



草原与草坪

Grassland and Turf

ISSN 1009-5500,CN 62-1156/S

《草原与草坪》网络首发论文

题目：融雪剂对路域植物和土壤的影响及其耐性植物筛选
作者：李志平，方明，杨智，陈茂阳，余文婕，岳建伟，李素清，李瑞金
收稿日期：2023-08-16
网络首发日期：2024-10-12
引用格式：李志平，方明，杨智，陈茂阳，余文婕，岳建伟，李素清，李瑞金. 融雪剂对路域植物和土壤的影响及其耐性植物筛选[J/OL]. 草原与草坪. <https://link.cnki.net/urlid/62.1156.S.20241011.1506.012>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

融雪剂对路域植物和土壤的影响及其耐性植物筛选

李志平^{1,2}, 方明¹, 杨智¹, 陈茂阳¹, 余文婕¹, 岳建伟², 李素清³, 李瑞金^{1*}

(1. 山西大学环境科学研究所, 山西 太原 030031; 2. 山西众智检测科技有限公司, 山西 太原 030031;

3. 山西大学黄土高原研究所, 山西 太原 030031)

摘要:【目的】研究融雪剂对路域植物群落优势种及其根际土壤的影响, 并筛选耐性植物。【方法】在太原市某道路两侧, 进行植物样方调查与植物及根际土壤样本采集。测定路域植物根际土壤含盐量、土壤酶活性、植物叶和根中抗逆性指标。【结果】1) 与对照组(低盐)比, 融雪剂组(高盐)植物群落优势种根际土壤蔗糖酶、过氧化氢酶和碱性磷酸酶活性下降, 且与含盐量大小顺序为女贞>草地早熟禾>堪察加景天>冬青; 2) 融雪剂组优势种根际土壤脲酶活性降低, 但与含盐量无相关性。土壤含盐量呈刺槐<冬青<堪察加景天<草地早熟禾<女贞的特征。(3) 融雪剂组植物叶中叶绿素含量比对照组低, 丙二醛含量比对照组高。融雪剂组堪察加景天和女贞叶和根中丙二醛含量低于冬青和草地早熟禾。脯氨酸和可溶性蛋白含量融雪剂组冬青叶中比对照组低, 而女贞叶中其含量比对照组高。【结论】融雪剂对植物叶绿素合成、抗寒、抗氧化和细胞保水性有不良影响, 且对路域土壤有不利影响。堪察加景天和女贞植物抗逆性高于冬青和草地早熟禾。
关键词: 融雪剂; 路域; 土壤; 抗逆性; 耐性植物; 筛选

Effects of snow-melting agents on roadside plants and rhizosphere soil and screening of tolerant plants

LI Zhi-ping^{1,2}, FANG Ming¹, YANG Zhi¹, CHEN Mao-yang¹, YU Wen-jie¹, YUE Jian-wei², LI Su-qing³, LI Rui-jin^{1*}

(1. Institute of Environmental Science, Shanxi University, Taiyuan, 030031, China; 2 Shanxi Unisdom Testing Technology Co., Ltd., Taiyuan, 030031, China; 3 Institute of Loess Plateau, Shanxi University, Taiyuan 030031, China)

Abstract: 【Objective】 This study aims to elucidate the effects of snow-melting agents on dominant roadside plants of community and rhizosphere soil and screen tolerant plants. 【Method】 Plant quadrat survey and collection of plant leaves and roots and rhizosphere soil samples were conducted on both sides of a road in Taiyuan City, China. The salt content changes in rhizosphere soil, soil enzyme activity, and resistance indexes in plant leaves and roots were investigated. 【Result】 (1) Soil sucrose, catalase, and alkaline phosphatase activities of rhizosphere soil in dominant plants of the community from snow-melting agent groups (high-salinity) decreased compared with the control groups (low-salinity), along with negative correlations with salinity content. (2) The urease activity of rhizosphere soil in dominant roadside plants of the community from snow-melting agent groups (high-salinity) decreased with high salinity content, but there was no correlation. The salinity content of rhizosphere soil of roadside dominant plants showed the characteristics of *Robinia pseudoacacia* < *Ilex chinensis* Sims < *Sedum kamtschaticum* < *Poa pratensis* < *Ligustrum lucidum*. (3) The contents of chlorophyll and malondialdehyde in the leaves of the snow-melting agent group were lower than that of the control, while the contents of malondialdehyde were higher than that of the control. The malondialdehyde contents in the leaves and roots of *Sedum kamtschaticum* and *Ligustrum lucidum* in the snow-melting agent group were lower than that of *Ilex chinensis* Sims and *Poa pratensis*. The contents of proline and soluble protein in the leaves of *Sedum kamtschaticum* and *Ligustrum lucidum* in the snow-melting agent groups were lower than those of the control group, while the contents of *Ligustrum lucidum* leaves were more than those of the control group. 【Conclusions】 It suggested that the snow-melting

