

镉胁迫下草地早熟禾离子吸收及生理响应特征分析

崔婷,王勇,吴万鑫,向航,马晖玲

(甘肃农业大学草业学院,草业生态系统教育部重点实验室,甘肃省草业工程实验室,中-美草地畜牧业可持续发展研究中心,甘肃 兰州 730070)

摘要:为探究草地早熟禾(*Poa pratensis*)对镉(Cd)胁迫下的生理响应及离子吸收情况,采用砂培法育苗,对不同浓度Cd胁迫下的草地早熟禾株高、根长、叶片及根系鲜重、光合指标、抗氧化酶活性、叶片激素水平及离子含量进行测定。结果表明:Cd胁迫抑制草地早熟禾生长并造成草地早熟禾萎蔫、失绿,显著减少草地早熟禾光合色素含量,抑制叶片的蒸腾速率、气孔导度、净光合速率、胞间二氧化碳浓度。随着Cd胁迫浓度的增加,草地早熟禾叶片CAT和POD活性逐渐降低,而根系CAT和POD活性增加。另外,Cd胁迫降低草地早熟禾叶片IAA和GA₃含量,增加ZT含量。离子吸收方面,大部分Cd富集在根部而较少转移至叶片,且Cd胁迫导致草地早熟禾Zn²⁺含量降低,叶片Mg²⁺含量升高,根系Mg²⁺含量降低。综上,Cd胁迫抑制草地早熟禾生长发育、光合作用及离子吸收,可通过调控抗氧化酶活性和激素水平缓解Cd毒害。

关键词:镉;草地早熟禾;光合作用;抗氧化酶;激素;离子吸收

中图分类号:S688.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-5500(2022)03-0115-10

DOI: 10.13817/j.cnki.cyycp.2022.03.014



土壤重金属污染可导致植物中毒并通过食物链危害人类健康^[1]。Cd是重要的重金属污染物之一,全世界每年约有 3.0×10^4 t Cd被释放到环境中,其中 1.3×10^4 t由人类活动引起^[2]。中国在长期的工业生产和矿产开采活动中造成的重金属污染事件近年来逐渐凸显,为此,国务院批准首个重金属污染治理专项规划,重点防控镉(Cd)、铅(Pb)、汞(Hg)等重金属污染物,并强调优先考虑植物修复防治措施^[3]。《土壤污染防治行动计划》实施以来,农用地土壤重金属污染得到初步遏制,“净土保卫战”取得初步成效,然而,部分地区土壤污染隐患依然突出^[4]。

植物复杂的防御反应是其应对不利环境影响的关键,Cd胁迫通常会激活一些信号网络,调控植物转

录和代谢以抵御Cd胁迫^[5]。植物激素信号在响应外界胁迫方面通常具有积极作用。在Cd胁迫下对玉米(*Zea mays*)根系的转录组分析发现,生长素信号通路相关基因显著富集,对生长素生物合成、运输和下游反应基因转录丰度的比较表明,这些基因在Cd处理下有普遍的表达反应,Cd处理导致玉米根系生长素(IAA)含量显著降低,而外源喷施IAA可促进根系生长,增加Cd吸收^[6]。外源IAA可显著增加油菜对Cd的吸收,同时促进Cd从根部向地上运输^[7]。Cd胁迫通常导致植物生物量减少,抑制植物光合,降低矿质营养元素含量,并引起植物氧化应激,而施加外源赤霉素(GA₃)可缓解这种抑制作用^[8]。Cd²⁺具有较低的氧化活性,但由于Cd²⁺与其他二价阳离子在化学上的相似性,Cd²⁺通常会间接导致植物活性氧(ROS)代谢失衡,影响植物正常生长发育^[9]。植物抗氧化酶系统是植物清除ROS的重要途径,研究表明,Cd胁迫处理黑麦草后,可溶性蛋白含量减少,超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)、丙二醛(MDA)含量均高于对照,而FeSOD, MnSOD,

收稿日期:2021-08-09; **修回日期:**2021-09-13

基金项目:国家自然科学基金资助(32071886)

作者简介:崔婷(1996-),女,甘肃会宁人,硕士研究生。

E-mail: 3262605496@qq.com

马晖玲为通信作者。

E-mail: mahl@gsau.edu.cn

ChlCu/ZnSOD, Cyt Cu/ZnSOD, APX, GPX, GR 和 POD 基因均上调表达^[10]。另外, Cd 胁迫下, 植物体内 Cd 含量显著增加并抑制其对 K、Ca、Mg、Cu、Fe、Zn 的吸收^[11]。

草坪草因具有对 Cd 极强的吸收效率、高度耐 Cd 能力和优良的遗传性状, 在 Cd 污染土壤修复方面具有极大的优势。Li 等^[12]研究发现, 草地早熟禾 (*Poa pratensis*) 可在 Cd、Zn 污染土地上较好生长, 表明草地早熟禾具有较强的 Cd 耐受性。草地早熟禾分布广泛、生物量大、抗逆性强、根系发达, 可以迅速覆盖地表, 且在 Cd 耐受性方面远高于超富集植物龙葵^[13-14]。另一方面, 草地早熟禾具有发达的不定根系统, 短根茎可将疏丛紧密联系在一起, 形成稠密网状, 在无机离子吸收方面具有极大优势^[13]。因此, 利用草地早熟禾修复 Cd 污染土壤在实际应用中具有深远意义。因此, 研究 Cd 胁迫下草地早熟禾的生理变化及草地早熟禾对 Cd 的吸收和转运变, 以期对 Cd 污染草坪草土壤治理提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料

以草地早熟禾品种午夜 (*Poa pratensis* cv. Midnight) 为试验材料, 种子由北京克劳沃草业技术开发中心提供。

1.2 试验设计与处理

草地早熟禾种子用蒸馏水过夜浸泡后用 70% 酒精浸泡 1 min, 20% 次氯酸钠浸泡 15 min, 灭菌水冲洗 5~6 次, 晾干后均匀撒播在填装蛭石的育苗钵 (8 cm×10 cm) 中, 出苗后间苗至 30 株/钵, 置于人工智能气候培养箱中培养, 温度 25 °C/20 °C, 光周期 16 h/8 h。每天喷洒蒸馏水至出苗两周后改用霍格兰德营养液浇灌, 每 3 天更换 1 次营养液, 继续培养 45 d 后开始施加处理。

