

撒施氯盐型融雪剂对道路绿化带植物和土壤污染情况调查与分析

朱建刚¹ 郭佳¹ 李子敬¹ 曹吉鑫¹ 刘楠^{1,2} 郑焱¹ 王艳春^{1*}

(1. 北京市园林绿化科学研究所, 北京 100102; 2. 北京农学院, 北京 102206)

摘要: 为探究城市主要交通干道2023年冬季与2024年春季施用氯盐型融雪剂对周围绿化带植物生长和土壤的污染情况,对2024年春季北京市主要交通干道绿化带植物表型、叶片营养元素离子含量、土壤水溶性盐含量进行检测分析。结果显示:受氯盐型融雪剂污染后,道路绿化带中的植物普遍出现缺水干枯的现象,部分灌木和草本植物甚至死亡;植物叶片中 Na^+ 含量显著上升,而 K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量在不同植物种类中表现出了不同的吸收和响应机制;道路绿化带土壤中的水溶性盐含量严重超标;表层土壤(0~20 cm)的水溶性盐含量为0.04%~25.85%,其中,75.0%的土壤水溶性盐含量超过0.30%,95.3%的土壤水溶性盐含量超过0.10%;下层土壤(20~40 cm)的水溶性盐含量为0.03%~1.48%,其中50.6%的土壤水溶性盐含量超过0.30%,81.6%的土壤水溶性盐含量超过0.10%。在研究评估氯盐型融雪剂应用后对绿化带植物和土壤污染影响基础上,为合理有效地应用融雪剂提出建议。

关键词: 道路绿化带; 氯盐型融雪剂; 土壤水溶性盐; 植物营养元素

中图分类号: S766; X53

文献标识码: A

文章编号: 2097-5279(2025)01-0080-07

Investigation and analysis on pollution of road green belt caused by spraying chlorine salt type de-icing salt

ZHU Jianguang¹ GUO Jia¹ LI Zijing¹ CAO Jixin¹ LIU Nan^{1,2} ZHENG Yi¹ WANG Yanchun^{1*}

(1. Beijing Academy of Forestry and Landscape Architecture, Beijing 100102, China; 2. Beijing University of Agriculture, Beijing 102206, China)

Abstract: In order to invest the pollution of plants and soil in the surrounding green belt by the application of de-icing salt in the winter of 2023 and spring of 2024 on the main traffic arteries in the city, this study detected and analyzed the plant phenotype, leaf nutrient content and soil soluble salt content of the green belt of the main traffic arteries in Beijing in the spring of 2024. The results show that road green belt plants are generally dry and even die after being polluted by de-icing salt; the content of Na^+ in the leaves of contaminated plants increased significantly, while the contents of K^+ , Ca^{2+} and Mg^{2+} showed different absorption and response mechanisms in different plant varieties; the soil soluble salt of the road green belt seriously exceeds the standard; the surface soil(0-20 cm) ranged from 0.04% to 25.85%. Among them, 75.0% exceeded 0.30%, and 95.3% exceeded 0.10%; the soil soluble salt of the lower soil (20-40 cm) ranged from 0.03% to 1.48%. Among them, 50.6% exceeded 0.30%, and 81.6% exceeded 0.10%. Based on the assessment of the impact of chloride-type snow melting agents on the pollution of green belt plants and soil, suggestions for the rational and effective application of snow melting agents were proposed.

Key words: road green belt; De-icing salt; soil soluble salt; plant nutrient element

近年来,全球极端天气频发,其中冬季强降雪现象尤为显著,给人们的日常生活与出行带来了严峻挑战。在此背景下,融雪剂的应用显得尤为重要,其高效的融雪能力可迅速恢复道路通畅,保障交通秩序,为车辆及行人的安全和城市的正常运转奠定了基础。当前市场上融雪剂种类繁多,依据其主要成分可分为氯盐型、非氯盐环保型及混合型三大类。尽管非氯盐环保型融雪剂具有诸多环境友好特性,