收稿日期: 2023-08-16; 修回日期: 2023-10-21

基金项目: 山西大学第 19 批科研训练项目(2020); 太原市市容环境卫生科学研究所研发项目“植物对道路融雪剂胁迫的耐性机制”(02050120120130)

作者简介: 李志平(1982-), 男, 山西夏县人, 本科, 工程师, 研究方向为环境检测和环境损害司法鉴定。E-mail: 64791743@qq.com

*通信作者。E-mail: lirj@sxu.edu.cn

agent adversely affected chlorophyll synthesis, cold resistance, oxidation resistance, and water retention of cells and negatively affected roadside soil. The stress resistance of *Sedum kamtschaticum* and *Ligustrum lucidum* was better than that of *Ilex chinensis* Sims and *Poa pratensis*.

Keywords: snow-melting agent; roadside; soil; stress resistance; tolerant plant; screen

我国北方地区冬季气候寒冷干燥。极端冰雪天气使道路积雪结冰,严重影响行车安全和行人安全。为解决冬季道路积雪和结冰问题,价格低廉、喷洒方便和融冰效率高的融雪剂被生产和使用^[1-2]。20 世纪 30 年代,欧美发达国家开始使用氯盐类融雪剂对道路积雪进行清除,并于 60 年代推广并广泛应用^[3]。我国北方城市 1970 年开始采用氯化盐融雪剂除雪。融雪剂在几十年的长期使用中,对公路路面、路域土壤及植被造成了严重的破坏^[4-6],融雪剂对路域植物及其根际土壤的影响亦引起人们关注。有学者发现融雪剂对植物生长及其生理生化指标有不利影响^[7,8];融雪剂可影响植物的种子发芽、叶绿素合成、离子稳态、细胞内渗透压、新陈代谢、抗氧化系统和植物激素信号传导,导致植物叶片褐变、生理干旱、离子稳态异常、代谢紊乱和脂质过氧化,影响植物生长^[8-13]。此外,融雪剂长期使用还会导致土壤盐分累积、板结及盐碱化^[14]。还有学者探讨了植被对道路融雪剂胁迫的耐性机制以及合理的融雪剂使用剂量较少^[15-16],这对保护生态环境和促进环保型融雪剂的开发和应用有重要意义。

山西省太原市地处黄土高原东缘,属暖温带半干旱大陆性季风气候区。由于冬季下雪造成路面结冰,市政府常使用融雪剂清除积雪。但有关融雪剂对太原市路域植物及根际土壤影响的研究较少。本研究对太原市使用融雪剂的主要道路两侧的植物种类进行样方调查,并收集植物群落优势种叶和根的样本、采集根际土壤样本,通过测定融雪剂组(高盐)和对照组(低盐)植物样本抗性指标、分析土壤酶活性和含盐量相关性,阐明融雪剂对路域植物群落优势种及其根际土壤的影响,进一步筛选耐融雪剂胁迫的植物种类,以期修复融雪剂对路域植被的不良影响提供理论依据并为优化道路植被配置提供科学指导。

1 材料和方法

1.1 植物样方调查、植物与土壤样品采集

研究区位于山西省太原市坞城南路至小店真武路的公路两侧。于 2021 年 7 月选择无马路沿的公路两侧,在红寺村、彩虹街口、聚鑫港加油站、北张退水渠-充电站和坤泽街口附近选择样地。参考郭道宇等^[17]植物群落调查方法设置样方,进行乔、灌、草植物种类调查,草本层中的木本植物幼苗归入草本^[18]。每个样地 3 个重复,共计 18 个样方。记录每个样方中植物种的名称、高度、盖度、样方的经纬度、海拔高度等信息。将 18 个样方编号为 1-18 号。根据《环境影响评价技术导则土壤环境(试行)》(HJ964-2018),当群落土壤含盐量超过 0.2%(2 g/kg)时,即认为含盐量较高。故本研究选择靠近道路的土壤含盐量超过 0.2%的样地为融雪剂组(高盐),选择远离马路的土壤含盐量低于 0.2%的样地为对照组(低盐)。每个样方中,用剪刀采集植物的叶片,用铁锹挖出植物根,用剪刀剪下细根。将植物叶和根样本分别装入塑料自封袋中,做好标记,放入冰盒运回实验室,于 4℃冰箱保存,尽快测定植物抗逆性指标;同时用铁锹采集植物根际表层土壤(0~20 cm),充分混匀后分成 2 份。其中 1 份装入自封袋内,做好标记,带回实验室,放置 4℃冰箱保存,尽快测定土壤酶活性;另 1 份装入自封袋,带回实验室,用于测定土壤理化性质。

