

DOI: 10.16843/j.sswc.2021252

# 不同融雪剂对三种草坪草种子萌发特性的影响

杨凤至<sup>1</sup>, 赵萌萌<sup>1</sup>, 余启杰<sup>1</sup>, 赵斌<sup>2</sup>, 黄占斌<sup>1†</sup>

(1. 中国矿业大学(北京)化学与环境工程学院, 100083, 北京;

2. 北京市首发天人生态景观有限公司, 102600, 北京)

**摘要:** 融雪剂对植物种子萌发影响是国家标准中一项重要指标。本文采用种子萌发实验方法,以2号氯盐融雪剂和3号混合型融雪剂为对照,比较新研发的1号生态环保融雪剂对禾本科黑麦草(*Lolium perenne* cv. Green Emerald)和早熟禾(*Poa pratensis* cv. Merit)豆科白三叶(*Trifolium repens* cv. Riverdel)3种草坪草种子萌发特征影响,结合材料的环保性与经济性,评价不同融雪剂对草坪种子萌发特性的影响。结果表明:3种融雪剂对草坪草种子萌发均表现为低促高抑效应;相同浓度时,融雪剂对3种草坪草种子萌发50%抑制的临界值表现为:2号氯盐融雪剂>1号生态融雪剂>3号混合型融雪剂;随着融雪剂浓度增长,3种种子萌发受到抑制作用随之增强。3种草坪草对融雪剂耐受性表现为早熟禾>黑麦草>白三叶草。发芽率、发芽指数、活力指数、根长、种子相对受害率间呈显著相关。研究结果从多维度评价分析不同融雪剂对种子萌发特性的影响,为不同融雪剂使用的浓度限制范围,以及生态环保融雪剂推广应用提供参考。

**关键词:** 融雪剂; 黑麦草; 白三叶; 早熟禾; 种子萌发

**中图分类号:** X53 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-2673(2024)05-0171-08

**引用格式:** 杨凤至, 赵萌萌, 余启杰, 等. 不同融雪剂对三种草坪草种子萌发特性的影响[J]. 中国水土保持科学, 2024, 22(5): 171–178. YANG Fengzhi, ZHAO Mengmeng, YU Qijie, et al. Effects of different deicing agents on seed germination characteristics of three kinds of turfgrass[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2024, 22(5): 171–178.

## Effects of different deicing agents on seed germination characteristics of three kinds of turfgrass

YANG Fengzhi<sup>1</sup>, ZHAO Mengmeng<sup>1</sup>, YU Qijie<sup>1</sup>, ZHAO Bin<sup>2</sup>, HUANG Zhanbin<sup>1</sup>

(1. School of Chemical & Environmental Engineering, China University of Mining & Technology -Beijing, 100083, Beijing, China;

2. Beijing First Tianren Ecological Landscape Co. LTD., Beijing, 102600, Beijing, China)

**Abstract:** [ **Background** ] Deicing agent is a substance commonly used to remove snow and melt ice from roads in winter at home and abroad. However deicing agent can bring convenience to urban life while could also cause some damage to the urban ecological environment. With the strengthening of ecological environment and deicing agent environmental protection and economic requirements, cost-effective, degradable deicing agent has become a research hotspot. In order to evaluate the impact of deicing agent on the environment, the Chinese national standard stipulates that deicing agent had a relative seed damage rate  $\geq 50\%$  to the seeds of plants. [ **Methods** ] In this study, the effect of deicing agent on seed germination characteristics was evaluated from five indicators: seed germination rate, germination index,

收稿日期: 2021-11-01 修回日期: 2024-09-05

项目名称: 北京首发天人生态景观有限公司科研项目“新型生态环保融雪剂的研制及其环境效应研究”(U02626)

第一作者简介: 杨凤至(1995—),女,硕士。主要研究方向:土壤污染治理。E-mail:yfz1008@163.com

† 通信作者简介: 黄占斌(1961—),男,教授。主要研究方向:区域生态及植物生理生态;土壤面源污染治理;重金属污染及盐碱地治理技术研究和材料产品研发。E-mail:zbhuang2003@163.com