但因氯盐型融雪剂制备工艺简便、成本较低且融雪效果显著,仍被广泛应用于道路积雪的快速清除作业(李根等,2020)。

实际应用中,由于车辆行驶产生的扰动、自然风力的吹动以及气温回升后融化冰雪的裹挟,大量的融雪剂被带入绿化带中。因此,氯盐型融雪剂对生态环境的负面影响逐渐凸显,尤其是对道路绿化带植物和土壤。氯盐型融雪剂的主要成分为氯化钠、

收稿日期: 2024-10-15; 修回日期: 2024-12-19。

* 通信作者: 王艳春(E-mail: 1661087349@qq.com), 教授级高级工程师。

氯化镁、氯化钙等, 这些成分残留在绿化带土壤中, 加剧土壤中的盐分积累, 引发严重的土壤盐渍化问题, 影响土壤微生物的呼吸与生长速率(逢好胜等, 2023; Kostka et al., 2019; Rath et al., 2016)。同时, 植物的正常代谢过程被打破, 导致营养吸收失衡, 生长速度明显放缓甚至停滞, 引发植物体内的生理干旱现象, 进一步加剧了生长困境(张营等, 2012; 李瀚涛等, 2011)。更为严重的是, 随着土壤污染程度的不断加剧, 植物种子发芽率也显著降低, 植物种群的更新与繁衍受到严重影响(闫成竹等, 2017)。若不及时采取有效措施减轻或消除融雪剂污染造成的危害, 植物将难以恢复生机, 严重影响植被的正常生长发育与生态环境(刘文盈, 2017)。

2023年冬季至2024年春季, 北京市出现了多场中到大雪, 为保障道路通畅和交通安全, 相关部门撒施了大量的融雪剂, 造成道路绿化带常见的植物紫叶李 *Prunus cerasifera* Ehrh. f. *atropurpurea* (Jacq.) Rehder、小叶黄杨 *Buxus sinica* (Rehder & E.H.Wilson) M.Cheng var. *parvifolia* M.Cheng、冬青卫矛 *Euonymus japonicus* Thunb.、沙地柏 *Juniperus sabina* L.和麦冬 *Ophiopogon japonicus* (L.f.) Ker Gawl.等出现大量枯死现象。

本研究以北京市主要交通干道绿化带为研究区域, 通过观察和对比同一区域内受污染与未受污染的植物生长形态的差异, 分析其叶片中营养元素含量的变化, 揭示高浓度盐环境对植物生长所造成的胁迫效应。同

时, 广泛采集、检测该区域受化学融雪剂污染及未污染的土壤样品, 分析、探讨了氯盐型融雪剂对周围绿化带植物和土壤的污染情况。在此基础上, 提出有针对性的合理建议, 旨在为未来科学合理地使用融雪剂、保护城市生态环境提供可靠依据。

1 材料与方法

1.1 调查对象

本研究在观察与检测北京市朝阳区部分绿化带植物受污染情况的基础上, 对全市16个区主要交通干道的机动车道与非机动车道绿化带(宽度1.2~3.0 m)土壤受融雪剂的污染情况进行调查分析。

1.2 样品采集

2024年3月中旬(浇返青水前), 采集朝阳区内受氯盐型融雪剂污染(撒施融雪剂的机动车道与非机动车道间绿化带, 宽度约0.5 m)与未受融雪剂污染(未撒施融雪剂的人行道与附属绿地间绿化带, 宽度约1.0 m)的紫叶李、小叶黄杨、冬青卫矛、沙地柏和麦冬5种植物的叶片样本。同时, 在北京市16个行政区域内道路绿化带采集具有代表性和广泛性的污染与未污染土壤样品共计263个, 其中表层(0~20 cm)受污染的土壤样品128个、深层(20~40 cm)受污染的土壤样品38个, 表层(0~20 cm)未受污染的土壤样品81个、深层(20~40 cm)未受污染的土壤样品16个。点位分布见图1。



图1 2024年北京市道绿化带土壤融雪剂污染采样点位图

Fig. 1 Sampled point map of de-icing salt pollution in road greenbelts of Beijing in 2024

注: 该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2024)0650号的标准地图制作, 底图无修改。

Notes: The map is based on the standard map of GS (2024) 0650 downloaded from the standard map service website of the National Bureau of Surveying, Mapping and Geoinformation, and the base map is not modified.