1.2 分析方法

1.2.1 土壤理化性质方法

依照我国土壤化学组成的推荐指标和检测方法,测定编号 1-18 号样方植物根际土壤的理化指标(主要包括 pH 值、含水量、含盐量、Cl⁻、Ca²⁺、Mg²⁺、K⁺、Na⁺、有机质、速效氮、铅、汞、砷)。采用的仪器主要有 AA-240FS 原子吸收分光光度计(UT/E-004);PHS-3C 酸度计(UT/E-011);ATY224 电子天平(UT/E-015);101-2A 电热鼓风干燥箱(UT/E-021);AA-240Z 原子吸收分光光度计(UT/E-005);AFS-9700 原子荧光光度计(UT/E-006)。

1.2.2 土壤酶活性分析

分别将编号 1-18 号样方植物根际土壤压碎,自然风干,分五点法取 5 g 土样。研磨磨细备用。按照试

剂盒说明书要求,分别取相应克数的土样,测定4种土壤酶的活性。土壤碱性磷酸酶(ALP)、土壤蔗糖酶(SC)、土壤过氧化氢酶(CAT)检测试剂盒购自北京索莱宝科技有限公司;土壤脲酶(UE)检测试剂盒购自南京建成生物工程研究所。操作按照试剂盒说明书进行。

1.2.3 植物样本分析

分别将编号1-18号样方植物叶的新鲜样本,用剪刀剪碎,随机取0.2 g,加1.5 mL 磷酸缓冲液(PBS),冰上研磨,充分释放叶中生化组分。研磨后叶的样本于4℃,12 000 r/min,离心20 min,取上清液待用。同样,分别将编号1-18号样方植物根的新鲜样本,用剪刀剪碎,随机取0.2 g,加1.5 mL PBS,冰上研磨,充分释放根中生化组分。研磨后根的样本于4℃,12 000 r/min 离心20min,取上清液待用。

测定植物叶样本中的总叶绿素(Ch)、叶绿素 a(Cha)和叶绿素 b(Chb)含量;测定植物叶和根样本中可溶性蛋白(SP)、脯氨酸(Pro)和丙二醛(MDA)含量。Ch、Cha、Chb 和 DP 检测试剂盒购自南京建成生物工程研究所。Pro 和 MDA 检测试剂盒购买于北京索莱宝科技有限公司。植物抗逆性指标 tCh、Cha、Chb、SP、Pro、MDA 的测定操作严格按照试剂盒说明书进行。

1.3 数据处理

以植物的重要值指标为基础进行群落数量特征研究^[19]。

乔木重要值=(相对密度+相对高度+相对显著度)/3

灌木、草本重要值=(相对高度+相对高盖度)/2

采用采用国际通用软件 TWINSpan 的双向指示种分析方法(Two-way indicator species analysis, TWINSpan)对植物群落进行分类^[20];采用 SPSS 26.0 软件的学生 *t* 检验分析不同群落的抗逆性指标组间差异;采用 Pearson 相关系数法计算土壤盐分与酶活性之间的相关系数及相关性。

2 结果和分析

2.1 路域植物物种组成与 TWINSpan 分类

研究区18个样方共记录20种植物,其中有乔木1种、灌木2种、草本植物17种(表1)。

双向指示种分析法(TWINSpan)将路域植物18个样方分为5组,依据《中国植被》^[21]的分类原则和系统,将它们命名为5个植物群落类型(表2),即:冬青群落(Comm. *Ilex chinensis*)、堪察加景天群落(Comm. *Sedum kamtschaticum*)、草地早熟禾群落(Comm. *Poa pratensis*)、女贞群落(Comm. *Ligustrum lucidum*)和刺槐群落(Comm. *Robinia pseudoacacia*)。