试验处理 1: 将预培养的幼苗施加不同 Cd 浓度处理, 根据前期预试验结果, 将 Cd 胁迫浓度梯度依次设置为 0 (CK)、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0 mmol/L。处理 7 d 后测定各项生理指标。处理 21 d 后拍照并测定生长指标。

试验处理 2: 将预培养的幼苗施加 0 (CK) 和 1 mmol/L 处理, 3 d 后测定其叶片激素含量, 7 d 后测

定其根系和叶片 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Zn^{2+} 含量并测定 7、14、21、28 d 时根系和叶片中的 Cd 含量。

1.3 指标测定

株高和根长: 采用直尺测定。

叶片鲜重和根系鲜重: 采用分析天平称量。

光合色素含量测定: 取新鲜的草地早熟禾叶片 0.2 g, 用 95% 乙醇浸泡 24 h 后, 测定 470、649 和 665 nm 波长下的吸光度值并计算相关色素含量^[15]。

蒸腾速率 (T_r)、叶片气孔导度 (G_s)、净光合速率 (P_n)、胞间 CO_2 浓度 (C_i) 采用 GFS-3000 便携式光合测量仪测定。

SOD 活性测定: 采用氮蓝四唑 (NBT) 光还原法测定^[15]。POD 活性测定: 采用愈创木酚法测定^[15]。CAT、APX 活性测定: 采用过氧化氢还原法测定^[15]。

植物激素含量测定: 参照刘燕^[16]的方法, 取新鲜植物组织 2 g, 加入液氮研磨至粉末后加入 20 mL 80% 预冷的甲醇溶液, 在避光摇床中提取 4~6 h, 转速 180 r/min, 4 °C 条件下浸提 16~22 h, 10 000 r/min 离心 15 min, 提取上清液并在残渣中加入 10 mL 80% 甲醇, 涡旋仪混匀后超声波提取 5 min, 再次离心并合并上清液。将上清液在 40 °C 下减压离心至 20 mL, 加入石油醚 10 mL, 充分摇匀后静置脱色 10 min, 弃去上层, 再次加入石油醚 10 mL, 10 000 r/min 离心 10 min, 再次弃去上层, 40 °C 减压浓缩至 1/3, 加 10 mL 乙酸乙酯萃取 2 次, 合并上清液, 并将上清液置于 40 °C 减压浓缩至近干后加入 2 mL 色谱甲醇复溶, 经 0.22 μm 有机滤膜过滤后在液相色谱仪中进行 IAA、ABA、 GA_3 、ZT 含量测定。

Ca^{2+} 、 Cd^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Zn^{2+} 浓度的测定: 对不同处理的草地早熟禾根、叶片进行取样, 放入烘箱 105 °C 杀青 15 min, 70 °C 烘至恒重, 将不同部位研碎成粉末, 过 100 目 (0.15 mm) 筛。准确称取 0.2 g, 重复 4 次, 放入 50 mL 消化管, 加入 8 mL 消解试剂 ($\text{HNO}_3:\text{H}_2\text{O}_2=7:1$, v, 优级纯), 放入微波消解仪, 控制温度: 1) 130 °C, 升温 10 min, 保温 2 min; 2) 150 °C, 升温 3 min, 保温 2 min; 3) 180 °C, 升温 3 min, 保温 15 min。压力设定均为 400 PSI。消解完成后用 1% HNO_3 定容至 50 mL 容量瓶, 保存。用火焰原子吸收分光光度计 (AA-6800, 岛津, 日本) 测定样品溶液中 Ca^{2+} 、 Cd^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Zn^{2+} 的浓度。

1.4 数据处理

采用 SPSS 19.0 进行数据分析, Microsoft Excel 2019 做图, 数据用“平均值±标准误”表示。

2 结果与分析

2.1 Cd 胁迫对草地早熟禾生长的影响

1.0 mmol/L 浓度 Cd 胁迫即可抑制草地早熟禾生

长, 随着 Cd 浓度增加, 抑制效果逐渐增强。当 Cd 浓度达到 2.5 mmol/L 时, 草地早熟禾叶片变黄, 株高显著降低, 且生物量减少。同时, 随着 Cd 胁迫浓度增加, 草地早熟禾株高、根长、叶片鲜重、根系鲜重均呈现逐渐降低的趋势, 且对照与各处理差异显著 ($P < 0.05$) (图 1)。

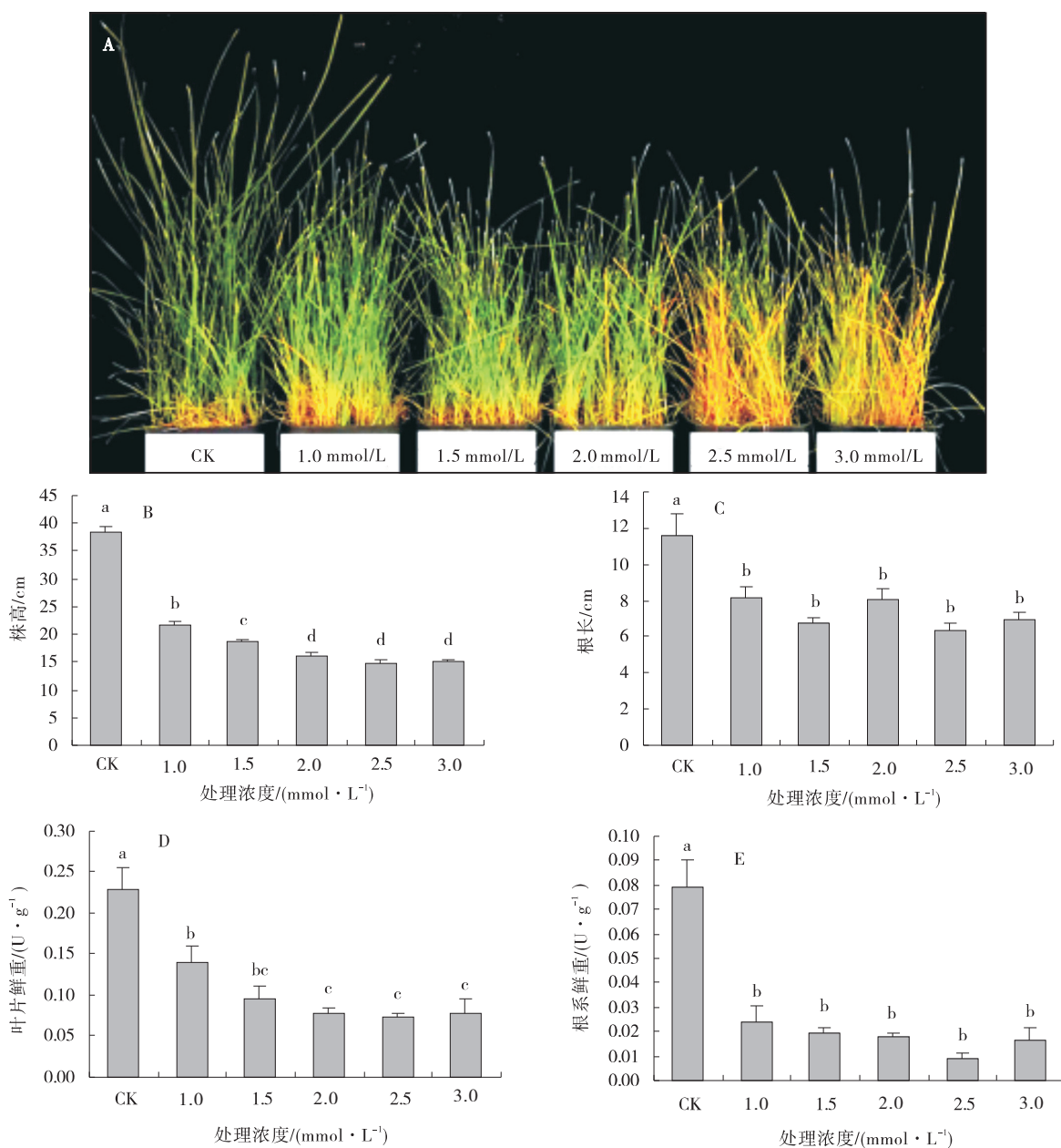


图 1 Cd 胁迫处理下草地早熟禾株高、根长、叶片鲜重、根系鲜重

Fig. 1 Effects of Cd stress on height, root length, leaf fresh weight and root fresh weight of kentucky bluegrass

2.2 Cd 胁迫对草地早熟禾光合特性的影响

Cd 胁迫显著抑制草地早熟禾叶绿素 a、叶绿素 b、类胡萝卜素含量 ($P < 0.05$), 叶绿素 a/b 的值随着浓度增加亦显著降低 ($P < 0.05$)。同时, 其蒸腾速率、气孔

导度、净光合速率也在 Cd 胁迫下显著降低 ($P < 0.05$), 而 Cd 胁迫下胞间二氧化碳浓度显著增加 ($P < 0.05$)。而施加 Cd 后各浓度梯度之间蒸腾速率、气孔导度、净光合速率、胞间二氧化碳浓度未发生显著变

化($P < 0.05$)(图2)。

2.3 Cd胁迫对草地早熟禾抗氧化酶活性的影响

Cd胁迫下草地早熟禾根系中APX活性显著低于CK($P < 0.05$)(图3-A)。叶片中(图3-B),CAT活性随Cd胁迫增加逐渐降低,3 mmol/L Cd胁迫下叶片CAT活性最低,比CK降低90%,差异显著($P < 0.05$),而在根系中,Cd胁迫下CAT活性显著增加,1mmol/L Cd胁迫根系CAT活性增加幅度最大,比CK增加2.37倍,差异显著($P < 0.05$)(图3-B)。叶片

POD活性随Cd胁迫增加逐渐降低,而根系中POD活性表现出相反的趋势,3 mmol/L Cd胁迫下根系POD活性增加至最大,比CK增加40.92%,差异显著($P < 0.05$)(图3-C)。Cd胁迫下SOD活性表现出先增后降的趋势(图3-D),其中,1 mmol/L Cd胁迫下叶片SOD活性增至最大,2 mmol/L Cd胁迫下根系SOD活性增至最大,但与CK相比,叶片SOD活性增加21.83%,而根系SOD活性降低17.42%,差异显著($P < 0.05$)。

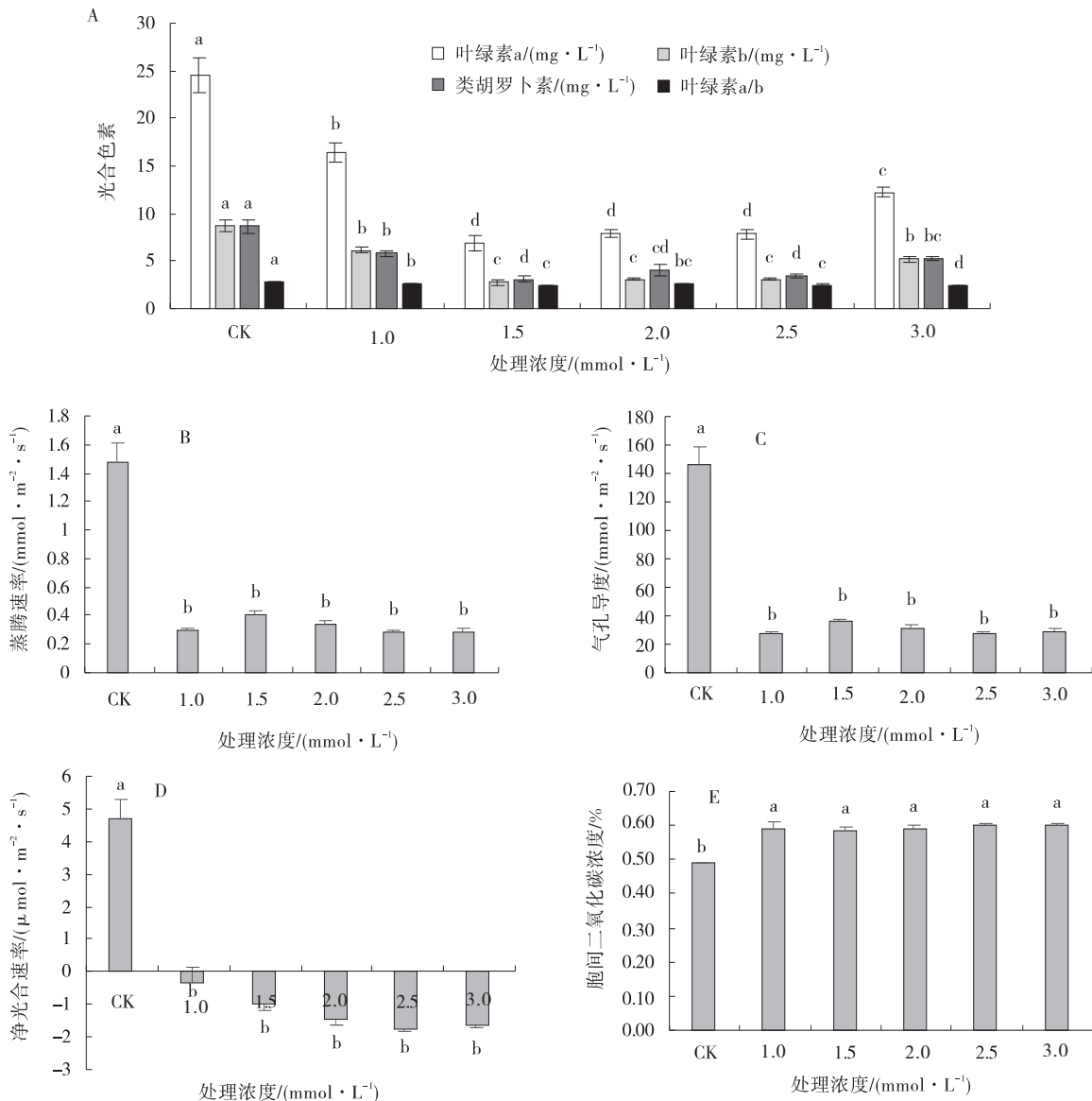


图2 Cd胁迫处理下草地早熟禾光合色素含量、蒸腾速率、气孔导度、净光合速率、胞间二氧化碳浓度

Fig. 2 Effects of Cd stress on photosynthetic pigment content, transpiration rate, stomatal conductance, net photosynthetic rate, and intercellular carbon dioxide concentration of kentucky bluegrass

2.4 Cd胁迫对草地早熟禾叶片激素含量的影响

Cd胁迫下草地早熟禾叶片IAA和GA₃含量显著降低($P < 0.05$),而ZT含量显著增加($P < 0.05$),

ABA含量变化差异不显著($P > 0.05$)。其中IAA变化最为显著,与CK相比,Cd处理下叶片IAA含量比CK降低53.78%,差异极显著($P < 0.01$)(图4)。

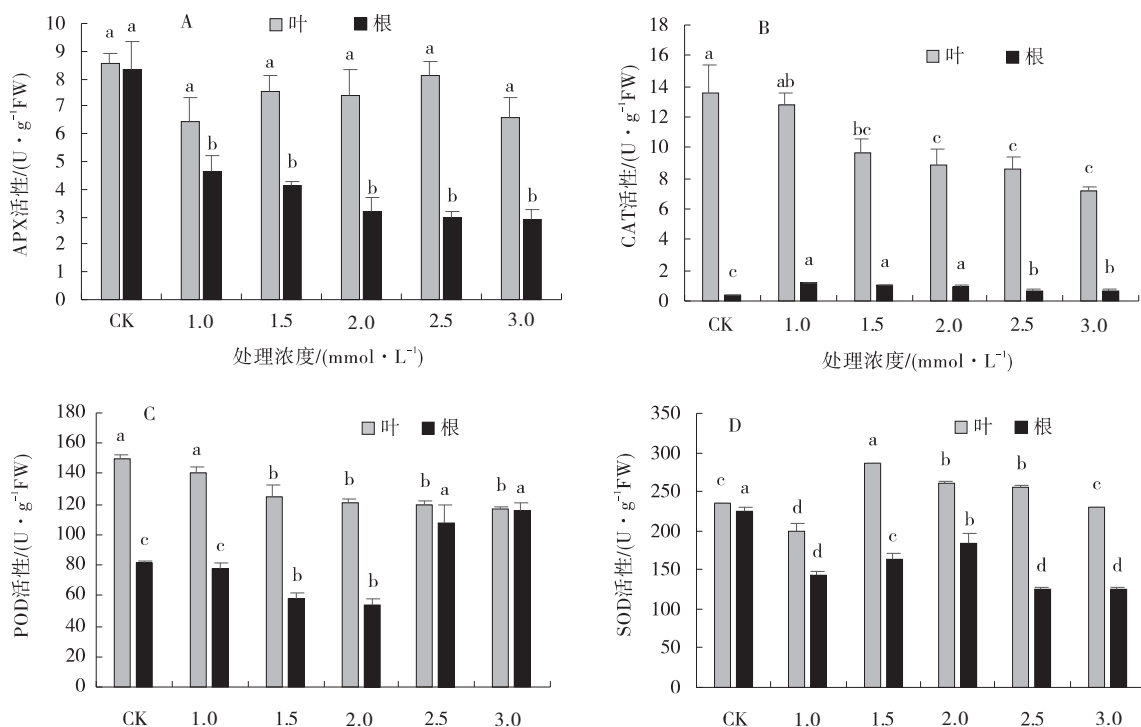


图 3 Cd胁迫处理下草地早熟禾 APX、CAT、POD、SOD 活性

Fig. 3 Effects of Cd stress on APX, CAT, POD and SOD activities of kentucky bluegrass

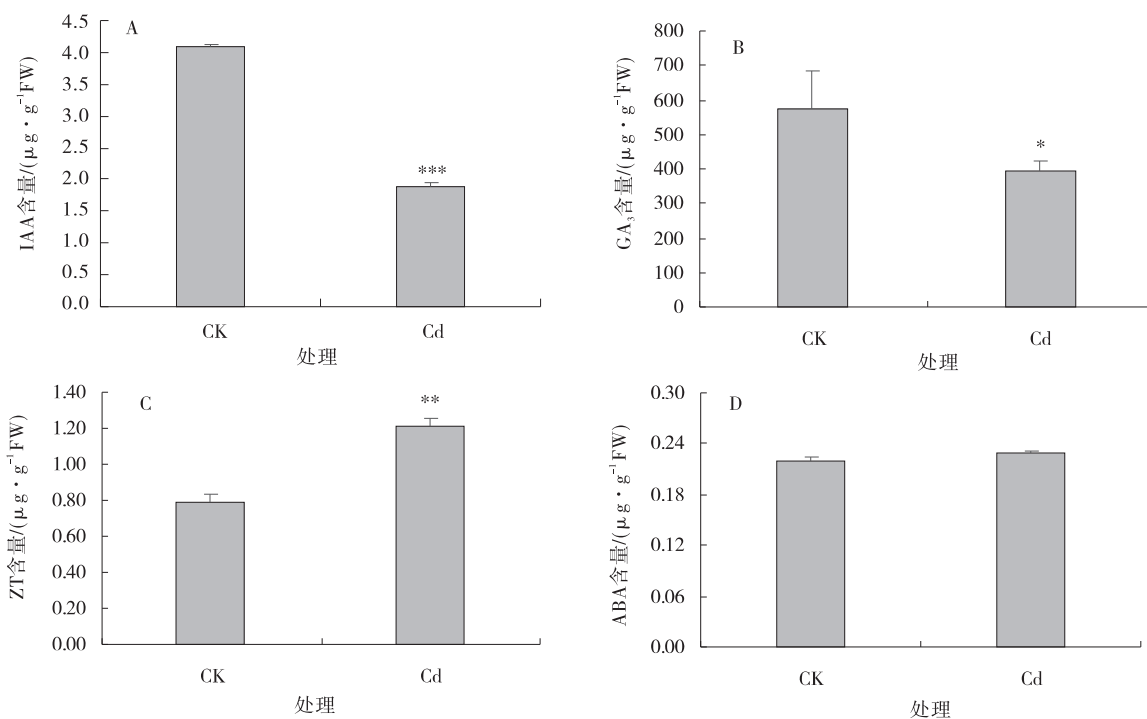


图 4 Cd胁迫处理下草地早熟禾叶片 IAA、GA₃、ZT、ABA 含量

Fig. 4 Effects of Cd stress on IAA, GA₃, ZT, and ABA content in leaves of kentucky bluegrass

2.5 Cd胁迫对草地早熟禾二价阳离子吸收和转运的影响

草地早熟禾根系和叶片对 Cd²⁺均有极显著的富集作用($P < 0.01$),且根系中 Cd 含量明显高于叶片中 Cd²⁺含量(图 5-A)。根系和叶片 Zn²⁺含量也发生极显

著变化($P < 0.01$),分别比 CK 降低 33.18% 和 29.15%(图 5-B)。Cd胁迫下,草地早熟禾叶片 Mg²⁺含量明显增加,而根系 Mg²⁺含量明显降低,差异极显著($P < 0.01$)(图 5-C)。而 Cd胁迫对草地早熟禾 Ca²⁺含量未产生显著影响(图 5-D)。

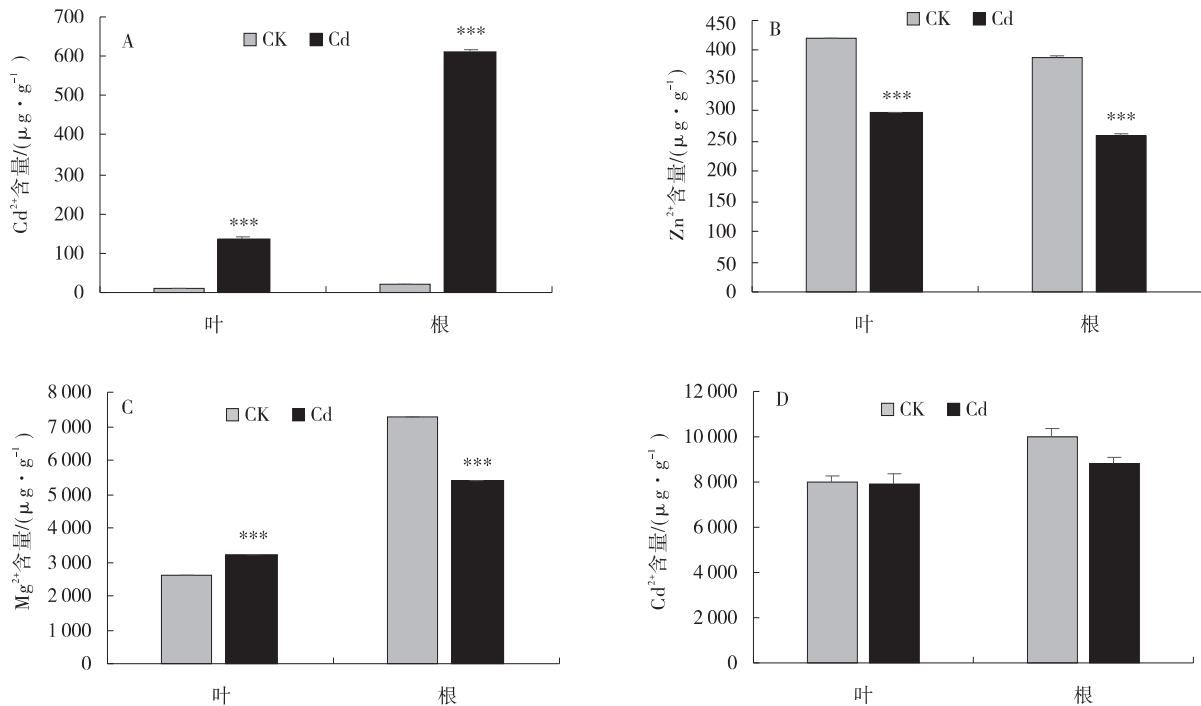


图5 Cd胁迫处理下草地早熟禾叶片和根系Cd²⁺、Zn²⁺、Mg²⁺、Ca²⁺含量

Fig. 5 Effects of Cd stress on the content of Cd²⁺, Zn²⁺, Mg²⁺ and Ca²⁺ in the leaves and roots of kentucky bluegrass

3 讨论

高浓度Cd胁迫通常导致植物失绿、萎蔫、抑制植物生长^[17],这种毒害现象通常与Cd在植物器官中的积累有关^[18]。本研究中,随着Cd胁迫浓度的增加,草地早熟禾也表现出抑制生长及萎蔫变黄等毒害现象。

Cd在植物叶片中的积累通常会导致植物类囊体结构破坏,影响植物光合^[19]。另一方面,Cd通常在老叶中积累并破坏叶绿素结构,而新叶中叶绿素的生物合成也造成老叶中叶绿素合成受到抑制^[20],同时,Cd胁迫导致对叶绿素生物合成酶活性的抑制和叶绿素酶促降解过程的激活^[21]。研究认为,Cd胁迫通过降低合成氨基乙酰丙酸合酶所需的谷氨酸盐的有效性^[22],而氨基乙酰丙酸合酶是叶绿素合成过程中的关键酶^[23]。Cd处理下,草地早熟禾叶绿素a、叶绿素b、类胡萝卜素含量均显著降低,表明Cd胁迫对草地早熟禾光合色素合成具有抑制作用。研究发现,蒸腾速率直接影响植物体内Cd的转运^[24],Liu等^[25]报道,植物茎中Cd含量与蒸腾速率呈显著的正相关关系。本研究中,Cd处理的草地早熟禾叶片蒸腾速率显著降低。报道指出,Cd胁迫下,植物气孔导度随着Cd浓度增加而降低,而气孔导度的降低通常伴随着光合速率的下

降^[26]。本试验中,Cd胁迫导致草地早熟禾叶片气孔导度、净光合速率显著降低,而胞间二氧化碳浓度增加,表明Cd胁迫对草地早熟禾光合作用具有严重的抑制作用。

Cd胁迫通常会引起植物活性氧代谢失衡,植物自身拥有复杂的清除活性氧的途径,其中抗氧化酶途径是植物主要清除活性氧的途径^[27-29]。有报道指出,胁迫条件下产生的超氧自由基可被SOD歧化产生过氧化氢,过氧化氢可被APX、CAT和POD清除^[30]。不同植物抗氧化酶活性在胁迫条件下的变化并非一致,郭锋等^[31]研究发现,Cd胁迫下西葫芦(*Cucurbita pepo*)抗氧化酶活性增加,类似的结果在张晓娟^[32]对绿豆(*Vigna radiata*)的研究中也有报道。通常认为,轻度胁迫可促进植物抗氧化酶活性,而重度胁迫则抑制植物抗氧化酶活性^[33]。本研究中,Cd胁迫导致草地早熟禾叶片CAT、POD活性降低,SOD活性先增后降,而APX活性无显著差异,可能是因为Cd胁迫抑制草地早熟禾CAT和POD活性,草地早熟禾可在一定浓度的Cd胁迫下提高SOD的浓度以抵御Cd毒害,而在根系中CAT、POD和SOD在Cd胁迫下活性增加,APX活性降低,而根系是草地早熟禾吸收Cd的重要器官,根系中Cd含量远高于叶片中Cd含量(图5-A),

证明在高浓度 Cd 胁迫下,根系依旧可以通过调节部分抗氧化酶活性来抵御 Cd 毒害。

细胞壁 POD 的一些酸性同工酶通过 H_2O_2 催化单酚氧化聚合反应而木质化,POD 可降低细胞壁可塑性并增加其硬度,因此可控制细胞生长^[34]。POD 可以通过影响 3-吲哚乙酸 (IAA) 氧化酶活性来影响 IAA 合成速率^[5]。本研究中,Cd 胁迫导致叶片 POD 活性下降,IAA 含量显著降低,这可能影响草地早熟禾的正常生长。GA 在控制细胞伸长和茎伸长中起着核心作用^[35],有研究表明,施加外源 GA_3 可显著缓解大豆 (*Glycine max*) Cd 胁迫,并增加 Cd 胁迫下大豆的生长速率和净同化率^[36]。本研究中,Cd 胁迫处理的草地早熟禾叶片 GA_3 含量显著低于 CK,证明 Cd 毒害同样影响 GA_3 含量从而影响草地早熟禾生长和生理状态。细胞分裂素是参与植物多种生命过程的激素信号,玉米素 (Zeatin, ZT) 和其衍生物是细胞分裂素的重要组成部分,众多研究表明,细胞分裂素参与植物叶片衰老、促进分枝、促进茎和根的生长^[37-39]。本研究中,Cd 胁迫的草地早熟禾叶片 ZT 含量显著高于 CK,表明内源 ZT 在草地早熟禾 Cd 解毒方面可能具有积极作用。而 ABA 含量在 Cd 处理和对照间未发生显著变化。

Cd 是植物非必须营养元素,但土壤中的 Cd 可通过钙 (Ca)、铁 (Fe)、锰 (Mn)、锌 (Zn) 等必需二价阳离子转运蛋白进入植物根部,通过影响一些正常生命活动而对植物造成毒害作用^[40]。金属阳离子易被根系中带负电的化合物吸引而较少的向上转移^[41]。Mg 是参与植物光合作用的和呼吸作用的重要金属元素,参与活化磷酸变位酶和磷酸激酶,同时,在 DNA 和 RNA 合成中也具有重要作用,植物缺乏 Mg 可导致叶片黄化,严重影响叶绿素合成,抑制植物光合作用^[42]。Ca 通常作为第二信使参与植物抵御逆境胁迫反应,Cd 与 Zn 化学相似性较高,Cd²⁺ 可影响 Zn-Finger 转录因子活性,取代 Zn²⁺,从而干扰转录机制^[43],类似于这种机制,Cd 取代钙调蛋白中的 Ca²⁺ 离子,引起细胞内钙水平变化,影响钙信号传导^[44]。本研究中,草地早熟禾根系中富集更多的 Cd,而 Cd 胁迫后根系和叶片 Zn²⁺ 含量显著降低,表明 Cd 抑制草地早熟禾 Zn²⁺ 吸收。Mg²⁺ 含量 Cd 处理后叶片中显著增加而根系中 Mg²⁺ 含量减少,表明 Cd 胁迫导致更多的 Mg²⁺ 向叶片运输,

而 Ca²⁺ 含量 Cd 处理与 CK 相比差异不显著,证明 Cd 毒害对 Ca²⁺ 含量影响较小。

4 结论

Cd 胁迫可造成草地早熟禾生长抑制,且大部分 Cd 富集在根部,Cd 吸收的同时影响 Zn²⁺、Mg²⁺ 吸收和转运。Cd 毒害可抑制草地早熟禾光合作用,减少叶片 IAA 和 GA_3 含量,增加 ZT 含量。抗氧化酶 SOD、POD、CAT、APX 不同程度地参与草地早熟禾 Cd 解毒。

参考文献:

- [1] Li Z, Ma Z, van der Kuijp T J, *et al.* A review of soil heavy metal pollution from mines in China: Pollution and health risk assessment [J]. *Science of The Total Environment*, 2014, 468: 843—853.
- [2] Gallego S M, Pena L B, Barcia R A, *et al.* Unravelling cadmium toxicity and tolerance in plants: Insight into regulatory mechanisms [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2012, 83: 33—46.
- [3] 重金属污染综合防治“十二五”规划 [EB/OL]. [2020-03-16]. <https://www.dowater.com/info/2014-0-16/267638.html>.
- [4] 环境保护部《重金属污染综合防治“十二五”规划》2014 年度考核结果公布 [J]. *环境保护与循环经济*, 2015, 35 (11): 23.
- [5] Clemens S, Aarts MGM, Thomine S, *et al.* Plant science: the key to preventing slow cadmium poisoning [J]. *Trends in Plant Science*, 2013, 18(2): 92—99.
- [6] Yue R, Lu C, Qi J, *et al.* Transcriptome Analysis of Cadmium-Treated Roots in Maize (*Zea mays* L.) [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2016, 7: 719—729.
- [7] Xiang Y C, Guan C Y, Huang H, *et al.* Enhancement of Cadmium Accumulation by *Brassia juncea* and *B. napus* Using Indole-3-acetic Acid (IAA), Gibberellic Aid (GA) and 6-benzyladenine (6-BA) [J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2010, 31(4): 504—508.
- [8] Guo Q, Meng L, Mao P-C, *et al.* Role of exogenous salicylic acid in alleviating cadmium-induced toxicity in Kentucky bluegrass [J]. *Biochemical Systematics and Ecology*, 2013, 50: 269—276.
- [9] Li S, Chen J, Islam E, *et al.* Cadmium-induced oxidative stress, response of antioxidants and detection of intracellu-

- lar cadmium in organs of moso bamboo (*Phyllostachys pubescens*) seedlings [J]. Chemosphere, 2016, 153: 107—114.
- [10] Luo H, Li H, Zhang X, *et al.* Antioxidant responses and gene expression in perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.) under cadmium stress [J]. Ecotoxicology, 2011, 20(4): 770—778.
- [11] Wang Q, Liang X, Dong Y, *et al.* Effects of exogenous nitric oxide on cadmium toxicity, element contents and antioxidative system in perennial ryegrass [J]. Plant Growth Regulation, 2013, 69(1): 11—20.
- [12] Li Y M, Chaney R L, Siebielec G, *et al.* Response of Four Turfgrass Cultivars to Limestone and Biosolids—Compost Amendment of a Zinc and Cadmium Contaminated Soil at Palmerton, Pennsylvania [J]. Journal of Environmental Quality, 2000, 29(5): 1440—1447.
- [13] 孙吉雄. 草坪学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1995: 31—32.
- [14] 徐佩贤. 高羊茅和草地早熟禾对镉的耐受能力和解毒机制研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2014.
- [15] 鲜靖苹, 王勇, 马晖玲, 等. 外源 NO 对镉胁迫下草地早熟禾幼苗根系生长及生理的影响 [J]. 草原与草坪, 2020, 40(2): 73—78.
- [16] 刘燕. 甘肃野生草地早熟禾无融合生殖胚发生的内源激素调控研究 [D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2020.
- [17] Huybrechts M, Cuypers A, Deckers J, *et al.* Cadmium and Plant Development: An Agony from Seed to Seed [J]. International Journal of Molecular Sciences, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2019, 20(16): 3971.
- [18] Carvalho M E A, Piotto F A, Franco MR, *et al.* Cadmium toxicity degree on tomato development is associated with disbalances in B and Mn status at early stages of plant exposure [J]. Ecotoxicology, 2018, 27(10): 1293—1302.
- [19] Najeeb U, Jilani G, Ali S, *et al.* Insights into cadmium induced physiological and ultra-structural disorders in *Juncus effusus* L. and its remediation through exogenous citric acid [J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 186(1): 565—574.
- [20] Xue Z C, Gao H Y, Zhang L T. Effects of cadmium on growth, photosynthetic rate and chlorophyll content in leaves of soybean seedlings [J]. Biologia Plantarum, 2013, 57(3): 587—590.
- [21] Somashekaraiah B V, Padmaja K, Prasad A R K. Phytotoxicity of cadmium ions on germinating seedlings of mung bean (*Phaseolus vulgaris*): Involvement of lipid peroxides in chlorophyll degradation [J]. Physiologia Plantarum, 1992, 85(1): 85—89.
- [22] Myśliwa-Kurczel B, Strzałka K. Influence of Metals on Biosynthesis of Photosynthetic Pigments [G]//PRASAD M N V, STRZAŁKA K. Physiology and Biochemistry of Metal Toxicity and Tolerance in Plants. Dordrecht: Springer Netherlands, 2002: 201—227.
- [23] Parmar P, Kumari N, Sharma V. Structural and functional alterations in photosynthetic apparatus of plants under cadmium stress [J]. Botanical Studies, 2013, 54(1): 45.
- [24] Liu H, Wang H, Ma Y, *et al.* Role of transpiration and metabolism in translocation and accumulation of cadmium in tobacco plants (*Nicotiana tabacum* L.) [J]. Chemosphere, 2016, 144: 1960—1965.
- [25] Liu X, Peng K, Wang A, *et al.* Cadmium accumulation and distribution in populations of *Phytolacca americana* L. and the role of transpiration [J]. Chemosphere, 2010, 78(9): 1136—1141.
- [26] Chaneva G, Parvanova P, Tzvetkova N, *et al.* Photosynthetic Response of Maize Plants Against Cadmium and Paraquat Impact [J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2010, 208(1): 287—293.
- [27] Benavides M P, Gallego S M, Tomaro M L. Cadmium toxicity in plants [J]. Brazilian Journal of Plant Physiology, 2005, 17(1): 21—34.
- [28] Pinto E, Sigaud-kutner T C S, Leitão M A S, *et al.* Heavy Metal-Induced Oxidative Stress in Algae [J]. Journal of Phycology, 2003, 39(6): 1008—1018.
- [29] Zhao F Y, Han M M, Zhang S Y, *et al.* Hydrogen Peroxide—Mediated Growth of the Root System Occurs via Auxin Signaling Modification and Variations in the Expression of Cell—Cycle Genes in Rice Seedlings Exposed to Cadmium Stress [J]. Journal of Integrative Plant Biology, 2012, 54(12): 991—1006.
- [30] 朱瑞婷, 牛奎举, 张然, 等. 草地早熟禾 NAC 基因鉴定及非生物胁迫下表达模式分析 [J]. 草原与草坪, 2021, 41(4): 26—35.
- [31] 郭锋, 吴伟锋, 冯瑜, 等. 硒镉交互作用对西葫芦幼苗生长及抗氧化酶活性的影响 [J]. 核农学报, 2020, 34(10): 2335—2342.

- [32] 张晓娟, 庄枫红. 绿豆对镉胁迫的生理响应[J]. 湖北农业科学, 2020, 59(15): 71–74+79.
- [33] 王芳洲, 王友绍. Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 胁迫对秋茄幼苗可溶性蛋白和抗氧化酶活性的影响[J]. 生态科学, 2020, 39(4): 10–18.
- [34] Chaoui A, Jarrar B, EL Ferjani E. Effects of cadmium and copper on peroxidase, NADH oxidase and IAA oxidase activities in cell wall, soluble and microsomal membrane fractions of pea roots [J]. Journal of Plant Physiology, 2004, 161(11): 1225–1234.
- [35] Hedden P, Kamiya Y. GIBBERELLIN BIOSYNTHESIS: Enzymes, Genes and Their Regulation [J]. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology, 1997, 48(1): 431–460.
- [36] Ghorbanli M, Kaveh SH, Sepehr MF. Effects of Cadmium and Gibberellin on Growth and Photosynthesis of Glycine Max [J]. Photosynthetica, 2000, 37(4): 627–631.
- [37] Duan Q, Lee J, Liu Y, *et al.* Distribution of Heavy Metal Pollution in Surface Soil Samples in China: A Graphical Review [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2016, 97(3): 303–309.
- [38] Sachs T, Thimann K V. The Role of Auxins and Cytokinins in the Release of Buds from Dominance [J]. American Journal of Botany, 1967, 54(1): 136–144.
- [39] Gan S, Amasino R M. Inhibition of Leaf Senescence by Autoregulated Production of Cytokinin [J]. Science, American Association for the Advancement of Science, 1995, 270(5244): 1986–1988.
- [40] Verbruggen N, Hermans C, Schat H. Mechanisms to cope with arsenic or cadmium excess in plants [J]. Current Opinion in Plant Biology, 2009, 12(3): 364–372.
- [41] 刘柿良, 潘远智, 杨容子, 等. 外源一氧化氮对镉胁迫下长春花质膜过氧化、ATPase 及矿质营养吸收的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(02): 445–458.
- [42] 孙娟娟. 镁耐受型油菜品种的筛选及其响应缺镁胁迫机制研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2019.
- [43] Sanità di Toppi L, Gabbriellini R. Response to cadmium in higher plants [J]. Environmental and Experimental Botany, 1999, 41(2): 105–130.
- [44] Perfus-Barbeoch L, Leonhardt N, Vavasseur A, *et al.* Heavy metal toxicity: cadmium permeates through calcium channels and disturbs the plant water status [J]. The Plant Journal, 2002, 32(4): 539–548.

Analysis of ion absorption characteristics and physiological response characteristic of kentucky bluegrass under cadmium stress

CUI Ting, WANG Yong, WU Wan-xin, XIANG Hang, MA Hui-ling

(College of Pratacultural Science, Gansu Agricultural University, Key Laboratory of Grassland Ecosystem, Ministry of Education, Pratacultural Engineering Laboratory of Gansu Province, Sino-U. S. Center for Grazing land Ecosystem Sustainability, Lanzhou 730070, China)

Abstract: To investigate the physiological response and ion absorption of *Poa pratensis* to cadmium (Cd) stress, seedlings were raised by sand culture method, and plant height, root length, leaf and root fresh weight, photosynthetic indexes, antioxidant enzyme activities, leaf hormone levels and ion content of *Poa pratensis* under different concentrations of Cd stress were measured. The results showed that Cd stress inhibited the growth of Kentucky bluegrass, caused wilting and chlorosis, significantly reduced the contents of photosynthetic pigment, inhibited leaf transpiration rate, stomatal conductance, net photosynthetic rate and intercellular carbon dioxide concentration. The

results also demonstrated that with the increase of Cd stress concentration, the activities of CAT and POD in leaves decreased gradually, while the activities of CAT and POD in roots increased. In addition, Cd stress decreased the IAA and GA3 contents and increased the ZT content in leaves of *Poa pratensis*. Moreover, Most Cd was enriched in the root and less transferred to the leaves. Further, Cd stress resulted in decreased Zn^{2+} content, increased Mg^{2+} content in leaves, and decreased Mg^{2+} content in roots. In conclusion, Cd stress inhibit the growth, development, photosynthesis and ion absorption of Kentucky bluegrass, and Cd toxicity could be alleviated by regulating antioxidant enzyme activity and hormone level. The results of this study are expected to provide a theoretical basis for the treatment of Cd-contaminated soil.

Key words: Cadmium; kentucky bluegrass; photosynthesis; antioxidant enzyme; hormone; ion absorption

(上接 114 页)

Investigation and weed control in Shanghai Chenshan Botanical Garden

XING Qiang¹, HU Yong-hong¹, QIN Jun¹, CHENG Wen-jing²

(1. Shanghai Chenshan Botanical Garden, