

李兆冉, 盛彦清. 无氯型环保融雪剂对种子发芽及植株生长的影响[J]. 环境科学与技术, 2021, 44(3): 150-156. Li Zhaoran, Sheng Yanqing. Effects of non-chlorine environmental-friendly snow-melting agents on seed germination and plant growth[J]. Environmental Science & Technology, 2021, 44(3): 150-156.

无氯型环保融雪剂对种子发芽及植株生长的影响

李兆冉^{1,2}, 盛彦清^{1*}

(1. 中国科学院烟台海岸带研究所山东省海岸带环境工程技术研究中心, 山东 烟台 264003;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:为探究无氯型融雪剂对植物生长的潜在影响, 该文以小麦和早熟禾种子及1年生冬青幼苗为对象, 通过比较新型融雪剂(XH-1、XH-2)和传统氯盐融雪剂(CT)在不同浓度条件下, 种子发芽率和叶片丙二醛、叶绿素、叶绿素荧光参数(F_v/F_m)等变化特征, 评估了无氯型环保融雪剂对植物抗逆性能的潜在影响。结果表明: 3种融雪剂均对种子萌发产生一定影响, CT、XH-1、XH-2处理后的种子发芽率依次升高, 种子发芽率与融雪剂浓度呈显著负相关; 实验进行20 d时, CT(所有剂量)、XH-1(所有剂量)以及较高浓度的XH-2(15、25和35 g/L)胁迫的冬青生长受到不同程度的抑制(抑制程度CT>XH-1>XH-2), 叶片中丙二醛增加, 但叶绿素及 F_v/F_m 降低, 而低浓度(5 g/L)的XH-2胁迫的冬青生理指标则呈相反变化, 表明其对冬青生长有促进作用。

关键词:无氯型融雪剂; 发芽率; 丙二醛; 叶绿素; F_v/F_m

中图分类号: X503.23; S688.4 文献标志码: A doi: 10.19672/j.cnki.1003-6504.2021.03.020 文章编号: 1003-6504(2021)03-0150-07

Effects of Non-chlorine Environmental-friendly Snow-melting Agents on Seed Germination and Plant Growth

LI Zhaoran^{1,2}, SHENG Yanqing^{1*}

(1. Research Center for Coastal Environment Engineering Technology of Shandong Province, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to explore the potential impact of non-chlorine snow-melting agents on plant growth, wheat seeds, Kentucky bluegrass seeds and 1-year-old holly seedlings were taken as the research objects. By comparing the characteristics of seeds germination rate, malondialdehyde, chlorophyll and chlorophyll fluorescence parameter F_v/F_m of new snow-melting agents (XH-1, XH-2) and traditional chlorine salt snow-melting agent (CT) at different concentrations, the potential effect of non-chlorine environmental-friendly snow-melting agents on plants stress resistance were evaluated. The results showed that the seeds germination were affected by three kinds of snow-melting agents, and the order of influence in descending order was CT, XH-1, XH-2. The germination rate of seeds treated with CT, XH-1 and XH-2 increased in turn, and there was a significant negative correlation between the seeds germination percentage and the concentration of snow-melting agents. After 20 days of experiment, the growth of holly seedlings under the stress of CT (all doses), XH-1 (all doses) and higher concentrations (15, 25 and 35 g/L) of XH-2 were inhibited to varying degrees (inhibition degree CT>XH-1>XH-2). The malondialdehyde content in the leaves increased, the chlorophyll content and F_v/F_m decreased. However, physiological indexes of holly seedlings under low concentration (5 g/L) XH-2 stress changed on the contrary, and the growth were promoted.

Key words: non-chlorine snow-melting agents; germination percentage; malondialdehyde; chlorophyll; F_v/F_m

冬季降雪在净化空气、补给水源的同时, 也给人们的生产、生活带来诸多不便, 覆雪后的路面摩擦系数显著减小, 极易引发交通事故。相关研究表明, 雪天事故发生率是非雪天的13倍^[1]。及时有效地清除

道路积雪, 对于保证交通的畅通和人们的出行安全至关重要。融雪剂因具有操作简便、融雪效果好等优点, 已被广泛应用于道路积雪的清除。

融雪剂根据其化学组成, 可分为氯盐类、非氯盐

《环境科学与技术》编辑部: (网址) <http://jks.chinajournal.net.cn> (电话) 027-87643502 (电子信箱) hjkxyjs@vip.126.com

收稿日期: 2021-01-16; 修回日期: 2021-02-22

基金项目: 烟台市重点研发计划(2018ZHGY083)

作者简介: 李兆冉(1988-), 男, 工程师, 硕士, 研究方向为新型融雪剂研发, (电子信箱) zrli@yic.ac.cn; *通讯作者, (电子信箱) yqsheng@yic.ac.cn。