表1 研究区植物种类名录

Table 1 List of plant species in the research areas

序号	植物种名	拉丁名	生物学特性分类
1	冬青	<i>Ilex chinensis</i>	灌木
2	女贞	<i>Ligustrum lucidum</i>	灌木
3	堪察加景天	<i>Sedum kamtschaticum</i>	草本
4	狗尾草	<i>Setaria viridis</i>	草本
5	报茎苦苣菜	<i>Ixeris polycephala</i>	草本
6	地肤	<i>Kochia scoparia</i>	草本
7	马齿苋	<i>Portulaca oleracea</i>	草本
8	反枝苋	<i>Amaranthus retroflexus</i>	草本
9	画眉草	<i>Eragrostis pilosa</i>	草本
10	灰绿藜	<i>Chenopodium glaucum</i>	草本
11	地锦	<i>Parthenocissus tricuspidata</i>	草本
12	田旋花	<i>Convolvulus arvensis</i>	草本
13	白榆幼苗	<i>Ulmus pumila</i>	草本
14	草地早熟禾	<i>Poa pratensis</i>	草本

15	独行菜	<i>Lepidium apetalum</i>	草本
16	牛皮消	<i>Cynanchum auriculatum</i>	草本
17	苦苣	<i>Cichorium endivia</i>	草本
18	葎草	<i>Humulus scandens</i>	草本
19	篱打碗花	<i>Calystegia sepium</i>	草本
20	刺槐	<i>Robinia pseudoacacia</i>	乔木

2.2 不同群落根际土壤理化性质分析

根际土壤理化组分的测定结果土壤 pH 值为 7-9, 营养组分能基本维持植物的生长发育。土壤中检测出有害金属铅(Pb)、汞(Hg)和砷(As) (表 3)。

路域植物群落优势种刺槐和冬青的根, 容易吸收盐而摄入植物体内, 导致根际土壤含盐量下降。刺槐对盐的吸收能力大于冬青。堪察加景天、草地早熟禾和女贞的根不易吸收盐, 其根际土壤盐含量相对较高。对盐难吸收的植物的大小顺序为女贞>草地早熟禾>堪察加景天。

表 2 不同群落优势种根际土壤理化性质

Table 2 Physical and chemical characteristics in rhizosphere soil in dominant plants of different community

群落	pH 值	含水 量/%	Cl ⁻ (mg · kg ⁻¹)	Ca ²⁺ (g · kg ⁻¹)	K ⁺ (g · kg ⁻¹)	Na ⁺ (g · kg ⁻¹)	Mg ²⁺ (g · kg ⁻¹)	有机质/ (g · kg ⁻¹)	速效氮/ (mg · kg ⁻¹)	铅/ (mg · kg ⁻¹)	汞/ (mg · kg ⁻¹)	砷/ (mg · kg ⁻¹)
群落 1	8.01	2.26	50.80	25.00	16.55	13.11	3.80	41.93	198.50	24.63	0.10	9.31
群落 2	8.32	1.97	79.14	34.57	13.23	11.06	4.92	44.00	102.00	18.07	0.11	8.66
群落 3	7.86	2.40	186.07	22.07	16.97	12.03	3.65	46.30	236.33	26.00	0.11	8.80
群落 4	7.64	1.80	262.00	36.40	16.70	55.4	3.73	40.08	119.00	17.10	0.07	8.07
群落 5	7.98	3.20	61.33	27.37	12.77	12.77	4.23	55.43	282.00	11.93	0.14	9.64

表 3 路域植物群落 TWINSpan 分类及其优势种根际土壤含盐量

Table 3 TWINSpan category of roadside plant community and salinity content in rhizosphere soil in dominant plants

群落	群落优势种	样方编号	根际土壤平均含盐量(g/kg)
群落 1	冬青	1, 2, 7-9, 13-15	1.65
群落 2	堪察加景天	4, 5, 6	1.93
群落 3	草地早熟禾	10-12	2.03
群落 4	女贞	3	3.30
群落 5	刺槐	16-18	1.07

2.3 不同群落土壤酶活性及其与根际土壤含盐量相关性的分析

植物根际土壤 SC、CAT、AL 活性与相应土壤的含盐量呈负相关, 相关系数分别为-0.66、-0.97 和-0.65。含盐量高的土壤, 酶活性反而下降。植物根际土壤 SC 酶活性由高到低的顺序为刺槐>草地早熟禾>冬青>女贞>堪察加景天。勘察加景天和女贞根际土壤 SC 和 ALP 酶活性较低。CAT 活性与含盐量的相关性有显著统计学意义($P<0.01$), 植物根际土壤 CAT 酶活性由高到低的顺序为刺槐>冬青>堪察加景天>草地早熟禾>女贞。植物根际土壤 UE 活性与土壤含盐量之间没有相关性(表 4)。