vigor index, root length, and relative seed damage rate. In this study, it was used the experimental method of seed germination. Taking No. 2 chlorine salt deicing agent and No. 3 mixed deicing agent as the control, it is analyzed the effects of No. 1 new eco-friendly deicing agent on seed germination characteristics for three turfgrass species, including perennial ryegrass (*Lolium Perenne*), white clover (*Trifolium Repens*) and kentucky bluegrass (*Poa Pratensis*). [ **Results** ] The results showed that different snow melting agents promoted the germination of turfgrass seeds at low concentration and inhibited the germination at high concentration. Under the same concentration of deicing agent stress, the cut-off value of 50% inhibition of seed germination was: No. 2 chlorine salt deicing agent > No. 1 new eco-friendly deicing agent > No. 3 mixed deicing agent. As the deicing agent concentration increased, the germination rate, germination index and vigour index of the three seeds decreased significantly, the radicle growth was significantly inhibited, the seed victimization rate increased significantly and the inhibition of the germination of the three seeds then increased. There is a significant correlation among germination rate, germination index, vigor index, root length and relative seed damage rate. Under the same type of deicing agent stress, the tolerance of bluegrass was the highest, the following is ryegrass and white clover. The new eco-friendly deicing agent showed that it can alleviate the salt stress of chloride on seed germination and promote seed germination and growth at low concentrations, but inhibited seed germination at high concentrations for all three turfgrass seeds. [ **Conclusions** ] The results evaluate and analyse the influence of different types of deicing agent on seed germination characteristics from multi-dimensional different indicators, and propose a reference limit concentration range for different types of deicing agent in use, which can help municipal sweeping department to quickly select the most suitable deicing agent under different environmental requirement conditions. It also provides reference suggestions for the promotion and application of new eco-friendly deicing agent in the future.

**Keywords:** deicing agent; perennial ryegrass; white clover; Kentucky bluegrass; seed germination

融雪剂是现在国内外冬季常用融冰除雪重要技术手段之一。它在消雪除冰、消除交通隐患和提供人们出行便利的同时,也对生态环境造成一定程度影响。市场常见融雪剂按其主要成分分类可分为:氯盐融雪剂、非氯盐类融雪剂和混合型融雪剂<sup>[1]</sup>。氯盐融雪剂是广泛使用的融雪剂,其主要成分为 NaCl、MgCl<sub>2</sub> 和 CaCl<sub>2</sub>。研究表明,氯盐融雪剂不仅会抑制植物种子的萌发、降低种子活力<sup>[2]</sup>;影响植物的光合作用<sup>[3]</sup>;还会产生盐胁迫导致植物出现生理干旱现象最后甚至脱水死亡<sup>[4]</sup>。非氯盐类融雪剂性能较稳定、环保性好,但生产工艺复杂、造价高昂,难以大面积推广应用,如美国的 CMA(钙镁乙酸盐);混合型融雪剂溶解性不如氯盐型融雪剂,且原料来源复杂、生产工艺繁琐<sup>[1]</sup>。本研究所选用的融雪剂为非氯盐类融雪剂,采用可降解、资源丰富的腐植酸为主原料,制备的融雪剂可生物降解为植物营养,不会产生二次危害,且价格远低于同类进口产品。随着生态环境的加强及融雪剂环保性和经济性要求,高性价比、可降解的融雪剂成为研究热点。

黄腐酸是一种由高分子化合物组成的腐植酸,具有改良土壤结构、促进化肥增效、改善植物抗逆性、提高作物产量和品质等效应。黄腐酸含有植物生长素和细胞分裂素结构,可促进植物种子萌发及幼苗生长<sup>[5]</sup>,缓解盐胁迫对种子萌发影响,促进植物生长<sup>[6-7]</sup>。因此可利用黄腐酸改性与钙盐合成新型生态环保融雪剂。根据(GB/T 23851—2017)《融雪剂》要求,笔者以市场上推行的氯盐融雪剂和环保型融雪剂为对照,分析新型生态环保融雪剂对植物相对种子受害率、种子活力、发芽率、发芽指数及根长抑制率等指标影响,以期评价新型生态环保融雪剂对植物种子发芽影响,提出其安全使用方法,为其生产应用提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

植物种子:选用我国北方绿化草坪常见的 3 种冷季型草种,禾本科黑麦草(*Lolium perenne*)和早熟禾(*Poa annua*),豆科白三叶(*Trifolium repens*),种子市场购买。

融雪剂:1号生态环保融雪剂,2号氯盐融雪剂,3号混合型融雪剂,元素构成见表1。1号为北京联合大学韩永萍副教授研制,钠离子和氯离子含量低,价格较低,适宜道路和机场应用;2号氯盐融雪剂为