类、混合类3种。由于价格等因素的影响,氯盐类及混合类融雪剂的使用更为普遍。然而,含氯融雪剂的大量使用会引发土壤板结^[2]、水体污染^[3,4]、植被死亡^[5]等一系列生态环境问题,同时也会对人体健康造成危害^[6]。虽然非氯盐类融雪剂环境危害较小,但其价格昂贵,且融雪能力不及含氯融雪剂,限制了其大规模使用。为解决上述问题,研究人员主要开展了两方面的工作:一是对氯盐类融雪剂进行优化改进,包括添加缓蚀剂^[7],降低氯含量^[8,9]等,在保证融雪剂高效融雪能力的前提下降低其环境危害;二是研发低成本非氯型融雪剂,如改进醋酸钙镁盐类生成工艺^[10,11],研发其他有机复合融雪剂^[12,13]等。但基于氯盐融雪剂的改进技术只能在一定程度上降低环境危害,并不能消除。此外,非氯融雪剂大多存在制备过程复杂、原料成分较多、不适合大规模生产、成本较高等问题。因此,研发高效、环保、廉价的融雪剂具有重要的现实意义。为研究研制的新型融雪剂的环保性能,本文以北方最常见的小麦种子、早熟禾种子、冬青幼苗为试验材料,比较XH-1、XH-2和CT对种子发芽率及植物生长的影响,以筛选出环境友好型融雪剂,并为融雪剂的规范使用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验所使用的融雪剂,分别为自行研制的新型融雪剂XH-1(主成分为甲酸钠、乙酸钠等,专利产品)、新型融雪剂XH-2(主成分为甲酸钠、乙酸钠、黄腐酸钾等,专利产品)以及传统融雪剂CT(主成分为氯化钠)。供试小麦种子选用当地大面积种植品种(烟农19),早熟禾(道路沿线绿化带常用植被)种子选用抗寒、抗病、易管理品种(优异),冬青(双向道路中间隔离带常用植株)幼苗选择1年生的幼苗(法国冬青,平均苗高65 cm)。

1.2 试验方法

将试验种子先用10%的双氧水及自来水分别浸泡,然后每个品种选取100粒籽粒均匀、饱满的种子,将其均匀平铺在垫有定性滤纸和脱脂棉的发芽盒内,再用质量浓度分别为5、15、25、35 g/L的融雪剂湿润种子、定性滤纸和脱脂棉,以蒸馏水作为对照,置于(25±1)℃的恒温培养箱中培养。每个试验重复3次,记录种子发芽数量(幼芽达到种子一半长度视为发芽完成)。选取长势类似、生长良好的冬青幼苗,于人工气候室中培养,每天光照12 h,昼夜温度分别为25/15℃,相对湿度控制在70%左右,分别以质量浓度为5、15、25、35 g/L的XH-1、XH-2、CT融雪剂溶液进

行浇灌,同时以自来水做空白,每隔2 d等量浇灌1次,保持培植土层表层润湿(均质化培土,实验过程无肥料添加),未浇灌融雪剂之前采集1次样本,此后每5 d采集1次,持续20 d,测定相关的生理指标。

1.3 生理指标测定

叶绿素 a 、 b 的测定按照《植物生理学实验技术》^[14]中乙醇提取法进行。对于叶片丙二醛的测定,取叶片组织块0.2 g左右,在冰冷的磷酸盐缓冲液中漂洗,滤纸擦干并准确称重后,放入匀浆管。然后向匀浆管中加入匀浆介质(重量体积比1:4的磷酸盐缓冲液,pH为7.4),在冰水浴条件下,用眼科小剪剪碎组织块,采用手工匀浆的方式制成20%的匀浆液。然后离心,取上清液,采用试剂盒测定丙二醛。实验过程中,植物的光合作用以基础型调制荧光仪(Junior-PAM,德国WALZ)测定的 F_v/F_m 进行表征。

1.4 数据处理

试验数据采用Origin 9.0软件制作相关图件,采用SPSS统计分析软件进行分析。其中,在分析种子发芽率与融雪剂浓度之间的关系时采用相关分析(相关系数计算采用了Pearson简单相关系数);在研究种子萌发对融雪剂的耐受范围时采用线性回归分析(线性回归方程的显著性检验采用了相关系数检验法)。

2 结果与讨论

2.1 不同融雪剂对种子发芽率的影响

不同浓度、种类的融雪剂均对种子发芽存在一定影响(图1),不同种子对融雪剂胁迫呈现不同的响应程度。经融雪剂处理后,种子的萌发几乎都受到不同程度的抑制效应,且抑制程度随融雪剂浓度的升高而增大,这与研究氯盐类融雪剂对草坪种子(早熟禾、黑麦草、白三叶、紫花苜蓿)^[15,16]以及小麦和玉米种子萌发^[17]的影响得出的结论相一致。经XH-1、XH-2和CT处理后,小麦种子的平均发芽率分别为93.75%、97.75%和55.50%,早熟禾种子的平均发芽率分别为44.00%、53.13%和25.00%。融雪剂抑制种子发芽,可能是由于融雪剂引起种子吸水困难,造成种子生理干旱,抑制了种子的萌发^[18]。在本研究中,不同融雪剂浓度和种子发芽率的线性拟合表明,种子发芽率与融雪剂浓度呈显著相关($p<0.05$)或极显著相关($p<0.01$)。