表 4 不同群落优势种根际土壤 4 种酶活性平均值

Table 4 Mean enzyme activities of four enzymes in rhizosphere soil in dominant plants of different community

群落	群落优势种	SC 活性/ (U·g ⁻¹)	CAT 活性/ (U·g ⁻¹)	ALP 活性/ (U·g ⁻¹)	UE 活性/ (U·g ⁻¹)
----	-------	-----------------------------	------------------------------	------------------------------	-----------------------------

群落 1	冬青	121.8	216.0	11888.9	0.39
群落 2	堪察加景天	32.7	215.3	7 808.9	0.34
群落 3	草地早熟禾	201.1	214.8	17 400.0	0.45
群落 4	女贞	39.6	213.2	4 485.9	0.37
群落 5	刺槐	223.0	217.7	13 480.5	0.42
与含盐量的相关系数		-0.66	-0.97**	-0.65	0.09

注: Pearson 相关分析, ** $P<0.01$, 表示相关性有极显著性意义。

2.4 路域植物优势种抗逆性分析

路域融雪剂组(高盐)与对照组(低盐)植物优势种的叶或根样本中抗逆性指标(tCh、Cha、Chb、sP、Pro、MDA)的含量如表 5 所示。融雪剂组优势种叶中 MDA 含量由小到大顺序为堪察加景天<女贞≈草地早熟禾<刺槐<冬青。融雪剂组冬青、女贞的叶和根的 MDA 含量高于对照组, 冬青叶中 MDA 含量与对照组差异极显著 ($P<0.01$)。融雪剂组优势种冬青、刺槐叶和根的 SP 和 Pro 含量比对照组低; 而融雪剂组女贞叶和根的 SP 和 Pro 比对照组高。融雪剂组冬青叶、女贞叶的 Pro 与对照组相比差异显著 ($P<0.05$)。融雪剂组刺槐叶和根 Pro 和刺槐根 SP 含量与对照组相比差异显著或极显著 ($P<0.05$ 或 $P<0.01$)。与堪察加景天相比, 草地早熟禾叶中的 MDA、sP 和 Pro 水平变化具有显著性意义 (表 5)。

融雪剂组优势植物 tCh、Cha 和 Chb 含量比对照组低, 这说明高盐环境植物叶片的叶绿素合成水平降低, 但此变化与对照组相并异不显著 (表 6)。

表 5 路域植物优势种抗逆性指标(MDA、Pro、sP)水平及其根际土壤含盐量

Table 5 Levels of stress resistance indexes (MDA,Pro,sP)in roadside dominant plants and salinity content in plant rhizosphere soil

营养器官	含盐量/(g · kg ⁻¹)	MDA 含量/(nmol · g ⁻¹)	Pro 含量/(μg · g ⁻¹)	SP 含量/(g · L ⁻¹)
冬青叶	2.87	74.6±6.5**	0.06±0.01*	0.43±0.07
冬青叶	0.90	37.1±10.6	0.09±0.01	0.59±0.33
冬青根	2.87	21.5±8.7	0.06±0.01	0.36±0.01
冬青根	0.90	12.2±5.0	0.05±0.01	0.27±0.06
女贞叶	2.87	24.8±9.9	0.09±0.02*	0.93±0.31
女贞叶	1.73	16.1±4.9	0.06±0.01	0.68±0.23
女贞根	2.87	15.3±5.5	0.04±0.00	0.58±0.16
女贞根	1.73	11.3±3.7	0.04±0.00	0.32±0.24
堪察加景天叶	1.93	15.5±1.7	0.03±0.00	0.25±0.14
堪察加景天根	1.93	9.3±0.5	0.03±0.01	0.17±0.08
草地早熟禾叶	2.03	25.8±5.5#	0.06±0.01##	1.26±0.15##
草地早熟禾根	2.03	9.8±1.3	0.04±0.00	0.41±0.09#
刺槐叶	2.87	31.7±15.2	0.50±0.01*	0.28±0.11
刺槐叶	0.90	33.1±15.2	0.03±0.10	0.12±0.08
刺槐根	2.87	8.5±0.6	0.20±0.04**	0.24±0.07**
刺槐根	0.90	7.9±1.9	0.37±0.05	0.68±0.12

注: * $P<0.05$, 表示融雪剂组(高盐)与对照组(低盐)相比有显著性意义; ** $P<0.01$, 表示融雪剂组(高盐)与对照组(低盐)相比有极显著性意义。# $P<0.05$, 表示草地早熟禾与堪察加景天相比有显著性意义; ## $P<0.01$, 表示草地早熟禾与堪察加景天相比有极显著性意义。

