当日降水量<2 mm时不产生融雪径流;当汇水区域降水量为2~2.4 mm时,采用小雪的融雪剂施用标准;当汇水区域降水量为2.4~3.7 mm时,采用中雪的融雪剂施用标准;当汇水区域降水量>3.7 mm时,采用大雪的融雪剂施用标准。

春季雨水汇集量按照以下方法计算:根据大连高新区海绵城市三年(2018年—2020年)建设方案,设定年径流总量控制率为70%,对应设计降雨量为22.4 mm。日降雨量<2 mm时不产生地表径流,此时滞留池进水不包含汇水区进水;当降雨量为2~22.4 mm时,进水量为降雨量与雨水径流系数、汇水比(生物滞留设施面积与汇水面面积之比)的乘积;当降雨量大于设计降雨量时,进水量按照设计降雨量计算得出。在海绵城市设计中,汇水比一般为5%~10%,本次模拟采用5%,雨水径流系数取0.9。

### 1.2 实验装置

本研究模拟的生物滞留池按照无淹没区的滤池构造设计,由蓄水层、种植土层、换土层和砾石承托层组成。生物滞留池通过基质的物理截留、化学吸附、植物的生物作用及三者之间的协同作用去除雨水中的污染物。模拟中仅考虑基质层,即换土层(砂填料层)和种植土层,基质层的盐分累积将直接影响植物的生长。设置的生物滞留池深55 cm,其

中0~15 cm为种植土层,其余为换土层。对比实验分别在3组不同填充材料的生物滞留池进行,第1组的填料组成为粉壤土+砂+砾石,第2组为壤土+砂+砾石,第3组为砂壤土+砂+砾石。

### 1.3 数学模拟

HYDRUS-1D软件可模拟一维饱和-非饱和土壤中水分、热及多种溶质的运移,并且可将土壤电导率值作为一种特殊溶质来模拟,通过电导率值反映出土壤的盐渍化情况,主要含有水分运移、溶质运移、热传导和根系吸水4个模块。本研究主要选用水分运移和溶质运移2个模块。

#### 1.3.1 水分运移模型

##### ① 水流控制方程

假设在液体流动过程中,气相作用不明显,热梯度引起的水流量可以忽略不计,则在部分饱和的刚性多孔介质中,一维土壤水分运动可由修正的Richards方程描述,以地表为基准面,垂直一维水分运动基本模型可表示为:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ K(h, z) \left( \frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right] - S \quad (1)$$

$$K(h, z) = K_s(z) K_r(h, z) \quad (2)$$

式中: $K$ 为非饱和导水率,cm/d; $\theta$ 为体积含水量,cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>; $h$ 为压力水头,cm; $K_s$ 为土壤的饱和导水率,cm/d; $K_r$ 为土壤的相对导水率,cm/d; $t$ 为时间,d; $z$ 为垂直坐标,方向向上为正,cm; $S$ 为植物根系吸水量,在本研究模型中无植物覆盖的裸露区取值为0。

##### ② 水分运移参数

非饱和土壤的水力特性 $\theta(h)$ 和 $K(h)$ 一般为压力水头 $h$ 的高度非线性函数,本研究选用Van Genuchten-Mualem公式(V-G模型),根据不同的土壤水分特征曲线形式得出非饱和导水率的计算方法,如下所示:

$$\theta_h = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha h|^n)^m} & h < 0 \\ \theta_s & h \geq 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$K(\theta) = K_s S_e^l \left[ 1 - (1 - S_e)^{1/m} \right]^2 \quad (4)$$

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (5)$$

式中: $\theta_h$ 为水分特征曲线; $K(\theta)$ 为导水率曲线; $\theta$ 为土壤含水量,cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>; $\theta_r$ 为残余含水量,cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>; $\theta_s$ 为饱和含水量,cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>; $S_e$ 是土壤饱和度; $\alpha$ 为进气吸力的倒数,cm<sup>-1</sup>; $n$ 为孔径分布参数; $l$ 为孔隙连通性参数,一般取值为0.5; $m$ 为水分特征曲线参数, $m$ 和 $n$ 有一定的相关关系,一般认为 $m=1-1/n$ 时模型的简化效果最好。

通过输入各层土壤的粒径组成(砂粒、粉砂粒和黏粒的百分含量)和密度( $\rho$ ),HYDRUS-1D模型可计算出不同粒径组成的种植土层的土壤水力参数。根据模拟结果,不断校正模型各参数,使物理模型与数学模型结果相接近。最终得到生物滞留池各层的水力参数如表1所示。