1.3 检测对象及方法

通过观察植物生长形态以及测定植物叶片 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 的含量,观测植物受污染程度。以道路绿化带土壤水溶性盐含量为检测指标,评估融雪剂在道路绿化带不同土层深度中的污染情况。4种阳离子(K^+ 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 Mg^{2+})采用电感耦合等离子体光谱仪(ICP—OES)测定;土壤水溶性盐含量按照NY/T 1121.16—2006《土壤检测 第16部分:土壤水溶性盐总量的测定》测定。

2 结果与分析

2.1 氯盐型融雪剂对植物的影响

2.1.1 植物表型

在有明显融雪剂残留的绿化带中(图2),紫叶李等乔木耐盐性较强,受污染与未受污染的表型差异较小;麦冬等草本植物耐盐性最差,降雪后在高架桥表面撒施了大量的融雪剂,含有融雪剂的雪水融化后经过排水系统滴至下方绿化带,导致麦冬出现带状盐害死亡(图3);而小叶黄杨、冬青卫矛、沙地柏等灌木耐盐性介于乔木与草本之间,近路侧致死效应严重,且基部干枯脱水情况更为明显,但绿化带内侧种植的灌木生长良好,未出现干枯等症(图4)。



图4 融雪剂污染对绿化带灌木表型的影响状况

Fig. 4 The impact of de-icing salt pollution on the phenotype of shrubs in green belts

2.1.2 叶片营养元素

受污染后,乔木紫叶李叶片中 Ca^{2+} 、 Na^+ 含量几乎不变, K^+ 、 Mg^{2+} 含量呈现下降趋势;灌木除小叶黄杨 Ca^{2+} 有小幅降低、冬青卫矛 K^+ 无明显变化外,小叶黄杨的 K^+ 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 含量,冬青卫矛的 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 含量以及沙地柏的 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 含量均呈上升趋势;而草本植物麦冬叶片的 Na^+ 含量明显上升,但 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量均下降。详见表1。

2.2 表层土壤水溶性盐含量

在128个融雪剂污染的道路绿化带表层(0~20 cm)土壤样品中,土壤水溶性盐含量为0.04%~25.85%。



图2 土壤表层融雪剂残留状况

Fig. 2 Residual de-icing salt on the soil surface



图3 融雪剂污染对绿化带草本表型的影响状况

Fig. 3 The impact of de-icing salt pollution on the herbaceous phenotype of green belts



具体而言,有6个样品土壤水溶性盐含量低于0.10%,符合CJ/T 340—2016《中华人民共和国城镇建设行业标准》中关于一般绿化种植土壤的盐含量小于等于0.10%的规定,占比4.7%;另有26个样品土壤水溶性盐含量为0.10%~0.30%,满足CJJ/T 82—2012《园林绿化工程施工及验收规范》中园林植物种植土盐含量0.10%~0.30%的标准,占比20.3%;剩余96个样品土壤水溶性盐含量超过了0.30%,占比75.0%,其中水溶性盐含量为1.00%~5.00%的样品数量最多,占比高达31.3%(图5)。

进一步分析表明,融雪剂污染土壤的水溶性盐

表 1 未受融雪剂污染与受污染土壤中水溶性盐及植物叶片营养元素含量

Tab. 1 Contents of soil soluble salt and nutrient elements in plant leaves in uncontaminated and contaminated