表 6 路域植物优势种叶绿素含量及根际含盐量

Table 6 Chlorophyll contents in roadside dominant plants and salinity content in plant rhizosphere soil

营养器官	含盐量/(g · kg ⁻¹)	叶绿素 a/(mg · g ⁻¹)	叶绿素 b/(mg · g ⁻¹)	总叶绿素/(mg · g ⁻¹)
冬青叶	2.87	0.23±0.03	0.37±0.02	0.60±0.05
冬青叶	0.90	0.30±0.06	0.48±0.12	0.78±0.17
女贞叶	2.87	0.26±0.08	0.40±0.03	0.66±0.10
女贞叶	1.73	0.42±0.12	0.43±0.04	0.85±0.16
堪察加景天叶	1.93	0.22±0.02	0.38±0.03	0.60±0.04
草地早熟禾叶	2.03	0.39±0.16	0.47±0.11	0.86±0.26
刺槐叶	2.87	0.25±0.08	0.38±0.04	0.63±0.11
刺槐叶	0.90	0.49±0.19	0.49±0.07	0.98±0.26

3 讨论

3.1 融雪剂对路域土壤的影响

本研究显示,融雪剂施用的道路路域土壤 pH、含水量和氮营养成分的含量相对稳定(表 2),能满足植物生长,但融雪剂组土壤中 Cl⁻含量较高,这说明这些地域土壤受到融雪剂的影响,且含氯融雪剂使用较多。有学者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^[22],与本研究结果一致。路域土壤中还检测出 Pb,其含量高于 Hg 和 As,这提示交通尾气增加了当地土壤重金属浓度,这与汽车尾气引起公路两侧土壤中 Pb 含量增加的文献报道一致^[23]。

土壤酶活性从一定程度上反映了土壤质量状态^[24]。1) SC 酶活性降低会影响土壤肥力和碳元素的转化。土壤 SC 酶活性低,土壤肥力低。由表 4 可知,种群优势种根际土壤平均 SC 酶活性与含盐量呈负相关关系($r=-0.66$),融雪剂组含盐量越高,优势种根际土壤 SC 酶活性越低,会对土壤肥力有不利影响。刺槐和冬青的根吸收了土壤中盐分,使盐分对 CAT 的负面影响较小; 2) CAT 酶活性反映了土壤系统的抗氧化能力,其酶活性下降会削弱对土壤中活性氧的清除能力^[25];种群优势种根际土壤平均 CAT 酶活性与含盐量呈显著负相关关系($r=-0.97$),提示在本研究条件下高盐分存在抑制了 CAT 活性,抗氧化能力下降。优势种根际土壤含盐量表现为刺槐<冬青<堪察加景天<草地早熟禾<女贞的趋势,而根际土壤 CAT 活性呈现刺槐>冬青>堪察加景天>草地早熟禾>女贞的趋势,提示刺槐、冬青的根吸收了土壤中盐分,使盐分对 CAT 的负面影响较小。相对于草地早熟禾、女贞,堪察加景天根际土壤的抗氧化能力较强; 3) ALP 酶活性降低不利于磷转化和吸收。种群优势种根际土壤平均 ALP 酶活性与含盐量呈负相关关系($r=-0.65$),融雪剂组含盐量越高,优势种根际土壤 ALP 酶活性越低,不利于磷元素的转化吸收。相对而言,刺槐和冬青根际土壤 ALP 酶活性受盐分的影响较小; 4) UE 酶活性降低不利于氮元素的转化。本研究结果表明土壤 UE 的变化与盐分之间没有相关性,提示盐分对土壤氮元素转化的影响不大。可见,盐胁迫影响了土壤酶活性水平,对土壤质量状态有不良影响。不同优势种植物对根际土壤质量状态有不同程度的作用,刺槐、堪察加景天和冬青对其根际土壤有积极的保护作用。

3.2 融雪剂对路域植物的影响

植物抗逆性指标反映了植物在外来胁迫下的生理状态^[26]。在高盐胁迫环境下植物生理指标和抗氧化指标均会受到影响^[27-28]。1) 从植物对土壤盐分吸收的角度分析,刺槐和冬青对盐分吸收能力相对较强,其根际盐含量较低(表 3)。女贞、草地早熟禾、堪察加景天的根对盐分吸收能力较差。这说明女贞、草地早熟禾、堪察加景天在高盐条件下受盐分的胁迫影响较小; 2) 叶绿素含量降低,会影响叶绿素合成和光合作用。研究表明,路域植物群落优势种受到融雪剂的影响,植物叶绿素含量下降^[9]。由表 5 可知,融雪剂组植物的叶绿素含量比对照组低,虽然这种变化没有显著的统计学意义,也提出高盐对植物叶绿素合成有潜在不利影响的警示; 3) MDA 含量升高,植物抗氧化能力下降,引起细胞脂质过氧化,不利于植物细胞生