表1 Van-Genuchten模型特征参数

Tab.1 Characteristic parameters of Van-Genuchten model

项 目	$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	$\theta_r/(cm^3 \cdot cm^{-3})$	$\theta_s/(cm^3 \cdot cm^{-3})$	$\alpha/cm^{-1}$	$K_s/(cm \cdot d^{-1})$	$n$	$l$
种植土层	粉壤土	1.42	0.060 0	0.397 6	0.005 2	21.59	1.672 2
	壤土	1.38	0.045 5	0.375 4	0.007 9	28.89	1.573 8
	砂壤土	1.47	0.037 1	0.370 6	0.026 1	42.53	1.434 3
换土层	砂土	1.67	0.045 0	0.130 0	0.032 0	4 500.30	2.680 0

##### ③ 初始条件和边界条件

初始条件:

$$h(z, t) = h_0(z, 0) \quad (6)$$

上边界:

$$-K \left( \frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) = q_0(0, t) \quad (7)$$

下边界:

$$\frac{\partial h}{\partial z} = 0 \quad (8)$$

水分运移的上边界条件选取表层无积水的大气边界,选择时变边界,然后逐日输入通过上边界的变量值,主要包括降水量以及潜在蒸发量;下边界选择自由排水边界条件。模型初始条件为评价时段开始时的土壤含水率,由于换土层为高渗透性材料,保水性较差,因此设置换土层的初始含水率为0.05 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>,设置种植土层的初始含水率等于田间持水量。粉壤土、壤土和砂壤土的田间持水量分别为0.18、0.17和0.19。

### 1.3.2 溶质运移模型

#### ① 溶质运移方程

溶质运移一般考虑对流、扩散和机械弥散过程,一般将扩散和机械弥散过程统称为水动力弥散。本研究将溶液盐分作为一种特殊的惰性溶质,不考虑离子间相互化学反应,只考虑两个主要溶质运移参数:纵向弥散度和分子在自由水中的扩散系数。溶质运移模型采用经典对流-弥散方程(CDE)来描述溶质的运移,一维情形下的溶质运动基本方程为:

$$\frac{\partial(\theta C)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \theta D \frac{\partial C}{\partial z} \right) - \frac{\partial(qC)}{\partial z} \quad (9)$$

$$\theta D = D_L |q| + \theta D_w \tau_w \quad (10)$$

$$\tau_w = \frac{\theta^{7/3}}{\theta_s^2} \quad (11)$$

式中: $C$ 为土壤溶液浓度,mmol/cm<sup>3</sup>;  $D$ 为水动力弥散系数,代表对流及水动力弥散,cm<sup>2</sup>/d;  $q$ 为土壤水流通量,cm/d;  $D_L$ 为纵向弥散度,cm;  $D_w$ 为分子在自由水中的扩散系数,cm<sup>2</sup>/d;  $\tau_w$ 为液相弯曲度。

#### ② 溶质运移参数

在溶质运移模型中,分子在自由水中的扩散系数为2 cm<sup>2</sup>/d。粉壤土、壤土、砂壤土和砂填料的纵向弥散度分别为21.36、17.43、13.09、53.79 cm。此外,根据模型水分运移和溶质运移边界条件,需要根据冬季融雪剂施用后生物滞留池汇水区域进水盐浓度( $c$ )转换为模型进水EC值作为模型的边界条件。进水盐浓度为融雪剂施用量与降水量的比值,进水EC值利用实验室测得的盐浓度与EC值关系计算得到,如下所示:

$$EC = 1.0787c + 2.2763 \quad (12)$$

#### ③ 初始条件和边界条件

初始条件:

$$C(z, t) = C_0(z, 0) \quad (13)$$

上边界:

$$-\theta D \frac{\partial C}{\partial z} + qC = q_0 C_0 \quad (14)$$

下边界:

$$-\theta D \frac{\partial C}{\partial z} = 0 \quad (15)$$

土壤盐分运动的上边界条件概化为通量边界,是由不同的进水盐浓度确定的。模拟情景为冬季降水时,根据生物滞留池汇水区降水量和融雪剂施

用量计算进水浓度;春季时,由于雨水的电导率较小,降雨含盐浓度赋值为0。下边界条件选择零梯度边界。土壤初始条件种植土层的EC值为0.42 dS/m,换土层的EC值为0.12 dS/m。