为进一步认识种子萌发对融雪剂的耐受范围,本研究参照前人方法,将种子在发芽率分别为75%、50%和25%时所对应的融雪剂浓度设定为种子萌发的适宜值、临界值和极限值^[19]。小麦和早熟禾种子萌发的适宜值、临界值及极限值可由发芽率与融雪剂浓度之

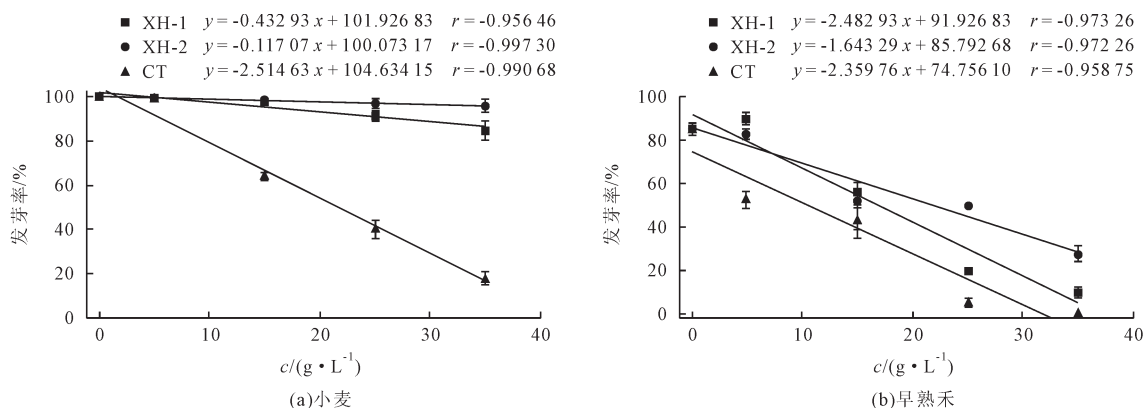


图1 不同融雪剂处理后种子的发芽率变化
Fig.1 Changes of germination rate of seeds treated with different snow-melting agents

间的线性回归方程计算得出(表1)。由表1可知,对于所有融雪剂,小麦种子萌发的适宜值、临界值及极限值均远高于早熟禾种子,表明小麦种子对融雪剂处理的耐受能力更强。CT处理后种子萌发的适宜值、临界值及极限值均最小,表明CT对种子萌发的抑制

作用最强,其次是XH-1,XH-2抑制作用最弱。这主要与融雪剂组分有关,CT融雪剂中高浓度的 Cl^- 、 Na^+ 等在种子萌发期限限制了种子的生理吸水,破坏了细胞膜,使膜透性增大导致溶质外渗,从而使得种子萌发严重受阻^[17]。

表1 不同融雪剂浓度和发芽率的回归分析

Table 1 Regression analysis of different snow-melting agents concentration and germination rate

种子	融雪剂	回归方程	相关系数	适宜值/($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	临界值/($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	极限值/($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)
小麦	XH-1	$y=-0.432\ 93x+101.926\ 83$	$r=-0.956\ 46$	62.20	119.94	177.69
	XH-2	$y=-0.117\ 07x+100.073\ 17$	$r=-0.997\ 30$	214.17	427.72	641.27
	CT	$y=-2.514\ 63x+104.634\ 15$	$r=-0.990\ 68$	11.78	21.73	31.67
早熟禾	XH-1	$y=-2.482\ 93x+91.926\ 83$	$r=-0.973\ 26$	6.82	16.89	26.95
	XH-2	$y=-1.643\ 29x+85.792\ 68$	$r=-0.972\ 26$	6.57	21.78	36.99
	CT	$y=-2.359\ 76x+74.756\ 10$	$r=-0.958\ 75$	0	10.49	21.09

2.2 不同融雪剂对冬青丙二醛含量的影响

丙二醛是膜脂过氧化作用的分解产物,其含量可以反映细胞膜脂过氧化作用强弱及植物受胁迫程度。其含量越高,说明组织保护能力越弱,植物受害越重^[20,21]。不同融雪剂胁迫下冬青丙二醛的含量变化见图2。由图2可知,在融雪剂胁迫下,冬青丙二醛的含量随着胁迫天数的延长基本呈上升趋势,表明冬青组织的保护能力减弱,膜系统的受损伤程度增大^[21,22]。低浓度胁迫(5和15 g/L)与高浓度胁迫(25和35 g/L)相比,丙二醛增幅明显较小。这是因为浓度较低时,冬青叶片内保护酶的活性高,可将体内大部分的氧自由基消除,丙二醛积累相对较少。但随着浓度的增高,融雪剂胁迫的损害超过了叶片内保护酶的调节能力,体内的过氧化物酶、过氧化氢酶及超氧化物歧化酶的活性不能维持较高水平,导致膜质过氧化过程加快,从而造成丙二醛显著增长^[21,23]。