长^[13,29-30]。融雪剂作用下路域植物群落优势种叶和根中 MDA 含量比低盐环境下的 MDA 水平要高,这说明土壤高盐分对植物氧化还原状态有影响,能引起植物叶和根细胞膜脂质过氧化,造成氧化损伤。有研究发现,盐胁迫引起早熟禾等 8 中草本植物叶中 MDA 含量增加,这与本研究结果一致^[31]。融雪剂组群落优势种堪察加景天和女贞叶和根中 MDA 含量相对于其他植物较低,提示堪察加景天和女贞抗氧化能力较强。融雪剂组群落优势种冬青叶中 MDA 含量的变化比低盐组显著增加,其 MDA 含量相对于其它植物较高,这说明冬青对盐分比较敏感,抗氧化能力较弱;4) Pro 含量降低,不利于抗寒。sP 含量降低,不利于植物保水。融雪剂组群落优势种冬青叶中 Pro 含量比对照组显著降低,对植物生长有不利影响,抗寒能力差。有研究发现,盐胁迫引起早熟禾等 8 中草本植物叶中 SP 含量下降^[31],这与本研究结果一致。融雪剂组女贞叶中 Pro 含量比对照组显著增高,提示其抗寒能力较强,对高盐和寒冷耐受。冬青叶和女贞叶 SP 含量的变化规律相似,提示冬青保水能力差,女贞保水能力强。

考虑到融雪剂对公路和路域土壤及植物的影响,20 世纪 80 年代末以来,国内外已越来越多的改用对环境的腐蚀性和破坏性低的环保型的有机类融雪剂,特别注重对低成本和环境友好的新型融雪剂的研发^[15,16,32-33]。我国学者利用杨树叶制备的环保型融雪剂对公路及路域植物生长均未有不良影响^[34]。这提示新型环保型融雪剂开发及其对生态环境的影响评估的工作还应深入。

本研究选取了太原市冬季施用融雪剂的某路段开展相关研究,采样点数目和样方植物信息收集有限。今后应增大样本量深入研究融雪剂对路域土壤和植物的影响。

4 结论

1) 本研究道路两侧土壤存在含盐量较高的情况,含氯融雪剂使用较多。多年使用融雪剂影响土壤酶活性,对土壤质量状态有不良影响。路域植物群落优势种勘察加景天、草地早熟禾和女贞根际土壤盐含量相对较高,刺槐和冬青根际土壤盐含量相对较低。刺槐、勘察加景天和冬青对其根际土壤有积极保护作用。

2) 融雪剂对路域植物优势种叶绿素合成、抗寒性、抗氧化应激和植物细胞保水性有不良影响。相对而言,冬青和草地早熟禾对盐分的敏感性较强,抗逆性差;堪察加景天和女贞对融雪剂的耐性较强。

参考文献:

- [1]陈樱华,张金娜,李富华,等.融雪剂的研究进展[J].天津化工, 2022, 36(3): 12-14.
- [2]周小鹏,黄军瑞,王腾,等.我国道路融雪剂应用现状及发展趋势[J].辽宁化工, 2019, 48(9): 920-922+925.
- [3] Friell J, Watkins E. Review of cool-season turfgrasses for salt-affected roadsides in cold climates[J].Crop Sci., 2021, 61(5): 2893-29150
- [4]Wang F, Qin X, Pang W, et al. Performance deterioration of asphalt mixture under chloride salt erosion[J]. Materials (Basel). 2021, 14(12): 3339.
- [5]逢好胜,文超,李晓奇,等. 融雪剂对城市绿化危害及治理措施探讨[J]. 现代园艺, 2023, 46(15): 194-195,199.
- [6] 蔺晓娟,王凤因.融雪剂对沈阳地区道路桥面和植被的影响及预防措施[J].环境保护科学, 2010, 36(5): 51-58.
- [7]闫成竹,朱宏,金晓霞,等.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, 2017, 25(2): 437-441.
- [8]单丽岩,田霜,胡清.氯盐类融雪剂对路域植物和土壤的影响研究[J].安全与环境工程,2016, 23(3): 89-95.
- [9]徐新文,徐海量,王艳玲,等.盐胁迫对沙漠公路防护林主要固沙植物叶绿素含量的影响[J].科学通报, 2008, 53(S2): 96-99.
- [10] Fan X H, Wu Y H, Liu J Y. Impacts of highway snow-melting agents on greening vegetation [J]. Adv Mat Res,2013, 831: 272-275.
- [11] Yan C, Zhu H, Jin X, et al. Effect of deicing salt on seed germination of four main turfgrass species in North China [J]. Grassland J.,2017, 25(2): 437-441.
- [12] Zhao S, Zhang Q, Liu M, et al. Regulation of plant responses to salt stress [J]. Int J Mol Sci, 2021, 22(9):4609.
- [13] Bian W, Bao G, Liao J, et al. Comparative study on physiological response characteristics of white clover to chloride salt and calcium-magnesium acetate (CMA) deicing agents under freeze-thaw stress[J]. Grassl Sci, 2020, 66: 95-101.
- [14] Pedersen L B, Randrup T B, Ingerslev M. Effects of road distance and protective measures on deicing NaCl deposition and soil solution chemistry in planted median strips [J]. J Arboriculture, 2000, 26(5): 238-245.
- [15]李鹏.环保型道路融雪剂制备及应用技术研究[D].兰州:兰州交通大学, 2018.
- [16]朱汉祥.新型有机融雪剂对绿化带植物生长的影响[D].长春:吉林农业大学, 2016.
- [17]郭道宇,张金屯,宫辉力,等.安太堡矿区复垦地植被种间关系及土壤因子分析[J]. 生物多样性, 2007,(1): 46-52.
- [18]郭东罡,上官铁梁.中条山中段植物群落数量分类与排序研究[J]. 武汉植物学研究, 2005,23(5): 444-448.

- [19]张金屯.植被数量生态学方法[M].北京:中国科学技术出版社, 1995.
- [20] 文明, 张峰.中条山东段植被垂直带的数量分类研究 [J].应用与环境生物学报, 2000,6(3):201-205.
- [21]中国植被编辑委员会(主编:吴征镒).中国植被[M].北京:科学出版社, 1980.
- [22]王秀衡,曲睿卓,王奇凯,等.融雪剂对生物滞留池土层盐分的影响[J].中国给水排水, 2023, 39(1): 118-125.
- [23]黄世宏,刘盛萍,郑尼娜.汽车尾气对 206 国道周边土壤铅含量的影响[J].现代农业科技, 2011, 557(15): 271+277.
- [24]张体彬,展小云,冯浩.盐碱地土壤酶活性研究进展和展望[J].土壤通报, 2017, 48(2): 495-500.
- [25]刘云芬,王薇薇,祖艳侠,等.过氧化氢酶在植物抗逆中的研究进展[J].大麦与谷类科学, 2019, 36(1): 5-8.
- [26]朱雯雯.植物抗逆性的研究进展[J].种子科技, 2017, 35(7): 133+135.
- [27]Liang W, Ma X, Wan P, et al. Plant salt-tolerance mechanism: A review [J]. BiochemBiophys Res Commun., 2018, 495(1): 286-291.
- [28]岩学斌,袁金海.盐胁迫对植物生长的影响[J].安徽农业科学,2019,47(4):30-33.
- [29] 田晓艳,刘延吉,张蕾,等.盐胁迫对景天三七保护酶系统、MDA、Pro 及可溶性糖的影响[J].草原与草坪, 2009, 39(6):11-14.
- [30] Mahawar L, Shekhawat GS.Salt induceoxidative stress and its tolerance mechanism in plant: Morphological, biochemical and molecular perspective[J].Biotech Today: An International Journal of Biological Sciences, 2016, 6(2):81
- [31] 梁鹏飞,郭全恩,魏少萍,等.盐胁迫对 8 种草本植物幼苗生长和生理特性的影响[J].草原与草坪,2022,42(3):63-72.
- [32] Hirota T, Hasegawa M, Tanaka H,et al.Development and field testing of agricultural snowmeltingagents made from recycled bio-waste materials[J].J AgricMeteorol., 2008, 64(4):271-279.
- [33] Wang Y, Huang Z, Zhao M, et al. Enhanced chloride-free snow-melting agent generation from organic wastewater by integrating bioconversion and synthesis[J]. Bioresour Technol., 2022, 366:128200.
- [34]张钰汾,杨云磊,高波,等.利用杨树叶制备环保型融雪剂[J].山东化工, 2022, 51(21): 62-65.