植物名称 Plant species	污染情况 Pollution situation	土壤水溶性盐含量/% Soil soluble salt	K ⁺ /(mg·g ⁻¹)	Ca ²⁺ /(mg·g ⁻¹)	Na ⁺ /(mg·g ⁻¹)	Mg ²⁺ /(mg·g ⁻¹)
紫叶李 <i>P. cerasifera</i>	污染	7.63	7.6±1.2 d	12.3±3.0 b	0.13±0.01 d	19.2±3.6 c
	未污染	0.10	14.8±3.1 b	12.6±3.2 a	0.12±0.01 b	28.9±5.3 b
小叶黄杨 <i>B. sinica</i> var. <i>parvifolia</i>	污染	2.39	19.8±3.6 a	8.7±1.5 c	0.18±0.02 c	23.5±4.2 bc
	未污染	0.11	10.5±2.0 c	9.6±1.7 b	0.14±0.01 a	22.9±3.9 c
冬青卫矛 <i>E. japonicas</i>	污染	0.27	11.5±2.1 c	19.5±3.0 a	0.28±0.04 a	48.6±8.3 a
	未污染	0.09	11.7±2.4 c	13.0±1.9 a	0.11±0.03 a	26.5±5.2 bc
沙地柏 <i>S. vulgaris</i>	污染	2.56	15.5±3.5 b	6.4±1.0 d	0.22±0.04 b	27.4±5.4 b
	未污染	0.30	14.9±3.2 b	1.8±0.2 d	0.13±0.01 a	4.5±0.9 d
麦冬 <i>O. japonicus</i>	污染	0.77	7.6±1.7 d	3.6±0.3 e	0.26±0.04 ab	25.4±5.5 b
	未污染	0.10	35.9±7.1 a	6.8±1.2 c	0.14±0.01 a	40.5±7.2 a

注：表中金属元素列的数据为“平均值±标准差”，同列数据后不同小写字母表示同一植物污染和未污染条件下不同处理间的差异显著性 ($P < 0.05$)。

Notes: The data in the column of metal elements in the table is "mean standard deviation", and different lowercase letters in the same column indicate significant differences between different treatments under polluted and unpolluted conditions ($P < 0.05$).

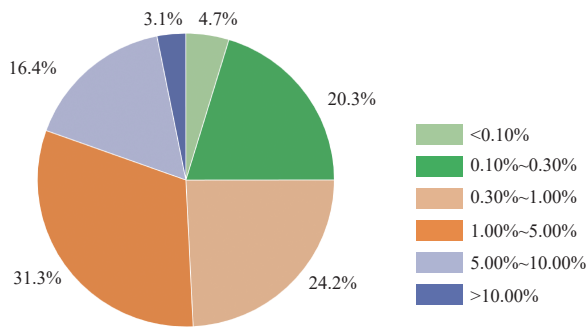


图 5 表层土壤 (0~20 cm) 不同含盐量所占百分比

Fig. 5 Percentage of different soil soluble salt content in surface soil (0~20 cm)

含量普遍高于同区域未污染土壤(图 6)。其中污染土壤的水溶性盐含量最大值高达 25.85%，是同区域未污染土壤水溶性盐含量 0.17% 的 152 倍，凸显了融雪剂对土壤盐分积累的显著影响。在不同行政区域之间，融雪剂对绿化带土壤的污染程度呈现出显

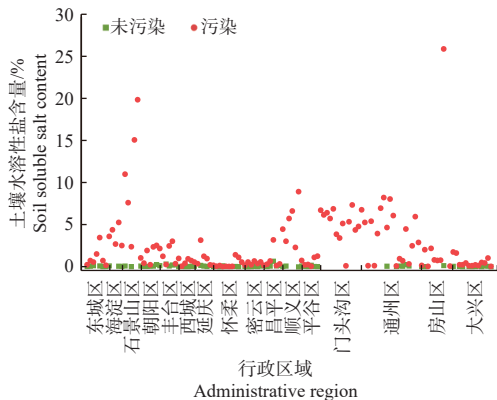


图 6 不同行政区域表层土壤 (0~20 cm) 水溶性盐含量

Fig. 6 Soil soluble salt content of surface soil (0~20 cm) in different administrative regions

著差异。石景山区绿化带土壤受融雪剂污染最为严重，水溶性盐含量均高于 0.30%，且高达 50.0% 的土壤样品水溶性盐含量超过 10.00%，土壤盐分积累问题尤为突出。相比之下，怀柔区绿化带土壤受融雪剂污染程度最轻，50.0% 的土壤样品水溶性盐含量低于 0.10%，70.0% 的土壤样品水溶性盐含量低于 0.30%。