### 1.3.3 蒸散发量的计算

本研究中物理模型实验未考虑植被覆盖,且一般北方冬季植被覆盖率很低,融雪剂对植物危害作用强,因此在蒸散发模型研究过程中不考虑植被的存在,将生物滞留池视为裸地。潜在蒸散发量根据联合国粮农组织(FAO)推荐的Penman-Monteith公式计算。

$$ET_0 = ET_{rad} + ET_{aero} = \frac{1}{\lambda} \left[ \frac{\Delta(R_n - G)}{\Delta + \gamma(1 + r_c/r_a)} + \frac{\rho_1 c_p (e_a - e_d)/r_a}{\Delta + \gamma(1 + r_c/r_a)} \right] \quad (16)$$

式中: $ET_0$ 为蒸散发量,mm/d;  $ET_{rad}$ 为辐射项的蒸散发量,mm/d;  $ET_{aero}$ 为空气动力项的蒸散发量,mm/d;  $R_n$ 为地表径辐射,MJ/(m<sup>2</sup>·d);  $G$ 为土壤热通量,MJ/(m<sup>2</sup>·d);  $\rho_1$ 为大气密度,kg/m<sup>3</sup>;  $c_p$ 为湿空气比热,kJ/(kg·°C);  $e_a$ 为饱和蒸汽压,kPa;  $e_d$ 为实际蒸汽压差,kPa;  $r_c$ 为作物冠层阻力,s/m;  $r_a$ 为空气动力阻力,s/m;  $\Delta$ 为蒸汽压曲线的斜率,kPa/°C;  $\gamma$ 为干湿表常数,kPa/°C。

根据中国气象网中大连站的气象数据资料,得到不同时期的日最高和最低气温、辐射、光照时数、风速、相对湿度等参数的数据,这些参数均会影响土壤的含水量,进而影响土壤的蒸发量。当土壤的压力水头小于最小压力水头(缺省值为10<sup>6</sup> cm)时,实际土壤蒸发量小于潜在蒸发量;当土壤的压力水头大于最小压力水头时,实际土壤蒸发量等于潜在蒸发量。

### 1.3.4 模型离散

#### ① 空间离散

模型运行前应首先对其进行单元格剖分,本研究中3个生物滞留池土壤深度均为55 cm,共两层,上层为种植土层(0~15 cm)、下层为砂填料层(15~55 cm),将此模型按照相邻节点间隔5 mm进行单元划分,共划分出111个单元。

#### ② 时间离散

模型模拟时间为2015年冬季(12月1日—次年2月29日)至2016年春季(3月1日—5月31日),时



间离散单位为d。采用变时间步长剖分方式,根据收敛迭代次数调整时间间隔,软件默认的最低循环次数为3次,最高循环次数为7次,当结果收敛所需循环次数<3次时系统自动增大时间步长,当循环次数>7次时系统自动减小时间步长,以提高计算结果的精度。本研究数字模型初始时间步长为 $10^{-3}$  d,最小时间步长为 $10^{-5}$  d,最大时间步长为1 d,任意时间步长允许的最大迭代次数为10次。

## 2 结果与讨论

### 2.1 生物滞留池数学模型的数据拟合

利用HYDRUS-1D模型模拟土壤盐分变化之前,要验证其模拟精度。在考虑蒸发的条件下,每个生物滞留池进行5 d的柱实验,并且测定不同垂直深度土壤的EC值,测定位置分别为种植土层表层(0 cm)、种植土层底层(15 cm)、换土层中间层(35 cm)和换土层底层(55 cm)。对实验室内物理模型测定的土壤EC值与数学模型运算后得到的EC值进行对比,结果如图1所示。

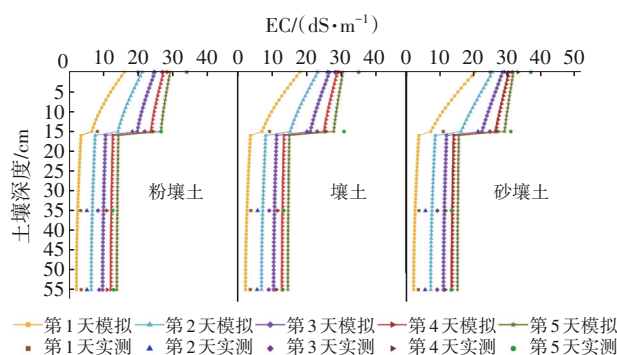


图1 实验结果与模拟结果的拟合情况

Fig.1 Fitting between experimental results and simulation results

随着模拟时间的延长,数学模型的模拟精度逐渐提高。以粉壤土滞留池为例,15 cm处模型计算得到5 d的EC值分别为6.65、14.26、19.84、23.86和26.74 dS/m,对应的相对误差分别为19.83%、22.62%、9.69%、2.33%和0.21%;55 cm处模型计算得到5 d的EC值分别为2.15、6.45、9.78、12.19和13.92 dS/m,对应的相对误差分别为39.42%、23.40%、11.41%、9.58%和6.98%。在壤土和砂壤土滞留池中,不同土层的第2~5天的模型模拟精度均优于第1天。究其原因,第1天取样时砂层下层未充分沥干,使得EC测量值偏高。

此外,土壤垂直深度EC值的变化存在如下规

律:①由于砂填料层渗透性较好,种植土层的EC值要高于砂填料层的EC值。例如,第3天粉壤土、壤土和砂壤土滞留池在0 cm处的EC值分别为24.94、26.62和28.63 dS/m,在55 cm处的EC值分别12.19、12.86和13.66 dS/m。②第3天,粉壤土、壤土和砂壤土滞留池在0 cm处的EC值相对误差分别为8.12%、5.89%和9.03%,砂层中间层35 cm处的EC值相对误差分别为18.96%、16.89%和22.35%,生物滞留池中不同土层处的EC值出现较大的差异,并且种植土层的模拟精度要优于砂填料层。但是,同一种类型土壤填料的不同深度的EC相对误差值相差不大。③由于不同生物滞留池土壤填料的砂粒含量比例不同,EC值也会存在差异。砂壤土滞留池的EC值要高于粉壤土和壤土滞留池。

对比物理实验测定结果与数学模型模拟结果,整体误差在可接受范围内,模型参数合理可靠,所建立的HYDRUS-1D数学模型可以用于模拟土壤盐分的运移情况。

### 2.2 生物滞留池冬季土壤盐化程度

生物滞留池模拟期分为两个阶段,冬季模拟期为2015年12月1日—2016年2月29日,共施用融雪剂3次(2015年12月1日、2016年1月17日和2月13日);春季淋溶期为2016年3月1日—5月31日。为探究不同生物滞留池土壤的盐化程度,沿垂直深度选取0、5、15、35和55 cm为代表性土层进行模拟。不同生物滞留池各层土壤EC值的日变化情况及对应的降水量如图2所示(红色箭头为施用融雪剂时间,绿色箭头为春季降雨时间)。

在未施用融雪剂初始阶段,各土层的EC值较低,土壤盐分较少。在第1次施用融雪剂后,生物滞留池表面的盐分不断下渗,种植土层的盐分逐渐累积,EC值逐渐变大。盐分含量变化最显著的是0 cm土层。从初始阶段到2016年1月17日第2次施用融雪剂前,粉壤土、壤土和砂壤土生物滞留池0 cm土层的EC值分别从9.23、9.91、10.46 dS/m增加到29.45、33.33、31.98 dS/m,增长率分别为219%、236%、206%。5 cm土层的EC值增长率分别为227%、176%、125%。但是由于冬季降水量少,盐分下渗位移较小。相较于0和5 cm土层,15 cm土层的EC值增长趋势较缓。越趋于表面层,盐分累积越大。在第2次和第3次降水间隔的27 d内,由于含有融雪剂的雪水进入到生物滞留池种植土表层

后,表层盐分会逐渐向下运移,种植土层表层和浅层的EC值急速下降。同时,水分会促使盐分垂直下渗至15 cm,直至砂层的35 cm和55 cm处,由于水量不充足,无法冲刷盐分排出土层,导致在较深土层处盐分堆积。

