

重金属胁迫对高羊茅和黑麦草种子萌发及幼苗生理特性的影响

张文娟, 李悦, 陈忠林, 徐苏男, 张利红* (辽宁大学环境学院, 辽宁沈阳 110036)

摘要 [目的]研究重金属胁迫对草坪草种子萌发及幼苗生理特性的影响。[方法]以高羊茅和黑麦草为研究对象,采用水培方法培养高羊茅和黑麦草幼苗,研究了重金属 Pb、Zn、Cu、Cd 单一胁迫及 Pb + Zn、Cu + Cd 复合胁迫对草坪草种子萌发和幼苗生理特性的影响。[结果]Pb 对高羊茅种子萌发、呼吸强度以及黑麦草种子电导率、呼吸强度的影响大于其余处理;Zn 可缓解 Pb 胁迫对高羊茅种子发芽率、电导率和幼苗鲜重以及黑麦草种子萌发、电导率和幼苗鲜重的伤害;Pb + Zn 复合胁迫对高羊茅种子电导率和幼苗叶绿素 a(Chl a)、叶绿素 b(Chl b)、叶绿素 a + b(Chl a + b)的影响有拮抗效应;Zn 胁迫对黑麦草幼苗叶绿素 a(Chl a)和类胡萝卜素(Car)的合成无显著影响;Cu + Cd 复合胁迫对高羊茅种子萌发和幼苗鲜重的影响有协同效应,对黑麦草种子发芽率和幼苗叶绿素 a(Chl a)、叶绿素 b(Chl b)、叶绿素 a + b(Chl a + b)的影响有拮抗效应。[结论]该研究结果可为今后重金属污染的治理提供理论依据。

关键词 重金属胁迫;草坪草;种子萌发;生理特性

中图分类号 S601 文献标识码 A 文章编号 0517-6611(2017)06-0001-04

Effects of Heavy Metals Stress on Seed Germination and Seedling Physiological Characteristics of *Festuca arundinacea* L. and *Lolium perenne* L.

ZHANG Wen-juan, LI Yue, CHEN Zhong-lin, ZHANG Li-hong* et al (College of Environmental Sciences, Liaoning University, Shenyang, Liaoning 110036)

Abstract [Objective] To study the effects of heavy metals stress on the seed germination and seedling physiological characteristics of turfgrass. [Method] Taking *Festuca arundinacea* L. and *Lolium perenne* L. as research object, the effects of single stress of Pb, Zn, Cu, Cd, combined stress of Pb + Zn, Cu + Cd on the seed germination and seedling physiological characteristics of turfgrass were studied by using hydroponic culture method. [Result] Pb had stronger effects on the seed germination and respiratory intensity of *F. arundinacea*, the electrical conductivity and respiratory intensity of *L. perenne* than other treatments. Zn could alleviate the damage of Pb on seed germination percentage, electrical conductivity, seedling fresh weight of *F. arundinacea*, and the seed germination, electrical conductivity, seedling fresh weight of *L. perenne*. Pb + Zn combined stress had antagonistic effects on the seed electrical conductivity of *F. arundinacea*, Chl a, Chl b, Chl a + b in the seedlings of *L. perenne*. Zn stress had no significant effect on the synthesis of Chl a, Car in the seedlings of *L. perenne*. Cu + Cd combined stress had synergistic effects on seed germination and seedling fresh weight of *F. arundinacea*, but it had antagonistic effects on seed germination percentage and Chl a, Chl b, Chl a + b in the seedlings of *L. perenne*. [Conclusion] The research can provide theoretical basis for the treatment of heavy metals pollution in the future.

Key words Heavy metals stress; Turfgrass; Seed germination; Physiological characteristics

随着我国工农业的迅速发展,重金属污染日益严重,重金属污染容易通过食物链富集,对人类生存和健康产生重要影响。重金属污染防治已成为当今环境研究的热点之一^[1-4]。

王翠香等^[5]研究表明草坪草植物有一定的重金属积累能力。多立安等^[6]认为在生态系统中草坪草在降低环境污染与生态保护方面发挥着极其重要的作用。高羊茅和黑麦草是我国常用的草坪草,具有良好的应用前景^[7-8]。目前,关于草坪草在 Zn、Cu、Pb、As 等重金属单一胁迫下生理或生长指标及小麦、玉米等在重金属复合胁迫下生理指标的变化研究均有报道^[9-13],但关于重金属复合胁迫下高羊茅和黑麦草种子和幼苗生理指标的变化研究较少。笔者以高羊茅和黑麦草为试验材料,研究重金属 Pb、Zn、Cu、Cd 单一胁迫及 Pb + Zn、Cu + Cd 复合胁迫对高羊茅和黑麦草种子萌发和幼苗生理特性的影响,以期对重金属污染的治理提供理论依据。

1 材料与与方法

1.1 试验材料及其处理 高羊茅和黑麦草种子由沈阳市园林研究院草坪所提供。将高羊茅和黑麦草种子用浓度 5% 的次氯酸钠溶液浸泡 10 min,再用蒸馏水清洗数遍。选用直径

10 cm 的培养皿,皿内铺上定性滤纸作为发芽床,每个培养皿均匀放入 100 粒种子。用单一或复合重金属胁迫液(表 1)浸泡种子,以蒸馏水为对照,每 24 h 更换浸泡液 1 次。采用光照培养箱变温模式培养,白天和夜间温度分别为 28 和 20 ℃、光照周期为 14 L: 10 D、80% 相对湿度、光照强度 3 000 lx。3 d 后测定种子发芽势,7 d 后测定种子发芽率(以胚芽长度达到种子长度的 50% 为种子萌发的判断标准),14 d 后测定高羊茅和黑麦草幼苗的鲜重及生理指标。

1.2 重金属胁迫液浓度的设置 重金属 Zn、Pb、Cu 和 Cd 溶液分别用分析纯 ZnSO₄ · 7H₂O、Pb(NO₃)₂、CuSO₄ · 5H₂O、CdCl₂ · 2.5H₂O 配制,水为去离子水,处理浓度的设置如表 1 所示,每个处理 3 次重复。

表 1 重金属胁迫液浓度的设置

Table 1 The concentration setting of heavy metals mg/L

重金属胁迫处理 Treatments of heavy metal stress	高羊茅 <i>F. arundinacea</i>	黑麦草 <i>L. perenne</i>
CK	0	0
Zn	150	150
Pb	600	600
Pb + Zn	600 + 150	600 + 150
Cu	40	40
Cd	25	25
Cu + Cd	40 + 25	40 + 25

1.3 测定指标与方法 鲜重使用分析天平测量;种子呼吸

基金项目 国家自然科学基金项目(31470398,31270369)。

作者简介 张文娟(1991—),女,甘肃庆阳人,硕士研究生,研究方向:植物生理生态。*通讯作者,教授,博士,硕士生导师,从事植物生理生态研究。

收稿日期 2016-12-16

强度的测定采用小篮子法^[14];电导率的测定采用电导仪法^[15];光合色素含量的测定采用分光光度法^[16]。按照以下公式计算发芽势和发芽率:

$$\text{发芽势} = (\text{前3 d发芽的种子数} / \text{供试种子数}) \times 100\%$$

$$\text{发芽率} = (\text{前7 d发芽的种子数} / \text{种子的总数}) \times 100\%$$

1.4 数据处理 试验数据使用 Excel 软件录入,使用 SPSS 17.0 统计软件进行数据统计与分析。试验结果均以平均值 \pm 标准差表示。

2 结果与分析

2.1 重金属胁迫对高羊茅和黑麦草种子萌发的影响 由表

表2 重金属胁迫对高羊茅和黑麦草种子萌发的影响

Table 2 Effects of heavy metal stress on the seed germination of *F. arundinacea* and *L. perenne* %

重金属胁迫处理 Treatments of heavy metal stress	高羊茅 <i>F. arundinacea</i>		黑麦草 <i>L. perenne</i>	
	发芽率	发芽势	发芽率	发芽势
	Germination percentage	Germination potential	Germination percentage	Germination potential
CK	93.00 \pm 3.25 a	80.00 \pm 2.96 a	89.00 \pm 4.15 a	82.00 \pm 2.31 a
Zn	50.00 \pm 2.42 c	4.00 \pm 1.20 d	80.00 \pm 2.86 a	12.00 \pm 1.21 c
Pb	11.00 \pm 1.24 e	1.00 \pm 0.12 d	50.00 \pm 3.12 d	6.00 \pm 1.22 d
Pb + Zn	42.00 \pm 3.01 c	5.00 \pm 0.95 d	63.00 \pm 2.53 c	6.00 \pm 1.74 d
Cu	65.00 \pm 2.22 b	35.00 \pm 3.53 b	69.00 \pm 3.36 c	13.00 \pm 2.31 c
Cd	70.00 \pm 3.52 b	43.00 \pm 2.13 b	72.00 \pm 5.24 b	54.00 \pm 2.14 b
Cu + Cd	44.00 \pm 2.54 d	22.00 \pm 2.45 c	66.00 \pm 2.65 c	33.00 \pm 3.12 b

注:同列不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)

Note: Different small letters in the same column indicate significant difference ($P < 0.05$)

2.2 重金属胁迫对黑麦草和高羊茅种子呼吸强度和电导率的影响 由表3可知,不同重金属胁迫对高羊茅种子呼吸强度产生不同程度的影响,Pb对高羊茅种子呼吸强度的影响最为明显,较CK下降42.65%,除Cu+ Cd复合胁迫处理外其他胁迫处理与CK均存在显著差异,电导率在重金属胁迫下均有大幅上升,Cu和Pb胁迫处理黑麦草种子的电导率较

2可知,重金属单一胁迫和复合胁迫均会抑制高羊茅种子的萌发,Pb、Pb+ Zn、Cu+ Cd胁迫处理使高羊茅种子发芽率分别下降82.00%、51.00%、49.00个百分点,发芽势分别下降98.75%、93.75%和72.50%。重金属单一和复合胁迫对黑麦草种子的影响与高羊茅相同,均抑制黑麦草种子萌发。Pb、Pb+ Zn、Cu+ Cd胁迫处理黑麦草种子发芽率较CK分别下降43.82%、29.21%和25.84%,发芽势较CK分别下降92.68%、92.68%和59.76%,除Zn处理外其余处理黑麦草种子发芽率均与CK存在显著差异。

CK分别上升176.30%和175.62%。Cu、Pb和Cu+ Cd复合胁迫处理使黑麦草种子呼吸强度较CK分别下降40.96%、40.43%和36.17%,电导率在重金属胁迫下均有大幅度上升,Pb单一胁迫以及Pb+ Zn、Cu+ Cd复合胁迫处理黑麦草种子电导率较CK分别升高51.73%、43.54%和37.53%,除Zn单一胁迫外其他胁迫处理均与CK存在显著差异。

表3 重金属胁迫对高羊茅和黑麦草种子呼吸强度和电导率的影响

Table 3 Effects of heavy metal stress on the respiratory intensity and electrical conductivity of *F. arundinacea* and *L. perenne*

重金属胁迫处理 Treatments of heavy metal stress	高羊茅 <i>F. arundinacea</i>		黑麦草 <i>L. perenne</i>	
	呼吸强度	电导率	呼吸强度	电导率
	Respiratory intensity mg/(g·h)	Electrical conductivity $\mu\text{S}/\text{cm}$	Respiratory intensity mg/(g·h)	Electrical conductivity $\mu\text{S}/\text{cm}$
CK	3.46 \pm 0.10 a	939.33 \pm 122.00 d	3.76 \pm 0.40 a	1 840.33 \pm 101.00 d
Zn	2.97 \pm 0.20 b	2 105.22 \pm 104.00 c	2.75 \pm 0.30 b	2 013.00 \pm 211.00 d
Pb	1.98 \pm 0.40 d	2 589.00 \pm 245.00 a	2.24 \pm 0.40 d	2 792.33 \pm 141.00 a
Pb + Zn	2.96 \pm 0.20 b	2 167.22 \pm 214.00 c	2.61 \pm 0.20 b	2 641.67 \pm 182.00 b
Cu	2.48 \pm 0.30 c	2 595.33 \pm 204.00 a	2.22 \pm 0.60 d	2 389.67 \pm 118.00 c
Cd	2.56 \pm 0.30 c	2 512.00 \pm 324.00 a	2.54 \pm 0.20 c	2 455.00 \pm 137.00 c
Cu + Cd	3.53 \pm 0.20 a	2 397.33 \pm 335.00 b	2.40 \pm 0.30 c	2 531.00 \pm 106.00 b

注:同列不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)

Note: Different small letters in the same column indicate significant difference ($P < 0.05$)

2.3 重金属胁迫对黑麦草和高羊茅幼苗鲜重的影响 由表4可知,重金属单一胁迫和复合胁迫对高羊茅幼苗鲜重均有抑制作用,且与CK均存在显著差异。Pb单一胁迫和Pb+ Zn复合胁迫处理使高羊茅幼苗鲜重分别下降69.82%和55.62%。Pb和Cu单一胁迫处理对黑麦草幼苗鲜重的影响最为显著,其次为Pb+ Zn、Cu+ Cd复合胁迫处理,Pb、Cu单一胁迫以及Pb+ Zn、Cu+ Cd复合胁迫处理黑麦草幼苗鲜重

较CK分别下降72.53%、71.67%、69.53%和69.53%,且与CK均存在显著差异。

2.4 重金属胁迫对高羊茅和黑麦草幼苗光合色素的影响 由表5可知,重金属单一和复合胁迫处理对高羊茅幼苗叶绿素a(Chl a)、叶绿素b(Chl b)与叶绿素a+b(Chl a+b)含量的影响趋势相似。Cu胁迫可促进Chl a、Chl b和Chl a+b的合成,其他处理Chl a、Chl b和Chl a+b含量较CK均

有所下降。Pb 胁迫对 Chl a + b 的抑制作用最强,其次为 Zn

表 4 重金属胁迫对高羊茅和黑麦草幼苗鲜重的影响

Table 4 Effects of heavy metal stress on fresh weight of *F. arundinacea* and *L. perenne* seedlings g

重金属胁迫处理 Treatments of heavy metal stress	高羊茅 <i>F. arundinacea</i>	黑麦草 <i>L. perenne</i>
CK	1.69 ± 0.02 a	2.33 ± 0.12 a
Zn	0.88 ± 0.11 cd	0.76 ± 0.13 c
Pb	0.51 ± 0.07 e	0.64 ± 0.12 c
Pb + Zn	0.75 ± 0.11 d	0.71 ± 0.05 c
Cu	1.11 ± 0.13 b	0.66 ± 0.10 c
Cd	0.99 ± 0.13 bc	1.06 ± 0.09 b
Cu + Cd	0.86 ± 0.13 cd	0.71 ± 0.06 c

注:同列不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)

Note: Different small letters in the same column indicate significant difference ($P < 0.05$)

表 5 重金属胁迫对高羊茅和黑麦草幼苗光合色素的影响

Table 5 Effects of heavy metal stress on photosynthetic pigment of *F. arundinacea* and *L. perenne* seedlings mg/g

重金属胁迫处理 Treatments of heavy metal stress	高羊茅 <i>F. arundinacea</i>				黑麦草 <i>L. perenne</i>			
	Chl a	Chl b	Car	Chl a + b	Chl a	Chl b	Car	Chl a + b
CK	0.83 ± 0.01 a	0.39 ± 0.01 b	0.18 ± 0.02 a	1.12 ± 0.05 b	0.92 ± 0.12 a	0.33 ± 0.05 b	0.21 ± 0.02 a	1.25 ± 0.18 b
Zn	0.32 ± 0.22 c	0.10 ± 0.03 c	0.05 ± 0.04 d	0.42 ± 0.03 ef	0.91 ± 0.14 a	0.46 ± 0.07 a	0.21 ± 0.03 a	1.37 ± 0.13 a
Pb	0.27 ± 2.02 c	0.14 ± 2.02 c	0.15 ± 0.02 ab	0.41 ± 0.02 f	0.47 ± 0.08 c	0.26 ± 0.02 bc	0.17 ± 0.02 b	0.73 ± 0.08 cd
Pb + Zn	0.52 ± 0.02 b	0.19 ± 0.02 c	0.12 ± 0.03 bc	0.71 ± 0.09 d	0.72 ± 0.07 b	0.29 ± 0.20 b	0.02 ± 0.01 d	1.01 ± 0.08 b
Cu	0.96 ± 0.01 a	0.83 ± 0.02 a	0.08 ± 1.03 cd	1.79 ± 0.13 a	0.38 ± 0.04 c	0.21 ± 0.04 c	0.14 ± 0.02 b	0.59 ± 0.09 d
Cd	0.36 ± 0.03 c	0.18 ± 0.01 c	0.12 ± 0.02 bc	0.54 ± 0.05 c	0.16 ± 0.05 d	0.09 ± 0.04 d	0.08 ± 0.02 c	0.25 ± 0.05 e
Cu + Cd	0.57 ± 0.02 b	0.29 ± 0.02 b	0.12 ± 0.06 bc	0.86 ± 0.06 c	0.45 ± 0.05 c	0.45 ± 0.02 a	0.090 ± 0.03 c	0.90 ± 0.06 bc

注:同列不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)

Note: Different small letters in the same column indicate significant difference ($P < 0.05$)

3 讨论与结论

种子萌发和苗期是植物对外界环境因子的敏感期^[17],关于重金属对植物种子的萌发产生影响已有报道^[18]。环境中重金属不是单独存在的,往往是多种污染成分同时出现,并且产生综合作用^[19]。该研究表明,重金属胁迫均抑制高羊茅和黑麦草种子的萌发过程,与前人研究结果^[6,8,20-21]相一致,高浓度重金属胁迫对植物淀粉酶和蛋白酶的活性产生抑制作用,从而影响植物代谢所需的能量和物质,致使种子萌发受到抑制。Pb + Zn、Cu + Cd 复合胁迫均与单一胁迫处理存在显著差异,这说明复合胁迫处理对草坪草植物种子的毒害作用比单一胁迫处理严重,研究结果与杨玲等^[20]相同。

Pb 对高羊茅种子呼吸强度的抑制最严重,且 Pb + Zn 复合胁迫与 Zn 胁迫处理无显著差异,说明 Zn 可缓解 Pb 胁迫对高羊茅种子呼吸强度的影响,该试验结果与 Peng 等^[22]研究结果相似,Cu 和 Pb 严重影响黑麦草种子的呼吸过程,且 Cu + Cd 复合胁迫对黑麦草种子呼吸强度的影响大于 Cu、小于 Cd 胁迫处理,Pb + Zn 复合胁迫对呼吸强度的影响大于 Zn、小于 Pb 胁迫处理,说明 Cu 可缓解 Cd、Zn 可缓解 Pb 对黑麦草种子呼吸的伤害。植物细胞膜系统是植物细胞与外界环境之间进行物质交换、信息交流的屏障和界面,其稳定性是细胞进行正常生理活动功能的基础。重金属胁迫会对植物细胞膜系统结构的完整性有所破坏,其透性的变化也反映细胞脂膜过氧化作用的强弱和脂膜的破坏程度,高羊茅种子

胁迫,使高羊茅幼苗 Chl a + b 较 CK 分别下降 63.39% 和 62.50%。重金属单一胁迫和复合胁迫对高羊茅幼苗类胡萝卜素(Car)有不同程度抑制,Zn 胁迫使高羊茅幼苗 Car 较 CK 下降 72.22%。

除 Zn 胁迫外,其余胁迫处理黑麦草幼苗 Chl a 均与 CK 存在显著差异,Cd 胁迫使 Chl a 较 CK 下降 82.61%,除 Zn 处理外其余胁迫处理黑麦草幼苗 Chl b 和 Chl a + b 含量均有所下降,Cd 胁迫使黑麦草幼苗 Chl b、Chl a + b 含量较 CK 分别下降 72.73% 和 80.00%,除 Zn 胁迫外其余胁迫处理黑麦草幼苗 Car 含量均有所下降,且均与 CK 存在显著差异。Pb + Zn、Cd、Cu + Cd 复合胁迫处理黑麦草幼苗 Car 含量较 CK 分别下降 90.48%、61.90% 和 57.14%。

电导率在重金属 Cu、Pb、Cd 胁迫下大幅上升,与前人研究结果^[10,23-24]相似,且 Pb + Zn 复合胁迫比 Pb、Zn 单一胁迫对细胞膜的损害更为严重。这说明 Pb 与 Zn 同时存在加剧了对细胞膜的损害,Pb 与 Zn^[25]在此过程中可能具有协同效应,黑麦草种子电导率在 Pb 胁迫处理下剧增,其次是 Pb + Zn 复合胁迫,Cu + Cd 复合胁迫处理的电导率大于 Cu、Cd 单一胁迫处理,说明 Zn 胁迫能在一定程度上缓解 Pb 对细胞膜的伤害,Cu 和 Cd 同时存在时加剧了对细胞膜的伤害。

高羊茅和黑麦草受到重金属胁迫时鲜重均有不同程度降低。Pb 对高羊茅鲜重的抑制最为显著,与姚婧等^[21]研究结果相一致;Cd 对鲜重的影响与 CK 存在显著差异,说明 Cd 对高羊茅幼苗的生长和发育有明显毒害作用,与刘丽珍等^[26]研究 Cd 对玉米幼苗的影响结果相一致;Pb + Zn 复合胁迫处理对高羊茅鲜重的影响大于 Zn、小于 Pb 胁迫处理,说明 Zn 可缓解 Pb 胁迫对高羊茅鲜重的伤害。重金属胁迫对黑麦草鲜重的影响与高羊茅相似,鲜重在重金属胁迫下均有所降低,Pb 对黑麦草鲜重的抑制最为显著,其次为 Pb + Zn 复合胁迫处理,说明 Zn 能在一定程度上缓解 Pb 胁迫对黑麦草鲜重的抑制,Cu + Cd 复合胁迫处理黑麦草的鲜重大于 Cd、小于 Cu 胁迫处理,说明 Cu 可缓解 Cd 胁迫对黑麦草鲜重的伤害。

光合生理的变化可以衡量植物对重金属的耐受性^[10],叶绿素作为植物光合作用的主要色素,其含量高低可直接反映植物光合作用的强弱。Car 为辅助色素,是叶绿素捕获光

能的补充。该研究结果表明,重金属胁迫对高羊茅 Chl a、Chl b 与 Chl a + b 的影响趋势相似,Pb 严重抑制高羊茅幼苗 Chl a + b 的合成,与前人研究结果^[10,27]相一致,由于 Pb^{2+} 可以降低叶绿素合成必需的原叶绿素酶的活性,或者替代叶绿素分子中的 Mg^{2+} ,进而破坏叶绿素结构。Cu 处理可促进高羊茅叶片 Chl a、Chl b 和 Chl a + b 的合成,Pb + Zn 复合胁迫处理对 Chl a、Chl b 和 Chl a + b 的影响均小于 Pb、Zn 单一胁迫处理,说明 Pb 和 Zn 同时存在有拮抗效应,Zn 处理严重抑制高羊茅 Car 的合成;除 Zn 胁迫处理外,其他胁迫处理黑麦草叶片 Chl a 含量均与 CK 存在显著差异,Cu + Cd 复合胁迫处理对黑麦草叶片 Chl a、Chl b 和 Chl a + b 的影响均小于 Cu、Cd 单一胁迫处理,说明 Cu 和 Cd 共存时有拮抗效应,除 Zn 处理外其他胁迫处理黑麦草叶片 Car 含量较 CK 均有所下降,且达到显著差异;Zn 对黑麦草幼苗 Chl a 和 Car 含量均无显著影响,说明 Zn 作为植物光合作用中叶绿素和相关酶类的非必需元素,当 Zn 浓度为 150 mg/L 时对黑麦草幼苗 Chl a 和 Car 的合成无显著影响。

综上所述,Pb 严重抑制高羊茅种子萌发过程和幼苗鲜重,Zn 可缓解 Pb 胁迫对高羊茅种子萌发、呼吸强度、电导率和幼苗鲜重的伤害,Pb + Zn 复合胁迫处理对高羊茅幼苗 Chl a、Chl b 和 Chl a + b 的影响有拮抗效应,Cu + Cd 复合胁迫处理对高羊茅种子萌发和幼苗鲜重的影响有协同效应;Pb 对黑麦草种子萌发、电导率和幼苗鲜重的影响强于其余处理,Cd 对黑麦草种子呼吸强度的抑制最显著,Zn 对黑麦草幼苗 Chl a 和 Car 的合成无显著影响,Cu + Cd 复合胁迫处理对黑麦草种子发芽率和幼苗 Chl a、Chl b 和 Chl a + b 的影响有拮抗效应。

参考文献

- [1] 董同喜,张涛,李洋,等. 畜禽粪便有机肥中重金属在水稻土中生物有效性动态变化[J]. 环境科学学报,2016,36(2):621-629.
- [2] 许友泽,刘锦军,成应向,等. 湘江底泥重金属污染特征与生态风险评估[J]. 环境化学,2016,35(1):189-198.
- [3] 安婧,宫晓双,陈宏伟,等. 沈抚灌区农田土壤重金属污染时空变化特性及生态健康风险评估[J]. 农业环境科学学报,2016,35(1):37-44.
- [4] 韦丽丽,周琼,谢从新,等. 三峡库区重金属的生物富集、生物放大及其生物因子的影响[J]. 环境科学,2016,37(1):325-334.
- [5] 王翠香,房义福,吴晓星,等. 21 种园林植物对环境污染吸收净化能

- 力的研究[J]. 山东农业科技,2006(6):11-13.
- [6] 多立安,高玉葆,赵树兰. 重金属递进胁迫对黑麦草初期生长的影响[J]. 植物研究,2006,26(1):117-122.
- [7] DUO L A,ZHAO S L,GAO Y B. Heavy metal control in domestic rubbish by source screening and suitability of nutrient elements as turf grass medium[J]. Journal of northeast agriculture university,2005,12(1):1-4.
- [8] 刘明美,沈益新. Cu^{2+} 胁迫对多花黑麦草生长及饲草品质的影响[J]. 中国草地,2005,27(1):39-44.
- [9] 韩宝贺,朱宏,张艺馨. 镉对三种草坪草种子萌发与生长的影响[J]. 中国草地学报,2014,36(3):98-105.
- [10] 李西,吴亚娇,孙凌霞. 铅胁迫对三种暖季型草坪草生长和生理特性的影响[J]. 草业学报,2014,23(4):171-180.
- [11] 朱志国,周守标. 铜锌复合胁迫对芦竹生理生化特性、重金属富集和土壤酶活性的影响[J]. 水土保持学报,2014,28(1):276-280.
- [12] 黄希莲. 重金属单一及复合污染对小麦种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 黔南民族师范学院学报,2015,35(4):106-109.
- [13] 姚伦富,文科元,黄锦涛,等. 重金属镉、铅及其复合污染对玉米种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 现代农业科技,2014(24):21-23.
- [14] 张志良,瞿伟菁. 植物生理学实验指导[M]. 3版. 北京:高等教育出版社,2003.
- [15] 陈建勋,王晓峰. 植物生理学实验指导[M]. 2版. 广州:华南理工大学出版社,2006.
- [16] 李锦树,王洪春,王文英,等. 干旱对玉米叶片细胞透性及膜脂的影响[J]. 植物生理学报,1983,9(3):223-228.
- [17] 马敏,龚惠红,邓泓. 重金属对 8 种园林植物种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 中国农学通报,2012,28(22):206-211.
- [18] 姜成,申晓慧,程艳. 凤仙花种子对重金属铅的耐性研究[J]. 种子,2009,28(9):16-19.
- [19] 赵杨迪,潘远智,刘碧英,等. Cd、Pb 单一及复合污染对花叶冷水花生长的影响及其积累特性研究[J]. 农业环境科学学报,2012,31(1):48-53.
- [20] 杨玲,张勇,吴洪娇,等. 铅锌胁迫对早熟禾和狗牙根种子出苗和幼苗生长的影响[J]. 云南农业大学学报,2013,28(3):405-410.
- [21] 姚婧,陈雪梅,王友保. Pb 污染土壤对高羊茅种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 上海交通大学学报(农业科学版),2008,26(1):61-65.
- [22] PENG M,WANG H X,WU Y S. Ultrastructural changes induced by cadmium and lead in corn seedling cell[J]. China environmental science, 1991,11(6):426-431.
- [23] 刘大林,曹喜春,张华,等. 土壤 Cu^{2+} 胁迫对多花黑麦草部分生理指标的影响[J]. 草地学报,2014,22(2):319-325.
- [24] 刘慧芹,韩巨才,刘慧平,等. 铅梯度胁迫对多年生黑麦草幼苗生理生化特性的影响[J]. 草业学报,2012,21(6):57-63.
- [25] 杨玲,熊智,吴洪娇,等. 5 种豆科植物对铅、锌及其复合作用的耐性研究[J]. 中国农学通报,2011,27(30):104-110.
- [26] 刘丽珍,戎婷婷,高昆. 镉对玉米幼苗生长的影响[J]. 农业与技术,2016,36(3):3-6.
- [27] 杨明琰,梁语燕,曾德榜,等. 铅胁迫对黑麦草 Pb 富集特性及生理代谢的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2014,42(12):97-101.

科技论文写作规范——缩略语

采用国际上惯用的缩略语。如名词术语 DNA(脱氧核糖核酸)、RNA(核糖核酸)、ATP(三磷酸腺苷)、ABA(脱落酸)、ADP(二磷酸腺苷)、CK(对照)、CV(变异系数)、CMS(细胞质雄性不育性)、IAA(吲哚乙酸)、LD(致死剂量)、NAR(净同化率)、PMC(花粉母细胞)、LAI(叶面积指数)、LSD(最小显著差)、RGR(相对增长率),单位名缩略语 IRRI(国际水稻研究所)、FAO(联合国粮农组织)等。对于文中有些需要临时写成缩写的词(如表及图中由于篇幅关系以及文中经常出现的词而写起来又很长时),则可取各主要词首字母写成缩写,但需在第一次出现处写出全称,表及图中则用注解形式在下方注明,以便读者理解。