传统型融雪剂对照,钠离子和氯离子含量高,价格较低,一般用于道路和庭院施用;3号混合型融雪剂对照,钠离子较低,氯离子和镁离子较高,价格较贵,一般重要道路等区域应用。

表1 三种融雪剂材料主要元素构成

Tab.1 Main element composition of three deicing agent materials

编号 No.	名称 Name	元素构成 Elemental composition (At %)
1	生态环保融雪剂 Eco-friendly deicing agent	C 32.6%、O 30.3%、Ca 16%、Cl 14.2%、Na 4%、Au 1.5%
2	氯盐融雪剂 Chlorine salt deicing agent	C 21%、O 24.7%、Ca 2.5%、Cl 24.7%、Na 24.4%、S 2.3%
3	混合型融雪剂 Mixed deicing agent	C 16%、O 35.4%、Ca 0.8%、Cl 25%、Mg 22.4%、Au 0.3%

## 1.2 试验设计

试验采用实验室培养皿种子发芽法。首先用浮选法挑选饱满草种,被选草种用浓度为0.8%的过氧化氢浸泡消毒并催熟2 min,最后将草种用去离子水充分冲洗,洗去过氧化氢,种子均匀放置在铺有3层滤纸培养皿中,每皿30粒。分别注入质量浓度为1、3、5、7、10 g/L的1号、2号、3号融雪剂,以蒸馏水为对照,温度控制 $25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ ,每处理设3个重复。隔12 h向培养皿加入5 mL融雪剂溶液,放恒温箱培养。从第2天开始记录各处理种子发芽数,芽长超种子长度一半即为发芽。

## 1.3 指标测定与计算方法

根长和芽长:在种子发芽结束后(12 d),用直尺直接测定测量根长( $L$ );

发芽率( $F$ )、发芽指数( $G$ )、活力指数( $V$ )和相对种子受害率( $S$ ):

$$\text{发芽率: } F = \frac{\text{种子发芽数}(12\text{ d})}{30} \times 100\%;$$

发芽指数:  $G = \frac{\sum g}{D}$ ; 式中:  $g$  为  $t$  时间内的发芽数量,  $D$  为相应的发芽时间,  $d$ ;

活力指数:  $V = G \times L$ ;  $G$  为发芽指数;  $L$  为根长, cm;

相对种子受害率:  $S = \frac{F_2 - F_1}{F_2} \times 100\%$ ; 式中:  $F_2$  为对照实验发芽率,  $F_1$  为融雪剂溶液实验发芽率。

使用 Excel 统计整理数据, SPSS 分析检验数据差异性(卡方检验方法), origin 绘图软件绘制图形。

## 2 结果与分析

### 2.1 发芽率和发芽指数

发芽率和发芽指数是评价种子发芽的常用指

标,反映种子发芽能力及其整齐度<sup>[8]</sup>。由图1可知,融雪剂对种子发芽率存在一定抑制。一般以当种子发芽率50%时的融雪剂浓度为种子萌发临界值<sup>[9]</sup>。回归分析得出,1号、2号、3号融雪剂对黑麦草临界值为:4.94、2.68和6.21 g/L;对白三叶的临界值为:2.89、2.98和4.86 g/L;对早熟禾的临界值为:5.33、4.43和10.76 g/L。可见,3种融雪剂对种子发芽胁迫依次为:2号氯盐融雪剂>1号新型生态环保融雪剂>3号环保融雪剂。2号融雪剂主要成分是NaCl,随 $\text{Na}^+$ 浓度上升的种子盐胁迫逐渐加大,高浓度10 g/L时 $\text{Na}^+$ 浓度超过种子耐受浓度,种子大量脱水,最终死亡;1号融雪剂主要成分是黄腐酸,低浓度时可促进种子发芽,高浓度时其发芽率也显著下降。

发芽指数表示种子萌发速度和田间出苗整齐度<sup>[10]</sup>。由图1可知,发芽指数变化趋势和发芽率基本一致,只是草种间略有差异,黑麦草发芽指数随融雪剂浓度升高降幅较大,早熟禾降幅较小。早熟禾在3种类型融雪剂处理下表现出较强抗胁迫能力。黑麦草在1号、3号处理下浓度10 g/L时发芽指数下降81%和63%,2号处理下降95%。这和2号融雪剂含较高浓度氯化钠的干旱胁迫有关<sup>[11]</sup>。