不同融雪剂对冬青叶片丙二醛的含量呈现不同程度影响态势。当胁迫实验进行到第20天时,XH-1、XH-2和CT处理的冬青叶片中丙二醛含量平均增幅分别为18.97%、9.24%和96.23%,表明新型融雪剂(尤

其是XH-2)对冬青膜系统影响较小,而CT对冬青膜系统破坏明显。其原因可能是由于新型融雪剂中不含 Cl^- 、 Na^+ 的含量也远低于CT,而 Na^+ 和 Cl^- 会通过离子毒害、渗透胁迫等方式抑制植物生长^[24,25]。此外,XH-2中含有 K^+ ,有助于维持液泡和胞质内 K^+ 的浓度,提高其渗透调节能力,缓解 Na^+ 对植物的毒害作用^[26,27]。同时,黄腐酸钾中还含有微量元素、稀土元素等多种营养成分,亦可促进植物生长^[28],基于潜在的拮抗作用使其抗逆性提升。因此,XH-2、XH-1和CT对冬青的损害依次增强,这与实验过程中观察到的新型融雪剂处理的冬青长势(叶片厚实且具光泽),远优于CT处理的冬青(有些叶子脱落严重甚至濒临死亡)的现象相一致。

2.3 不同融雪剂对冬青叶绿素含量的影响

冬青叶绿素含量(指叶绿素a+叶绿素b)在不同融雪剂胁迫下的变化见图3。由图3可知,不同融雪剂种类、浓度胁迫下,叶片中叶绿素含量的变化存在显著差异。对于XH-1(所有剂量),较高浓度(15、25和35 g/L)的XH-2以及低浓度(5 g/L)的CT,随着胁迫天数的增加,叶片中叶绿素含量均呈先增加后下降趋势。

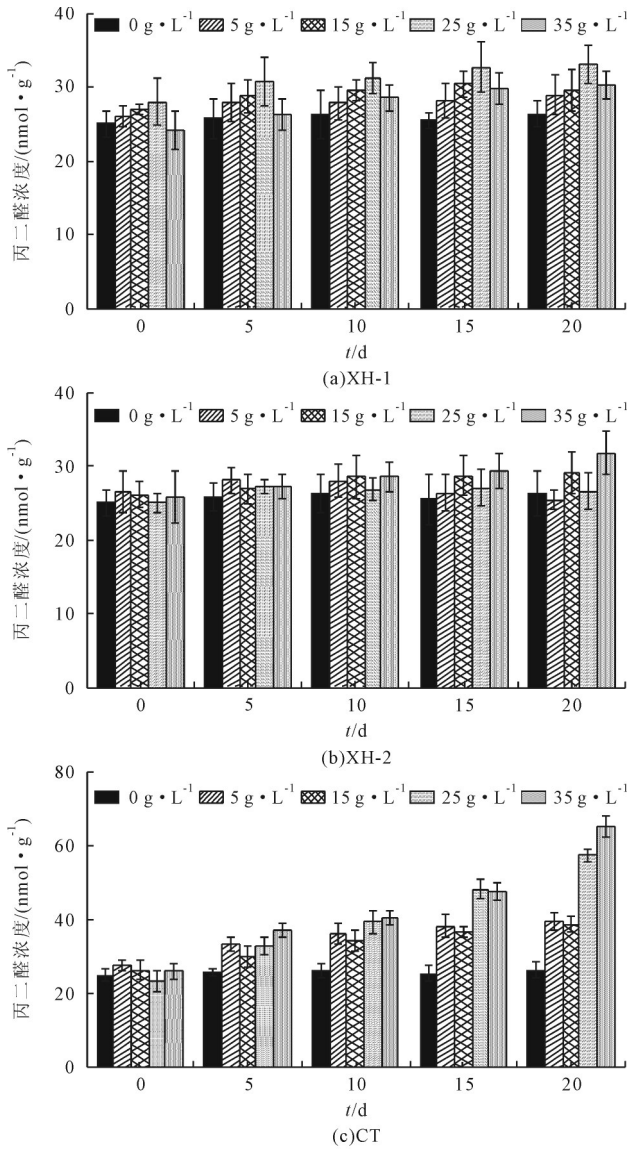


图2 不同融雪剂对冬青丙二醛含量的影响
Fig.2 Effect of different snow-melting agents on malondialdehyde content of holly