2.3 深层土壤水溶性盐含量分析

由于绿化施工过程中存在的复杂性以及土壤下层存在的石子、砖块等侵入体较多，深层 (20~40 cm) 土壤样品的采集工作面临较大难度，因此仅采集到 38 个受污染土壤样品和 16 个未受污染土壤样品。在 8 个行政区域内采集的 38 个受融雪剂污染的土壤样品中，水溶性盐含量为 0.03%~1.48%。其中：7 个样品土壤水溶性盐含量低于 0.10%，占比 18.4%；11 个样品土壤水溶性盐含量为 0.10%~0.30%，占比 28.9%；20 个样品土壤水溶性盐含量超出 0.30%，占比 52.6% (图 7)。

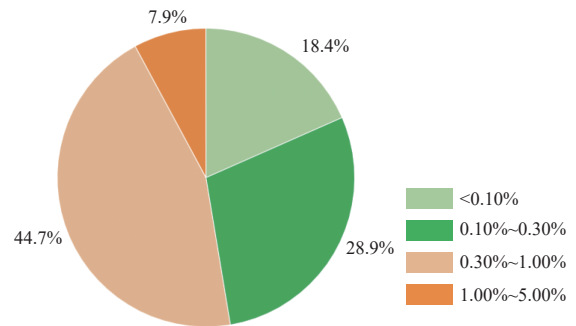


图 7 深层土壤 (20~40 cm) 不同含盐量所占百分比

Fig. 7 Percentage of different soil soluble salt content in deep soil (20~40 cm)

相比表层(0~20 cm)土壤,深层(20~40 cm)土壤受融雪剂残留水溶性盐含量的影响较小(图8),多数土壤水溶性盐含量为0.30%~1.00%,远低于表层(0~20 cm)土壤的水溶性盐含量。这种现象可能与采样时间有关,本次采样时间在春季浇返青水之前,此时土壤中盐分多处于表层累积状态,未发生自然下渗(即淋溶过程),盐分在土壤表层滞留。但与同区域对照组土壤水溶性盐含量相比,大部分样点仍有不同程度的增加。

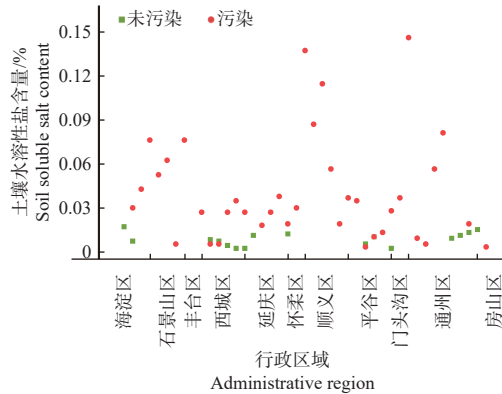


图8 不同行政区域深层土壤(20~40 cm)水溶性盐含量
Fig. 8 Soil soluble salt content in deep soil (20~40 cm) of different administrative regions.

3 结论与讨论

3.1 受融雪剂污染后不同植物表现出差异性的响应特点

受到融雪剂污染后,不同植被表现出了不同的响应和吸收机制。其中,乔木受污染最小,灌木次之,草本最严重。这与韩慧丽等(2009)研究结果一致。由于生活型差异以及种植位置的不同,不同植物对高浓度盐环境的敏感性和响应各不相同(张迪等, 2024; 周琦等, 2015)。乔木具有较高的生物量、较长时间的代谢周期和木质化的根茎结构,使其在短时间内具有较高的耐盐性(Li et al., 2014),且根系较深,植株较高,种植于绿化带中央,受融雪剂直接污染较小;灌木株高较小,大量融雪剂溅落在植株上,容易被植物叶片直接吸收,导致植物体内营养元素失衡(潘瑞焱, 2012; 王蕾等, 2023);而草本植株低矮,根系较浅,除受融雪剂直接接触的影响外,由于表层土壤受融雪剂污染,土壤 Na^+ 过量,与 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等离子竞争植物根系细胞膜上的离子通道,导致其余阳离子的吸收减少(姜美玲等, 2015; 余海英等, 2009)。前人研究表明,大叶黄杨在受到氯盐融雪剂危害时,其致死率随着融雪剂的剂量增加和暴露时间的延长而逐渐上升,当大叶黄杨种群受到 $5 \text{ kg}/(\text{L}\cdot\text{m}^2)$ 剂量的

的氯盐融雪剂处理30 d后,可观察到半致死效应(李周园等, 2012)。

3.2 道路绿化带表层土壤受融雪剂污染严重

撒施融雪剂后,道路绿化带表层土壤受污染严重,深层土壤受污染较表层土壤轻。融雪剂对土壤的污染主要归因于其高溶解度的 Na^+ 和 Cl^- 离子(Dailey et al., 2014)。这些离子在土壤介质中易于积累,并且由于其难以被生物降解或土壤颗粒有效吸附,会逐渐导致土壤盐分在土壤表层累积,土壤水溶性盐含量显著上升(姜美玲等, 2015)。在本研究中,2024年春季,75.0%的土壤水溶性盐含量超过0.30%,95.3%的土壤水溶性盐含量超过0.10%;下层(20~40 cm)土壤的水溶性盐含量为0.03%~1.48%,其中50.6%的土壤水溶性盐含量超过0.30%,81.6%的土壤水溶性盐含量超过0.10%。

4 建议

4.1 减少融雪剂的施用频率

政府部门应加大对融雪剂使用的监管力度,秉持“非必要不使用”的原则,力求实现“能减则减、应禁则禁”,并积极推广无盐化的扫雪铲冰方法。确需使用融雪剂时,应根据气象、交通流量等相关信息综合分析研判,严格按照融雪剂使用相关技术规范,科学合理地确定使用范围和用量,及时组织清扫积雪,大力推广使用低氯低钠型融雪剂。此外,还应建立和实施融雪剂出入库登记制度,实行清单化管理,并开展融雪剂产品及使用情况检查,禁止使用不合格产品。施用融雪剂时应集中在道路中间车道撒施,严格控制撒施高度,避免融雪剂直接进入绿地,对植物造成不必要的伤害(郑武西等, 2022)。

4.2 建立系统的道路除雪应急保障体系

入冬前相关部门应严格按照部门职责分工,研究建立极端降雪天气预测预警及道路交通安全应急保障跨部门联合工作机制,共同探索适宜不同应用场景的城市道路应急除雪模式。各环卫专业作业单位应实施小循环、高频次编组作业,以机械扫雪为主,科学规范使用融雪剂。有条件的情况下,城建部门可及时在城市环路、快速路和主干道等绿化带安装防护板,做好主动应对(王艳春等, 2011; 逢好胜等, 2023)。降雪后,环卫部门应及时组织清理积雪,不把积雪堆积至道路绿化带中。绿化部门应及时更换融雪剂残留区域的表层土壤,防止渗透至下层土壤。相关科研院所、企业等应学习借鉴国内外先进的降雪处理经验,加强新型除雪装备研发和制造,形成兼

顾交通安全与花园城市建设成果的城市除雪应急保障体系。此外,应在全市开展少用、不用融雪剂作业试点,在城市环路、快速路和主干道等交通压力较大的路段,优先使用专用机械扫雪除雪。在降雪期间,应发动党政机关、社会单位、公园、居民等社会力量参与扫雪铲冰。

4.3 研发环境友好型融雪剂

积极研发环保型、无毒害的融雪剂产品是当下的重要任务。为了最大限度降低对土壤、植物以及地下水等环境的不良影响,在新型融雪剂成分的选择上,应优先选用有机酸类化合物或生物可降解材料作为其主要成分(刘倩等,2012;邹笛等,2019)。有机酸类化合物具有较好的融雪效果,化学性质相对温和,对环境的危害较小;而生物可降解材料更是具有环保的优势,能够在自然环境中逐步分解,危害性极小(李根等,2020)。同时,还可加入一些生态友好型添加剂,例如微生物菌剂和腐殖质。微生物菌剂能够促进土壤微生物的活性,使土壤中的微生物更好地发挥其分解、转化等生态功能,从而加速土壤生态的恢复;而腐殖质则可以增强植物的抗逆性,为植物的生长提供有力保障(张小明等,2013)。这些添加剂有助于在融雪后快速恢复土壤生态平衡,使土壤能够尽快恢复到正常的状态,进而促进植物生长,减少融雪剂对环境的长期负面影响,保障生态环境的可持续发展。

4.4 宣传普及融雪剂使用常识

积极开展极端降雪天气应急科普宣传工作,使公众深入了解融雪剂滥用对园林植物、道路桥梁和车辆的危害,鼓励全体市民共同监督融雪剂的使用,防止其滥用。同时,在雪后,应积极倡导公众减少非必要出行,以减轻道路清扫压力,并引导公众理解机械除雪可能导致的道路通行效率暂时降低等现象。在此基础上,发动广大市民积极参与社区、街道和单位组织的人工扫雪除冰活动。

参 考 文 献

韩慧丽,秦佩,张莹莹,等. 2009. 融雪剂对高速公路中分带植物伤害调查分析[J]. 河南科学, 27(3): 295-298.
(Han H L, Qin P, Zhang Y Y, et al. 2009. Investigation and analysis on plant which has been injured by snow-melting agent in medial divide on the expressway[J]. Henan Science, 27(3): 295-298.)
姜美玲,孙向阳,栾亚宁,等. 2015. 不同改良剂对融雪剂盐害土壤的修复效果[J]. 水土保持通报, 35(6): 301-305, 310.
(Jiang M L, Sun X Y, Luan Y N, et al. 2015. Effects of different soil amendments on soil improvement of deicing salt damaged soil[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 35(6): 301-305, 310.)

李根,黄占斌,杨凤至,等. 2020. 融雪剂施用对道路环境的影响研究[J]. 绿色科技, 22(14): 169-172, 175.
(Li G, Huang Z B, Yang F Z, et al. 2020. Study on the road environmental effect of snowmelt agent application[J]. Journal of Green Science and Technology, 22(14): 169-172, 175.)
李瀚涛,岳冠华,王辰,等. 2011. 融雪剂的危害及其治理对策[J]. 绿色科技, 13(10): 109-111.
(Li H T, Yue G H, Wang C, et al. 2011. Harm of snow melting agent and its control countermeasures[J]. Journal of Green Science and Technology, 13(10): 109-111.)
李周园,周骏辉,梁英梅. 2012. 氯盐融雪剂与大叶黄杨致死的剂量—效应关系[J]. 北京林业大学学报, 34(1): 64-69.
(Li Z Y, Zhou J H, Liang Y M. 2012. Lethal dose-effect correlations of chloride snow-melting agent on *Euonymus japonicus*[J]. Journal of Beijing Forestry University, 34(1): 64-69.)
刘倩,许英梅,王维,等. 2012. CMA 环保型融雪剂对植物生长生理特性的影响[J]. 化学世界, 53(9): 521-525.
(Liu Q, Xu Y M, Wang W, et al. 2012. Effects of environment-friendly CMA deicer on growth and physiological characteristics of plants[J]. Chemical World, 53(9): 521-525.)
刘文盈. 2017. 紫叶小檗对氯盐融雪剂胁迫的生理生化响应[J]. 基因组学与应用生物学, 36(7): 2998-3002.
(Liu W Y. 2017. Physiological and biochemical response of *Euonymus japonicus* var. *atropurpurea* to chlorine salt snowmelt agent stress[J]. Genomics and Applied Biology, 36(7): 2998-3002.)
潘瑞焜. 2012. 植物生理学[M]. 7版. 北京: 高等教育出版社.
逢好胜,文超,李晓奇,等. 2023. 融雪剂对城市绿化危害及治理措施探讨[J]. 现代园艺, (15): 194-195, 199.
(Pang H S, Wen C, Li X Q, et al. 2023. Discussion on the harm of snow melting agent to urban greening and its control measures[J]. Contemporary Horticulture, (15): 194-195, 199.)
王蕾,兰柳艳,罗晓慧,等. 2023. 盐胁迫下粉蕉植株营养元素的吸收与分布特征[J]. 热带作物学报, 44(4): 724-729.
(Wang L, Lan L Y, Luo X H, et al. 2023. Characteristics of uptake and distribution of nutrient elements in pisang awak plants under salt stress[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 44(4): 724-729.)
王艳春,白雪薇,李芳. 2011. 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, 34(11):59-63.
(Wang Y C, Bai X W, Li F. 2011. Effect of snow melt agent containing chloride-salt on soil chemical characters of urban road greenbelt[J]. Environmental Science & Technology, 34(11):59-63.)
闫成竹,朱宏,金晓霞,等. 2017. 融雪剂对北方四种主要草坪植物种子萌发的影响[J]. 草地学报, 25(2): 437-441.
(Yan C Z, Zhu H, Jin X X, et al. 2017. Effect of deicing salt on seed germination of four main northern turfgrass species[J]. Acta Agrestia Sinica, 25(2): 437-441.)
余海英,孔亚平,张科利,等. 2009. 融雪剂在路域土壤中的累积、扩散及其对土壤性质的影响[J]. 水土保持学报, 23(6): 182-185,214.
(Yu H Y, Kong Y P, Zhang K L, et al. 2009. Accumulation and translocation of deicing salts in roadside soils and their effects on soil properties[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 23(6): 182-185, 214.)
张小明,孙宇轩,胡兴安,等. 2013. 环境材料对高速公路绿化带土壤盐

- 碱化的改良效应[J]. 公路, 58(8): 286–289.
- (Zhang X M, Sun Y X, Hu X A, *et al.* 2013. The improving effect of environmental material on soil salinization in greenbelt of expressway[J]. Highway, 58(8): 286–289.)
- 张营, 李法云, 严霞, 等. 2012. 外源 K⁺和水杨酸在缓解融雪剂对油松幼苗生长抑制中的效应与机理[J]. 生态学报, 32(14): 4300–4308.
- (Zhang Y, Li F Y, Yan X, *et al.* 2012. Alleviation effect and mechanism of exogenous potassium nitrate and salicylic acid on the growth inhibition of *Pinus tabulaeformis* seedlings induced by deicing salts[J]. Acta Ecologica Sinica, 32(14): 4300–4308.)
- 郑武西, 区桦, 宗炜, 等. 2022. 道路融雪剂“精细化”使用技术研究与应用[J]. 公路, 67(1): 344–348.
- (Zheng W X, Ou H, Zong W, *et al.* 2022. Research and application of “fine” application technology of road snow melting agent[J]. Highway, 67(1): 344–348.)
- 周琦, 祝遵凌. 2015. NaCl 胁迫对 2 种鹅耳枥幼苗生长及离子吸收、分配与运输的影响[J]. 北京林业大学学报, 37(12): 7–16.
- (Zhou Q, Zhu Z L. 2015. Effects of NaCl stress on seedling growth and mineral ions uptake, distribution and transportation of two varieties of *Carpinus L.*[J]. Journal of Beijing Forestry University, 37(12): 7–16.)
- 张迪, 薛源, 圣倩倩, 等. 2024. 盐胁迫对三角梅光合特性与营养元素的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 45(4): 13–27.
- (Zhang D, Xue Y, Sheng Q Q, *et al.* 2024. Effects of Salt Stress on photosynthetic characteristics and nutrient elements of *Bougainvillea* [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 45(4): 13–27.)
- 邹笛, 赵天宇, 温亚梅, 等. 2019. 氯化钠和醋酸钙镁两种融雪剂对土壤中典型重金属结合态的影响[J]. 吉林大学学报(理学版), 57(2): 445–453.
- (Zou D, Zhao T Y, Wen Y M, *et al.* 2019. Effects of NaCl and CMA deicing salts on binding states of typical heavy metals in soil[J]. Journal of Jilin University (Science Edition), 57(2): 445–453.)
- Dailey K R, Welch K A, Lyons W B. 2014. Evaluating the influence of road salt on water quality of Ohio rivers over time[J]. Applied Geochemistry, 47: 25–35.
- Kostka A, Strzebońska M, Sobczyk M, *et al.* 2019. The effect of de-icing roads with salt on the environment in Krakow (Poland)[J]. Geology, Geophysics & Environment, 45(3): 195.
- Li Z Y, Liang Y M, Zhou J H, *et al.* 2014. Impacts of de-icing salt pollution on urban road greenspace: A case study of Beijing[J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 8(5): 747–756.
- Rath K M, Maheshwari A, Bengtson P, *et al.* 2016. Comparative toxicities of salts on microbial processes in soil[J]. Applied and Environmental Microbiology, 82(7): 2012–2020.