### 2.2 种子相对受害率和活力指数

种子相对受害率直接反映融雪剂胁迫下植物种子受害情况,据国家标准(GBT 23851—2017)《融雪剂》要求,种子相对受害率要 $\leq 50\%$ 。由图2可知,随着3种融雪剂浓度上升,种子相对受害率呈上升趋势,相同浓度下,种子相对受害率依次为2号>1号>3号。回归分析可知,种子相对受害率达到50%时,1号、2号、3号融雪剂对黑麦草影响浓度为:6.07、3.28和7.15 g/L,对白三叶影响浓度为:4.21、4.14和6.28 g/L,对早熟禾影响浓度为:

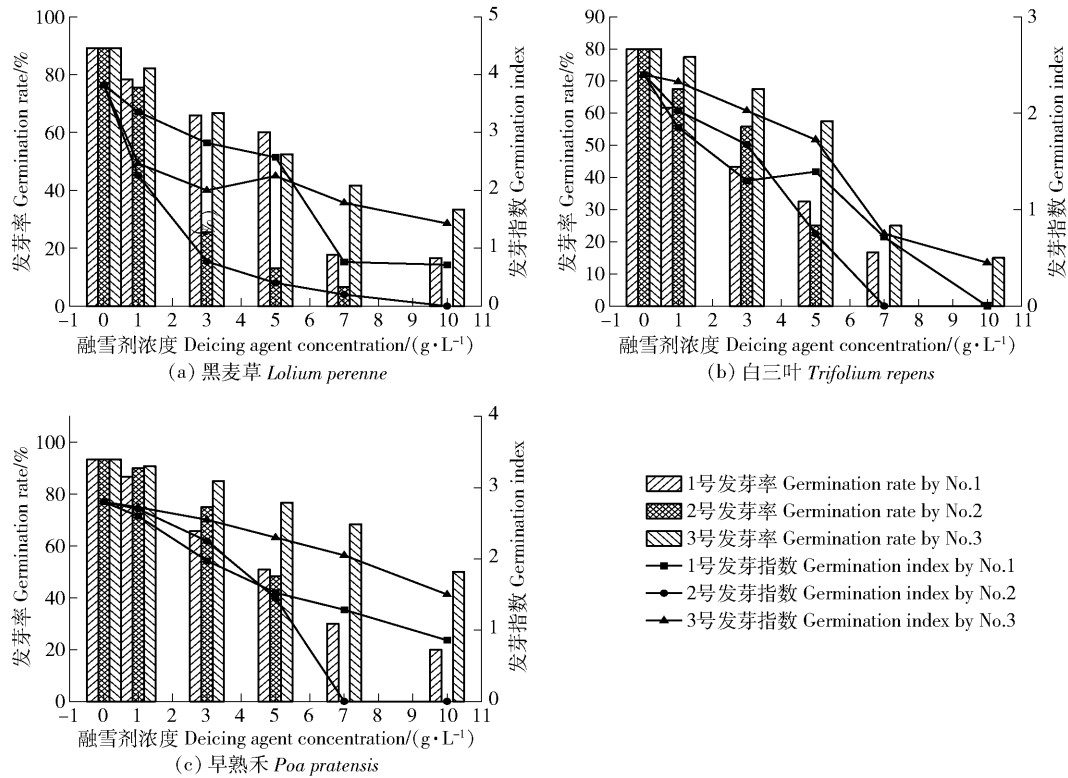


图1 不同融雪剂对(a)黑麦草、(b)白三叶、(c)早熟禾发芽率和发芽指数的影响

Fig.1 Effects of different deicing agents on (a) *Lolium perenne* cv. Green Emerald, (b) *Trifolium repens*, and (c) *Poa pratensis* germination rate and germination index