但受CT胁迫的冬青,叶绿素的下降幅度远高于新型融雪剂。这表明冬青可以忍受这些融雪剂在短时间内的胁迫,但随着时间的延长,融雪剂(特别是CT)对冬青的危害逐渐加深,叶片细胞受到严重的离子毒害和渗透胁迫,使得冬青光合速率下降,生长受到抑制。而对于低浓度(5 g/L)的XH-2,随着胁迫天数的增加,叶片中叶绿素含量一直呈现上升趋势。对于较高浓度(15、25和35 g/L)的CT,随着胁迫天数的增加,叶片中叶绿素含量呈下降趋势。实验进行20 d时,除低浓度(5 g/L)的XH-2,融雪剂的胁迫均导致叶片叶绿素的含量出现不同程度的降低,其中XH-1、XH-2及CT降低幅度分别为3.53%~17.17%、1.21%~12.34%、17.14%~41.97%。这主要是由于盐胁迫造成植物体内的叶绿素合成受抑制,叶绿素酶活性增加,叶绿素降解加快,进而导致叶绿素含量降低^[22, 29, 30]。

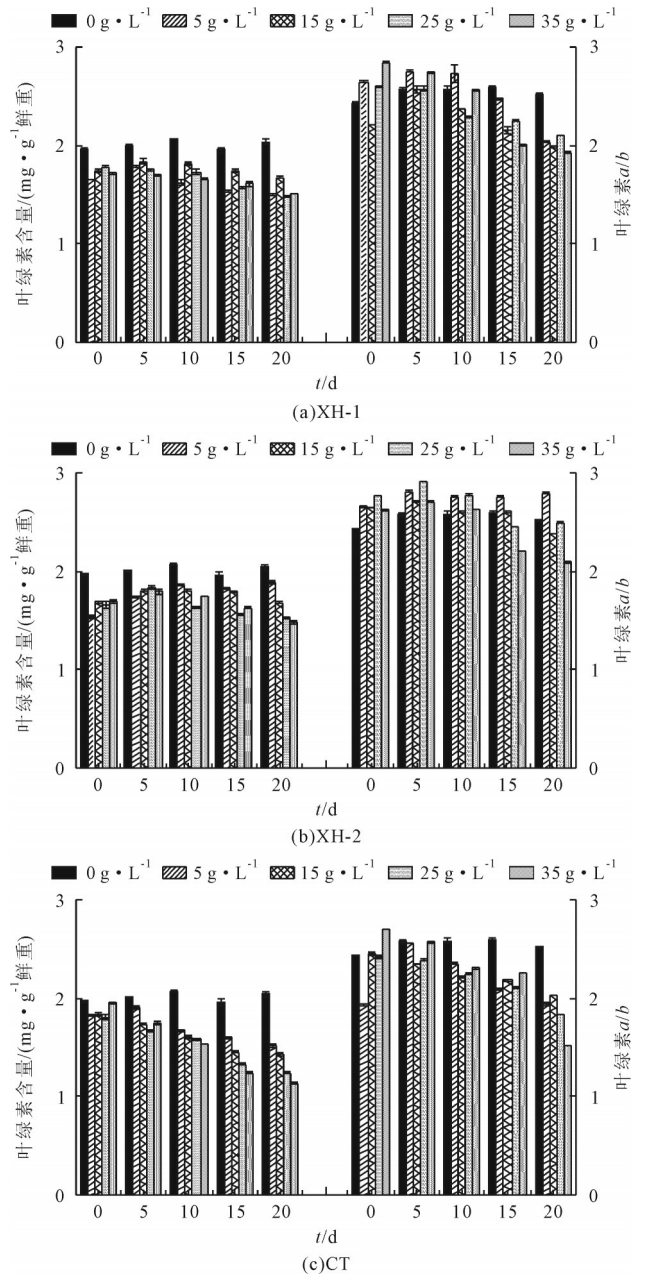


图3 不同融雪剂对冬青叶绿素含量的影响
Fig.3 Effect of different snow-melting agents on chlorophyll content of holly

由图3可知,叶绿素 a/b 随着融雪剂浓度的增加,呈现先增加后减少的趋势,这和尹宝丝的研究结果相似^[20]。由于叶绿素 a 有一部分是参与光反应的中心色素,相比于叶绿素 b ,叶绿素 a 对光合作用更为重要,叶绿素 a/b 的增加可能是冬青对融雪剂胁迫的一种适应^[31]。而叶绿素 a/b 的降低,则可能是由于叶绿素 a 的下降幅度大于叶绿素 b ,表明融雪剂胁迫对冬青叶绿素 b 的影响较小,这与盐胁迫对沙棘幼苗光合生理特征得出的结论相一致^[32]。不同融雪剂胁迫下冬青叶绿素含量的变化表明,新型融雪剂对冬青的生长抑制较弱,在低浓度下甚至促进冬青的生长,而CT对冬青的伤害明显,这与实验过程中丙二醛的含量变化及观察到的冬青生长状况相一致。

2.4 不同融雪剂对冬青叶片叶绿素荧光参数 F_v/F_m 特性的影响

叶绿素荧光由光系统II(PS II)反应中心产生,对环境因子变化响应灵敏,因此可通过叶绿素荧光参数的变化,研究环境对植物光合作用的影响^[33]。叶绿素荧光参数(F_v/F_m ,表示PS II最大光化学效率)反映植物光抑制的程度,是衡量植物受到环境胁迫程度的重要指标^[34,35]。在本研究中,不同融雪剂胁迫下冬青叶片叶绿素荧光参数 F_v/F_m 的变化见图4。