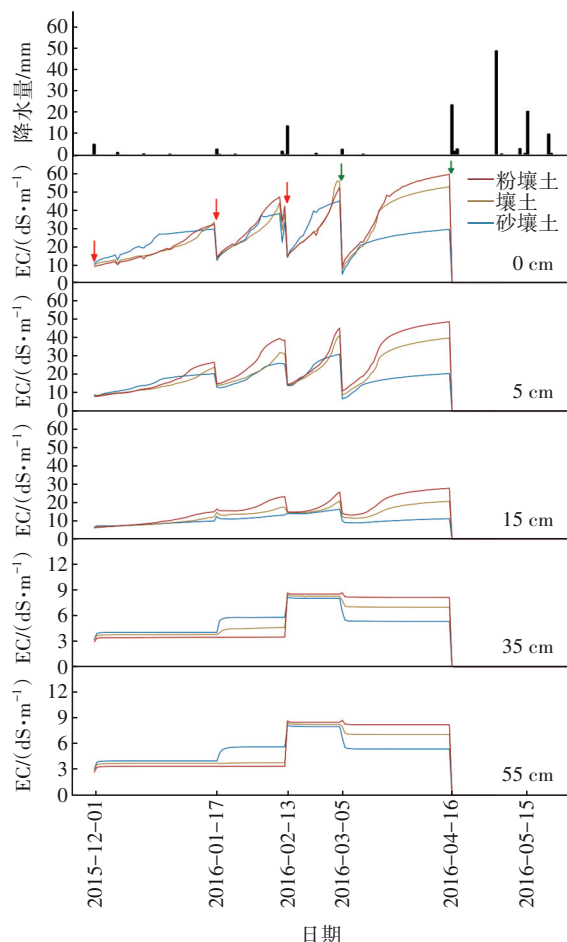


图2 不同生物滞留池各土层的EC值日变化情况

Fig.2 Daily variation of EC values in different soil layers of different bioretention ponds

多次施用融雪剂后,土壤盐浓度逐渐增加,例如春季降雨前粉壤土滞留池15 cm处的EC值升高至15.85 dS/m,导致冬季生物滞留池土壤盐化程度逐渐加重。砂填料层的持水性差,水分在种植土层中的下渗速度较慢,到达砂层的盐分量有限,因此砂层EC值基本不变,冬季结束时,砂壤土滞留池55 cm处的EC值为8.05 dS/m。根据中国气象网中大连站的气象数据资料可知,在12月,除降水天气外,平均日照时间为6.87 h。无降水情况下,土壤水分蒸发,土壤含水率下降,土壤基质压力水头降低,土壤基质势减少,土壤对盐分的吸力增加,EC值升

高<sup>[9]</sup>。当土壤压力水头低于最小压力水头后,土壤中水分蒸发能力减弱,EC值变化趋于平稳。

3种生物滞留池种植土层的质地会影响盐分的积累。种植土层中含砂量越高,土壤孔隙越大,这利于水分的输送,同时渗透性较好,易于盐分的排放。因此,相较于粉壤土和壤土滞留池,在每次融雪剂施用周期内砂壤土滞留池种植土层的EC值增长速度较快,同时很快趋于平稳,稳定后的EC值小于粉壤土和壤土生物滞留池,土壤中的盐分累积量更小。与此同时,种植土层下渗的盐分进入到砂填料层。从图2可以看出,在2016年1月17日降水量为2.6 mm的小雪时施用融雪剂后,由于对应的进水量较小,粉壤土和壤土滞留池渗透性较差,砂填料层的EC值没有明显变化,仅砂壤土滞留池的砂填料层EC值略有升高,55 cm处的EC值为5.69 dS/m,但仍远低于15 cm处的13.31 dS/m。在第3次施用融雪剂后,3种生物滞留池砂填料层的EC值均有升高,分别为8.71、8.50和8.21 dS/m,此时盐分已到达砂填料层,并且砂壤土滞留池与其他两种滞留池的EC值差别较小,说明砂壤土滞留池中的一部分盐分已经开始排出池外。

综上可知,由于冬季融雪剂的施用,生物滞留池土壤盐分累积量较多,种植土层的盐分积累明显高于砂填料层。此外,与粉壤土和壤土滞留池相比,砂壤土滞留池中的盐分积累更少,更适用于土壤盐分易积累地区。

### 2.3 生物滞留池春季排盐效果

在春季降雨前,生物滞留池土壤的EC值较大。在春季降雨的淋溶下,不同生物滞留池的各层EC值日变化趋势一致。在0 cm处,粉壤土、壤土和砂壤土生物滞留池的冬季EC值分别为52.30、55.35和44.87 dS/m,均远超过国际上判断土壤盐害的阈值标准(4 dS/m)。2016年3月5日,大连发生第1场降雨,降雨量为2.5 mm/d,根据降水强度等级划分标准,属于小雨(0.1~9.9 mm/d)。降雨后,各生物滞留池种植土层表层的盐分明显降低。在0 cm处,粉壤土、壤土和砂壤土生物滞留池的EC值分别下降了82.86%、87.10%和89.15%;在5 cm处,EC值分别下降了75.63%、77.86%和78.34%;在35 cm处,EC值分别下降了1.78%、5.84%和19.07%。相比砂填料层,种植土层的EC值下降更为明显。相较于其他生物滞留池,砂壤土滞留池土壤中的盐分

下降最多,说明在降雨量较小时也有良好的排盐表现。但由于此次降雨量较小,在之后降雨量极少的41 d内,土壤水分蒸发,土壤中的盐分含量较高,导致种植土层表层和浅层的EC值上升幅度较大。在土壤的压力水头低于最小压力水头时,EC值增长变缓并趋于稳定,此时,粉壤土、壤土和砂壤土滞留池0 cm处的EC值分别为59.30、52.61和29.31 dS/m。4月16日的降雨量为23.3 mm/d,根据降水强度等级划分标准,属于中雨(10~24.9 mm/d)。模拟结果表明,生物滞留池种植土层和砂填料层的EC值均有极其明显的下降。3种生物滞留池内的盐分含量已经达到很低水平,种植土层表层EC值分别为0.05、0.02、0.01 dS/m,远低于土壤盐害阈值标准。

通过对比两次降雨后土壤EC值的变化可知,降雨量较小时,土壤盐分无法被充分淋溶;在中雨强度的汇水冲刷下,淋溶效果较好。充足的降雨可以将生物滞留池填料内积聚的盐分向下冲洗并排到池外,使得滞留池整体的盐分含量下降到满足植物正常生长的水平。

#### 2.4 融雪剂施用量对生物滞留池盐化的影响

很多城市对融雪剂的施用位置与施用量有明确规定,但是也存在一些地方为缩短清雪时间而大量施用融雪剂。为探究生物滞留池在融雪剂施用量较多条件下的适用情况,结合上述冬季土壤盐化程度和春季降雨淋溶情况,选择冬季时盐分不易积累、春季时更利于土壤盐分排出的砂壤土滞留池进行模拟分析。在小雪、中雪和大雪时融雪剂施用量分别为100、100、150 g/m<sup>2</sup>的情况下,不同土层EC值的日变化如图3所示。从冬季到春季,与常规的融雪剂施用情况相比,土壤整体的EC值变化趋势并没有发生较大的改变。由于融雪剂施用量增加,EC值上升,高于同期常规融雪剂施用量下的EC值。尤其在第3次施用融雪剂之后的春季干旱期,土壤0 cm处的EC值高达66.83 dS/m,比常规施用量时高21.7%,土壤盐化严重,对植物造成盐害胁迫。在该年度,春季经过中雨强度的降雨淋溶后,土壤层的EC值低于1 dS/m,植物才可正常生长。综上可知,过量施用融雪剂可能会带来更大的土壤盐化风险。若初春没有得到足够的降雨淋溶,土壤盐分含量将阻碍植物生长,所以可能需要预淋溶以保障植物的正常生长。

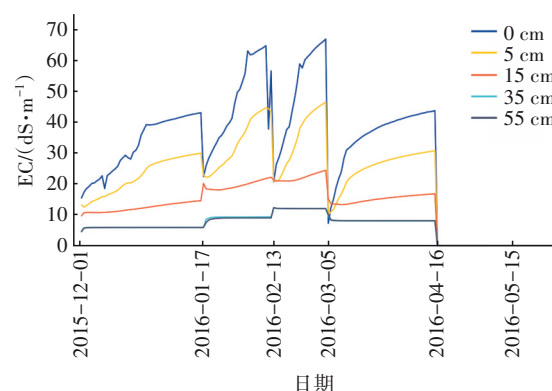


图3 高剂量融雪剂下砂壤土各土层EC值的日变化

Fig.3 Daily variation of EC values at each soil layer in sandy loam bioretention at high dosage snowmelt agent

### 3 结论

① 冬季降雪后多次施用融雪剂会造成盐分积累,使得生物滞留池土壤盐化。施用融雪剂后,降水促使盐分进入生物滞留池。在干旱期时土壤表层水分蒸发,表层EC值升高,盐分含量增加。与砂填料层相比,盐分更易在种植土层积存,不利于植物生长。生物滞留池土壤盐化程度主要受进水量和融雪剂施用量的影响,过量使用融雪剂会加重土壤盐化程度,减少融雪剂施用量是控制生物滞留池盐化程度最根本的措施。

② 春季降雨对土壤的淋溶可降低生物滞留池的EC值,土壤盐分随径流下渗甚至排出土壤层。当降雨量较小时,可冲刷种植土表层盐分向下运移,但只可以暂时缓解生物滞留池中的盐化程度,未起到根本作用;且当土壤盐分未完全淋溶时,干旱期越长则土壤水分蒸发量越大,盐分上移,土壤盐化程度加重。而当降雨量较大时,可以充分淋溶土壤中的盐分,能够有效地起到排盐作用。

③ 与粉壤土和壤土滞留池相比,砂壤土滞留池冬季时的EC值较低,盐分不易积累;而在春季时,由于其土壤孔隙大、渗透性好,更利于土壤中盐分的排泄。另外,在过量使用融雪剂的情况下,经历初春充足的降雨淋溶后,砂壤土滞留池的EC值可以降至土壤盐害的阈值标准以下。综合3种生物滞留池模拟期的表现,生物滞留池可优先考虑将砂壤土作为抗盐化种植土类型。

#### 参考文献:

[1] 吴昊,徐勤安,张昊天,等. 道路用氯盐融雪剂融雪性



- 能评价及合理选用[J]. 工程与建设, 2019, 33(4): 650-653.
- WU Hao, XU Qin'an, ZHANG Haotian, *et al.* Snow melting performance evaluation and reasonable selection of road chloride salt melting agent[J]. Engineering and Construction, 2019, 33(4): 650-653 (in Chinese).
- [2] 李伟, 黄子杰, 王卫东. 国内融雪剂标准研究[J]. 氯碱工业, 2019, 55(2): 37-39.
- LI Wei, HUANG Zijie, WANG Weidong. Study on standards of snow melting agent in China[J]. Chlor-Alkali Industry, 2019, 55(2): 37-39 (in Chinese).
- [3] NORRSTROM A C, BERGSTEDT E. The impact of road de-icing salts (NaCl) on colloid dispersion and base cation pools in roadside soils[J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2001, 127: 281-299.
- [4] 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.* Effects of deicing chemicals on ecological environment [J]. Chinese Journal of Ecology, 2008, 27(12): 2209-2214 (in Chinese).
- [5] 王艳春, 白雪薇, 李芳. 氯盐融雪剂对城市道路绿化带土壤性状的影响[J]. 环境科学与技术, 2011, 34(11): 59-63.
- WANG Yanchun, BAI Xuwei, LI Fang. Effect of snow melt agent containing chloride-salt on soil chemical characters of urban road greenbelt [J]. Environmental Science & Technology, 2011, 34(11): 59-63 (in Chinese).
- [6] 张营. 城市土壤-植物系统中融雪剂的污染行为及其生态学效应[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2013.
- ZHANG Ying. The Pollution Behavior and Ecologic Effect of Deicing Salts on Urban Soil and Plant Environment in Northeast China[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2013 (in Chinese).
- [7] “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.
- Research Group of “National Sponge City Construction Innovation Practice”. A Model of “Sponge” in Cold Water-deficient Areas in Northern China—the Practice Path of the Construction of a Sponge City in Baicheng, Jilin [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018 (in Chinese).
- [8] DAVIS A P, HUNT W F, TRAVER R G, *et al.* Bioretention technology: overview of current practice and future needs [J]. Journal of Environmental Engineering, 2009, 135(3): 109-117.
- [9] 焦艳平, 康跃虎, 万书勤, 等. 干旱区盐碱地覆膜滴灌条件下土壤基质势对糯玉米生长和灌溉水利用效率的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2007, 25(6): 144-151.
- JIAO Yanping, KANG Yuehu, WAN Shuqin, *et al.* Effect of soil matric potential on waxy corn growth and irrigation water use efficiency under mulch drip irrigation in saline soils of arid areas [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2007, 25(6): 144-151 (in Chinese).

**作者简介:**王秀衡(1973—),女,黑龙江佳木斯人,博士,教授,主要从事城市水系统和水生态安全、污染物的物理化学去除技术,以及水-能源-环境-磷的关联研究相关工作。

**E-mail:**xiuheng@hit.edu.cn

**收稿日期:**2020-09-17

**修回日期:**2020-11-22

(编辑:刘贵春)

**珍惜资源,保护环境,建设美丽中国**