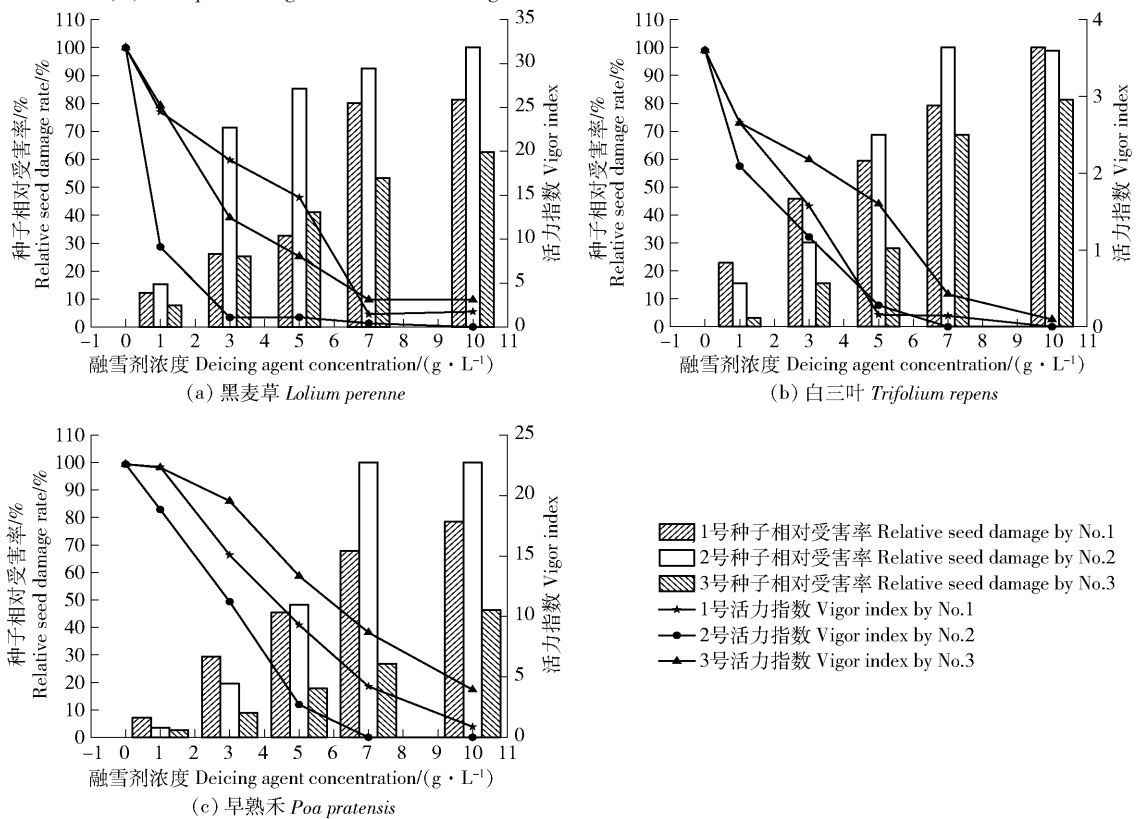


图2 不同融雪剂对(a)黑麦草、(b)白三叶、(c)早熟禾种子相对受害率和活力指数的影响

Fig.2 Effects of different deicing agents on (a) *Lolium perenne*, (b) *Trifolium repens*, and (c) *Poa pratensis* relative seed victimization rate and vigor index



5.76、4.74 和 11.54 g/L。比较而言,豆科植物白三叶对融雪剂浓度受害敏感,禾本科早熟禾和黑麦草相对耐受力较大。

种子活力指数可反应种子生长及生长整齐度<sup>[12]</sup>。由图2可知,随融雪剂浓度上升,种子活力指数呈降低趋势。在融雪剂浓度>5 g/L时,种子生长受到显著抑制,其中2号融雪剂对种子生长抑制最严重。

## 2.3 融雪剂对种子萌发相关性分析

不同融雪剂处理下草坪草种子萌发指标间相关分析表明(表2、表3和表4),融雪剂对3种草坪草种子的发芽指标影响基本一致。发芽率与发芽指数、活力指数和根长呈显著正相关( $P < 0.01$ ),与种子相对受害率呈显著负相关( $P < 0.01$ )。因此,种子相对受害率与发芽率、发芽指数、活力指数和根长间呈显著负相关( $P < 0.01$ )。

表2 1号融雪剂处理下种子萌发指标相关性

Tab.2 Correlation of seed germination indexes under No.1 deicing agent treatment

指标 Index	相关系数 Correlation coefficient				
	发芽率 Germination rate	发芽指数 Germination index	种子相对受害率 Relative seed damage rate	活力指数 Vitality index	根长 Root length
发芽率 Germination rate	1				
发芽指数 Germination index	0.935 **	1			
种子相对受害率 Relative seed damage rate	-0.993 **	-0.924 **	1		
活力指数 Vitality index	0.820 **	0.895 **	-0.763 **	1	
根长 Root length	0.830 **	0.921 **	-0.787 **	0.971 **	1

注: \*\* . 在 0.01 水平(双侧)上显著相关。下同。Notes: There was significant correlation at the level of 0.01 (bilateral). The same below.

表3 2号融雪剂处理下种子萌发指标相关性

Tab.3 Correlation of seed germination indexes under No.2 deicing agent treatment

指标 Index	相关系数 Correlation coefficient				
	发芽率 Germination rate	发芽指数 Germination index	种子相对受害率 Relative seed damage rate	活力指数 Vitality index	根长 Root length
发芽率 Germination rate	1				
发芽指数 Germination index	0.978 **	1			
种子相对受害率 Relative seed damage rate	-0.995 **	-0.972 **	1		
活力指数 Vitality index	0.759 **	0.840 **	-0.715 **	1	
根长 Root length	0.747 **	0.817 **	-0.714 **	0.878 **	1

表4 3号融雪剂处理下种子萌发指标相关性

Tab.4 Correlation of seed germination indexes under No.3 deicing agent treatment

指标 Index	相关系数 Correlation coefficient				
	发芽率 Germination rate	发芽指数 Germination index	种子相对受害率 Relative seed damage rate	活力指数 Vitality index	根长 Root length
发芽率 Germination rate	1				
发芽指数 Germination index	0.905 **	1			
种子相对受害率 Relative seed damage rate	-0.982 **	-0.880 **	1		
活力指数 Vitality index	0.739 **	0.804 **	-0.640 **	1	
根长 Root length	0.749 **	0.814 **	-0.686 **	0.959 **	1

### 3 讨论与结论

本研究结果表明,不同类型融雪剂对草坪草种子萌发存在低促高抑现象,3 种草坪草种子萌发 50% 抑制的临界值表现为:2 号氯盐融雪剂 > 1 号生态融雪剂 > 3 号混合型融雪剂;随着融雪剂浓度加大,草坪草种子萌发抑制增强。这与严霞<sup>[13]</sup>、刘涛<sup>[14]</sup>和 BIAN W 等<sup>[15]</sup>研究结果一致。2 号氯盐融雪剂对植物种子萌发抑制作用较为显著,这与何访淋对高羊茅幼苗光合作用<sup>[16]</sup>、何佳果对小丽花<sup>[17]</sup>、查湘义对绿豆<sup>[18]</sup>和张营对早熟禾、黑麦草和白三叶<sup>[20]</sup>研究结果基本一致。氯盐融雪剂对种子萌发危害主要是其含钠离子对种子的盐胁迫,盐胁迫的植物适应方式有渗透调节等<sup>[19-20]</sup>。1 号生态环保融雪剂主要成分是黄腐酸和部分氯化钙,黄腐酸是一种结构负载的混合物,可以络合有害离子对植物细胞的伤害,保护细胞膜,且在一定浓度内可促进种子的细胞分裂和伸长,促进植物生长;同时,在适度逆境下黄腐酸可促进植物抗氧化酶活性增加和调节渗透作用<sup>[21]</sup>。因此低浓度黄腐酸可缓解氯盐对种子萌发的盐胁迫,但高浓度黄腐酸会减弱甚至抑制抗氧化酶的酶活性<sup>[22]</sup>,增加融雪剂对种子萌发的抑制影响。3 号混合型融雪剂主要元素是氯、氧和镁,  $\text{Ca}^{2+}$  含量极少,对种子的萌发盐胁迫较小,低浓度  $\text{Mg}^{2+}$  能在一定程度上促进种子萌发<sup>[23]</sup>。因此 3 号混合型融雪剂对种子萌发率影响最低,但对禾本科黑麦草和早熟禾的种子根系活力应影响较大。

本研究得出以下结论:

1) 不同融雪剂对草坪草种子萌发表现为低促高抑效应。早熟禾、黑麦草和白三叶草 3 种草坪草种子萌发 50% 抑制的融雪剂临界值,以及相对受害率均表现为 2 号氯盐融雪剂 > 1 号生态环保融雪剂 > 3 号混合融雪剂。低浓度下 1 号生态环保型融雪剂对黑麦草、早熟禾种子发芽时根系抑制作用最小,融雪剂浓度 > 5 g/L 时,3 种草坪草种子根长生长均显著下降。

2) 植物种子发芽对不同融雪剂的耐受性表现禾本科好于豆科,3 种草坪草种子表现为早熟禾 > 黑麦草 > 白三叶草。

3) 本研究只是开展生态融雪剂等不同融雪剂对草坪草种子萌发影响进行探索,按照标准要求,结合钢板腐蚀和土壤环境<sup>[24]</sup>,研究 1 号生态环保融雪剂对种子萌发影响及融雪剂环保性和经济性,建议

市场推广应用。

### 4 参考文献

- [1] 杨莹. 融雪剂类型分析及对环境问题的探讨[J]. 山西化工, 2021. 194(4): 260.  
YANG Ying. Type analysis of snow melting agent and its impact on environment [J]. Shanxi Chemical Industry, 2021, 194(4): 260.
- [2] 李雪. 氯盐类融雪剂对城区排污口水质及农作物种子发芽的影响[D]. 吉林大学, 2011: 10.  
LI Xue. Effects of chloride snow melting agents on water quality at urban sewage outlets and crop-seed germination [D]. Jilin University, 2011: 10.
- [3] 茹豪, 张建军, 徐佳佳, 等. 融雪剂胁迫对月季光合特性的影响[J]. 东北林业大学学报, 2012, 40(7): 51.  
RU Hao, ZHANG Jianjun, XU Jiajia, et al. Effects of deicing salt stress on photosynthetic characteristics of *Rosa chinensis* [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2012, 40(7): 51.
- [4] 李周园, 周骏辉, 刘一, 等. 氯盐融雪剂对大叶黄杨植物形态与生理的影响[J]. 北方园艺, 2011(10): 63.  
LI Zhouyuan, ZHOU Junhui, LIU Yi, et al. Effects of chloride snow melting agent on plant morphology and physiology of *Euonymus japonicus* [J]. Horticulture in North China, 2011(10): 63.
- [5] 朱辉. 黄腐酸类物质化学组成分析及其对小麦种子萌发的影响[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2015: 10.  
ZHU Hui. Chemical composition analysis of fulvic acids and their effects on wheat seed germination [D]. Kunming: Kunming University of Technology, 2015: 10.
- [6] 高同国, 袁红莉, 荣小焕, 等. 盐胁迫下黄腐酸对大豆种子萌发及抗氧化酶活性的影响[J]. 腐植酸, 2016(3): 22.  
GAO Tongguo, YUAN Hongli, RONG Xiaohuan, et al. Effects of fulvic acid on soybean germination and antioxidant enzymes activities under salt stress [J]. Humic Acid, 2016(3): 22.
- [7] 张元, 冯琼, 杨小方, 等. 黄腐酸对盐胁迫下红花种子萌发及幼苗生理特性的影响[J]. 腐植酸, 2016(2): 40.  
ZHANG Yuan, FENG Qiong, YANG Xiaofang, et al. Effects of fulvic acid on seed germination and seedling

- physiological characteristics of safflower under salt stress [J]. *Humic Acid*, 2016(2): 40.
- [8] 杨冬, 周广柱. 氯盐融雪剂对4种地被植物种子萌发的影响[J]. *中国园艺文摘*, 2015, 31(4): 7.  
YANG Dong, ZHOU Guangzhu. Effects of chloride snow melting agent on seed germination of four ground cover plants [J]. *Chinese Horticultural Abstracts*, 2015, 31(4): 7.
- [9] 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.  
YAN Chengzhu, ZHU Hong, JIN Xiaoxia, et al. Effect of deicing salt on seed germination of four main northern turfgrass species[J]. *Grassland Journal*, 2017, 25(2): 437.
- [10] 刘彦清, 董宽虎, 王奇丽, 等. 不同盐分胁迫对高冰草种子发芽的影响[J]. *草原与草坪*, 2007(2): 18.  
LIU Yanqing, DONG Kuanhu, WANG Qili, et al. Effect of salt stress on seed germination of tall wheat grass[J]. *Grassland and Turf*, 2007(2): 18.
- [11] 徐曼. 不同盐胁迫对长穗偃麦草种子萌发及幼苗生长的影响[J]. *中国草地学报*, 2020, 42(1): 15.  
XU Man. Effects of different salt stress on seed germination and seedling growth of *elytrigia elongate*[J]. *Chinese Grassland Journal*, 2020, 42(1): 15.
- [12] 张利霞, 常青山, 侯小改, 等. 不同钠盐胁迫对夏枯草种子萌发特性的影响[J]. *草业学报*, 2015, 24(3): 177.  
ZHANG Lixia, CHANG Qingshan, HOU Xiaogai, et al. Effects of sodium salt stress on seed germination of *Prunella vulgaris*[J]. *Journal of Grassland Industry*, 2015, 24(3): 177.
- [13] 严霞, 李法云, 刘桐武, 等. 化学融雪剂对小麦和玉米种子发芽的影响[J]. *气象与环境学报*, 2007(4): 62.  
YAN Xia, LI Fayun, LIU Tongwu, et al. Effects of chemical deicers on the germination of wheat and maize seeds[J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2007(4): 62.
- [14] 刘涛, 陈宗伟, 王伟, 等. 不同融雪剂对黑麦草生长的影响[J]. *环境科学与技术*, 2015, 38(S1): 10.  
LIU Tao, CHEN Zongwei, WANG Wei, et al. Effects of deicers on *Lolium multiflorum* growth[J]. *Environmental Science and Technology*, 2015, 38(S1): 10.
- [15] 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]. *GRASSLAND SCIENCE*, 2019: 8.
- [16] 何访淋, 包国章, 陈薇薇, 等. 醋酸钙镁盐环保融雪剂及冻融胁迫对高羊茅幼苗的生理影响[J]. *江苏农业科学*, 2019, 47(5): 125.  
HE Fanglin, BAO Guozhang, CHEN Weiwei, et al. Physiological characteristics of *Festuca elata* seedlings in response to environment-friendly calcium magnesium acetate (CMA) deicing salt and freezing-thawing stress[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2019, 47(5): 125.
- [17] 何佳果, 卢姝伶, 田鑫, 等. 融雪剂对5种菊科花卉种苗生长发育的影响[J]. *黑龙江农业科学*, 2016(6): 46.  
HE Jiaguo, LU Shulian, TIAN Xin, et al. Effect of deicing salts on seedling growth of five kinds of Asteraceae [J]. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2016(6): 46.
- [18] 查湘义. CMA融雪剂对绿豆种子发芽影响测试研究[J]. *湖北民族学院学报:自然科学版*, 2013, 31(4): 390.  
CHA Xiangyi. Study on effects of CMA deicer on mung bean seeds germination[J]. *Journal of Hubei University for Nationalities: Natural Science Edition*, 2013, 31(4): 390.
- [19] 郑安俭, 王州飞, 张红生. 作物种子萌发生理与遗传研究进展[J]. *江苏农业学报*, 2017, 33(1): 218.  
ZHENG Anjian, WANG Zhoufei, ZHANG Hongsheng. Advances in research on physiological and genetic mechanism of seed germination[J]. *Jiangsu Agricultural Journal*, 2017, 33(1): 218.
- [20] 张营, 李法云, 荣湘民, 等. 融雪剂对3种冷季型草坪草种子萌发和幼苗生长的影响[J]. *湖南农业大学学报:自然科学版*, 2012, 38(5): 491.  
ZHANG Ying, LI Fayun, RONG Xiangmin, et al. Effect of deicing salts on seed germination and growth of three cool-season turfgrass species[J]. *Journal of Hunan Agricultural University: Natural Science Edition*, 2012, 38(5): 491.
- [21] 高同国, 袁红莉, 荣小焕, 等. 盐胁迫下黄腐酸对大豆种子萌发及抗氧化酶活性的影响[J]. *腐植酸*, 2016(3): 22.  
GAO Tongguo, YUAN Hongli, RONG Xiaohuan, et al. Effects of fulvic acid on soybean germination and antioxi-

- dant enzymes activities under salt stress [J]. Humic Acid, 2016(3): 22.
- [22] 栾白, 高同国, 姜峰, 等. 微生物降解褐煤产生的黄腐酸对大豆种子萌发及主要抗氧化酶活性的影响[J]. 大豆科学, 2010, 29(4): 607.
- LUAN Bai, GAO Tongguo, JIANG Feng, et al. Effects of fulvic acid produced by microbial degradation of lignite on soybean seed germination and main antioxidant enzyme activities[J]. Soybean Science, 2010, 29(4): 607.
- [23] 王凌, 李彦, 尹林克, 等. 燃煤烟气脱硫镁渣对沙冬青种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 干旱区研究, 2011, 28(6): 1031.
- WANG Ling, LI Yan, YIN Linke, et al. Effects of desulfurization magnesium slag from flue gas on seed germination and seedling growth of *Ammopiptanthus mongolicus* [J]. Study on Arid Area, 2011, 28(6): 1031.
- [24] 李根, 黄占斌, 杨凤至, 等. 融雪剂施用对道路环境影响的研究[J]. 绿色科技, 2020, 14: 169.
- LI Gen, HUANG Zhanbin, YANG Fengzhi, et al. Study on the road environmental effect of snowmelt agent application[J]. Green Science and Technology, 2020, 14: 169.