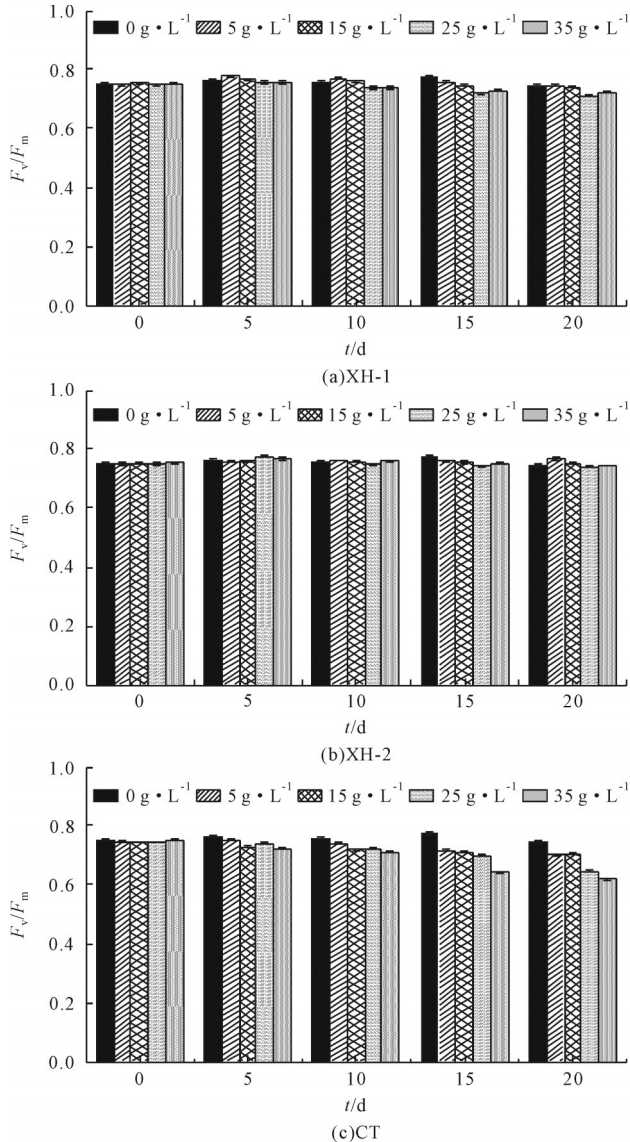


图4 不同融雪剂对冬青叶片叶绿素荧光参数 F_v/F_m 的影响
Fig.4 Effect of different snow-melting agents on chlorophyll fluorescence parameters F_v/F_m of holly

由图4可知,随着胁迫天数的增加,XH-1、较高浓度(15、25和35 g/L)的XH-2以及低浓度(5 g/L)的CT处理后的冬青叶片, F_v/F_m 均先升高后降低,但降低幅度不同,其中受XH-2胁迫的降低幅度最小(几乎没有变化),而受CT胁迫的降低幅度最大。低浓度(5 g/L)XH-2处理后的冬青, F_v/F_m 呈升高趋势,较高浓度(15、25和35 g/L)的CT处理后的冬青, F_v/F_m 呈

降低趋势。总体而言, F_v/F_m 的降低,可能是由于冬青受到融雪剂胁迫后慢相弛豫猝灭过程的发生及PS II反应中心光化学能力的部分减弱^[36],使得光合作用原初反应过程受到抑制,进而导致光合作用效率降低。冬青叶片 F_v/F_m 变化趋势表明,冬青受CT胁迫程度最为严重,受XH-2的胁迫程度最小,低浓度的XH-2甚至促进冬青的生长。这与通过丙二醛、叶绿素含量数据得出的结论相一致,也与实验过程中观察到的冬青生长状况相吻合。

3 结论

通过对比XH-1、XH-2和CT胁迫对种子发芽及植物生长影响的研究发现,小麦种子发芽率受融雪剂胁迫影响较小,3种融雪剂对种子抑制作用的强弱依次为CT>XH-1>XH-2,经融雪剂处理后的种子发芽率均随融雪剂浓度的增大而减小,两者呈显著负相关。随着实验天数推进,CT、XH-1以及较高浓度(15、25和35 g/L)的XH-2胁迫的冬青,叶片中丙二醛含量增加,叶绿素含量降低,叶绿素荧光参数(F_v/F_m)降低。而低浓度(5 g/L)的XH-2胁迫的冬青,叶片中丙二醛含量降低,叶绿素含量增加,叶绿素荧光参数(F_v/F_m)增加。低浓度(5 g/L)的XH-2对冬青生长具有促进作用,而CT、XH-1以及较高浓度的XH-2均在不同程度上抑制冬青的生长,且抑制强度大小依次为CT>XH-1>XH-2。综上可知,新型环保融雪剂对种子发芽率及植物生长抑制较小(尤其是XH-2低浓度时可促进植物生长),与CT相比环保性能优异。本研究可为冬季融雪提供更多的选择和科学依据,有助于解决冬季融雪与环境保护之间的矛盾。

【参考文献】

- [1] 王东,赵富强,田中男,等. 环保型路用融雪剂制备及其功效研究[J]. 重庆交通大学学报:自然科学版, 2020,39(6):92-98.
Wang Dong, Zhao Fuqiang, Tian Zhongnan, et al. Preparation and effect of an environment-friendly snow-melting agent[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science Edition, 2020,39(6):92-98.
- [2] 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.
- [3] Rangakrishna D M, Vitharaghavan T. Environmental impact of chemical deicers- a review[J]. Water Air and Soil Pollution, 2005,166(1/2/3/4):49-63.

- [4] Godwin K S, Hafner S D, Buff M F. Long-term trends in sodium and chloride in the Mohawk River, New York: the effect of fifty years of road-salt application[J]. Environmental Pollution, 2003,124(2):273-281.
- [5] Viskari E L, Kärenlampi L. Roadside Scots pine as an indicator of deicing salt use—a comparative study from two consecutive winters[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2000,122(3/4):405-419.
- [6] Löfgren S. The chemical effects of deicing salt on soil and stream water of five catchments in southeast Sweden[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2001,130(1/2/3/4):863-868.
- [7] 杨毅男. 融雪剂:中国, 202010782272.7[P]. 2020-10-09. Yang Yanan. Snow Melting Agent: China, 202010782272.7 [P]. 2020-10-09.
- [8] 赵永泉, 缴子栋. 一种融雪剂:中国, 201911014455.8[P]. 2020-01-14. Zhao Yongquan, Jiao Zidong. Snow Melting Agent: China, 201911014455.8[P]. 2020-01-14.
- [9] 黄山学院. 一种短期防锈型低氯融雪剂及其制备方法:中国, 201911128602.4[P]. 2020-02-04. Huangshan University. Short-term Rust Prevention Type Low-chlorine Snow Melting Agent and Preparation Method Thereof: China, 201911128602.4[P]. 2020-02-04.
- [10] 辽宁大学. 一种以醋酸废液与秸秆灰为原料的环保融雪剂及其制备方法和应用:中国, 201911255921.1[P]. 2020-04-03. Liaoning University. Environment-friendly Snow-melting Agent Taking Acetic Acid Waste Liquid and Straw Ash as Raw Materials, and Preparation Method and Application Thereof: China, 201911255921.1[P]. 2020-04-03.
- [11] 田丹, 于景成. 环保型融雪剂的制备方法:中国, 201610022039.2[P]. 2016-05-11. Tian Dan, Yu Jingcheng. Preparation Method of Environment-friendly Snow Melting Agent: China, 201610022039.2 [P]. 2016-05-11.
- [12] 马立俊. 一种速融融雪剂:中国, 202010371113.8[P]. 2020-06-19. Ma Lijun. Quick-melting Snow-melting Agent: China, 2020 10371113.8[P]. 2020-06-19.
- [13] 山西大学. 一种环保型融雪化冰剂及其制备方法:中国, 201911254810.9[P]. 2020-04-17. Shanxi University. Environment-friendly Snow-Melting Deicing Agent and Preparation Method Thereof: China, 201911254810.9[P]. 2020-04-17.
- [14] 孔祥生, 易现峰. 植物生理学实验技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 2008. Kong Xiangfeng, Yi Xianfeng. Experimental Techniques of Plant Physiology[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2008.
- [15] 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):491-496. 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):491-496.
- [16] 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. Yan Chengzhu, Zhu Hong, Jin Xiaoxia, et al. Effect of deicing salt on seed germination of four main northern turfgrass species[J]. Acta Agrestia Sinica, 2017,25(2):437-441.
- [17] 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, 2007,23(4):62-66. 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, 2007,23(4):62-66.
- [18] 王明洁. 融雪剂对草地早熟禾(*Poa pratensis* Linn.)种子萌发过程中生理特性的影响[D]. 哈尔滨: 哈尔滨师范大学, 2012. Wang Mingjie. Effect of Deicing Salt on Physiological Characteristics of Seed Kentucky Bluegrass During Germination [D]. Harbin: Harbin Normal University, 2012.
- [19] 苗昊翠, 李利民, 宋彬, 等. NaCl胁迫对两种锦鸡儿种子萌发的影响[J]. 新疆农业科学, 2011,48(3):498-503. Miao Haocui, Li Limin, Song Bin, et al. Effects of NaCl stress on seed sermination of the two *Caragana* L. species [J]. Xinjiang Agricultural Science, 2011,48(3):498-503.
- [20] 尹宝丝. 盐胁迫对黑枸杞幼苗生长及光合特性的影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2019. Yin Baosi. Effects of Salt Treatments on Characteristics of Growth and Photosynthesis of *Lycium ruthenicum* murr[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2019.
- [21] 赵风斌, 王丽卿, 季高华, 等. 盐胁迫对3种沉水植物生物学指标及叶片中丙二醛含量的影响[J]. 环境污染与防治, 2012,34(10):40-44. Zhao Fengbin, Wang Liqing, Ji Gaohua, et al. Effects of NaCl stress on plant biology indicators and MDA content of 3 submerged plants[J]. Environmental Pollution & Control, 2012,34(10):40-44.
- [22] 刘倩, 许英梅, 王维, 等. CMA环保型融雪剂对植物生长生理特性的影响[J]. 化学世界, 2012,53(9):521-525. Liu Qian, Xu Yingmei, Wang Wei, et al. Effects of environment-friendly CMA deicer on growth and physiological characteristics of plants[J]. Chemical World, 2012, 53(9): 521-525.
- [23] 郑世英, 高学芳, 王景平. 可见分光光度法测定盐胁迫下玉米幼苗抗氧化酶活性及丙二醛含量[J]. 生物技术通报, 2010(7):106-109. Zheng Shiyong, Shang Xuefang, Wang Jingping. Determina-

- tion of antioxidant enzyme activity and contents of MDA in maize seedlings under salt stress with visible spectrophotometry[J]. *Biotechnology Bulletin*, 2010(7):106-109.
- [24] Loubser J, Hills P. The application of a commercially available *Citrus*-based extract mitigates moderate NaCl-stress in *Arabidopsis thaliana* plants[J]. *Plants*, 2020,9(8):1010.
- [25] 张营,李法云,严霞,等. 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*, 2012,32(14):4300-4308.
- Zhang Ying, Li Fayun, Yan Xia, et al. 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*, 2012,32(14):4300-4308.
- [26] Mäser P, Giertz M, Schroeder J I. Molecular mechanisms of potassium and sodium uptake in plants[J]. *Plant and Soil*, 2002,247(1):43-54.
- [27] Erdei L, Kuiper P J C. Substrate-dependent modulation of ATPase activity by Na⁺ and K⁺ in roots of *Plantago* species [J]. *Physiologia Plantarum*, 1980,49(1):71-77.
- [28] 赵永长. 黄腐酸钾对干旱胁迫下烤烟生长的调控效应及机理研究[D]. 北京:中国农业科学院, 2017.
- Zhao Yongchang. Regulatory Effects and Its Mechanism of Fulvic Acid Potassium on Growth of Flue-cured Tobacco Under Drought Stress[D]. Beijing:Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2017.
- [29] Cha-Um S, Kirdmanee C. Effect of glycinebetaine on proline, water use, and photosynthetic efficiencies, and growth of rice seedlings under salt stress[J]. *Turkish Journal of Agriculture & Forestry*, 2014,34(6):455-479.
- [30] Demmig Adams B, Adams W W. Photoprotection and other responses of plants to high light stress[J]. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 1992,43(1):599-626.
- [31] 王泽港,梁建生,曹显祖,等. 半根干旱胁迫处理对水稻叶片光合特性和糖代谢的影响[J]. *江苏农业研究*, 1999,20(3):21-26.
- Wang Zegang, Liang Jiansheng, Cao Xianzu, et al. Effects of half-root-dried treatment on photosynthetic characteristics and sugar metabolism of rice leaf[J]. *Jiangsu Agricultural Research*, 1999,20(3):21-26.
- [32] 秦景,董雯怡,贺康宁,等. 盐胁迫对沙棘幼苗生长与光合生理特征的影响[J]. *生态环境学报*, 2009,18(3):1031-1036.
- Qin Jing, Dong Wenyi, He Kangning, et al. Effects of salt stress on growth and photosynthetic physiological features of *Hippophae rhamnoides* seedlings[J]. *Ecology and Environmental Science*, 2009,18(3):1031-1036.
- [33] Maxwell K, Johnson G N. Chlorophyll fluorescence—a practical guide[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2000, 51(345):659-668.
- [34] Baker N R. Chlorophyll fluorescence: a probe of photosynthesis *in vivo*[J]. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 2008,59:89-113.
- [35] Krause G H, Weis E. Chlorophyll fluorescence and photosynthesis: the basics[J]. *Annual Review of Plant Biology*, 1991,42(1):313-349.
- [36] 师生波,尚艳霞,朱鹏锦,等. 不同天气类型下 UV-B 辐射对高山植物美丽风毛菊叶片 PS II 光化学效率的影响分析[J]. *植物生态学报*, 2011,35(7):741-750.
- Shi Shengbo, Shang Yanxia, Zhu Pengjin, et al. Effects of solar UV-B radiation on the efficiency of PS II photochemistry in the alpine plant *Saussurea superba* under different weather conditions in the Qinghai-Tibet Plateau of China [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2011,35(7):741-750.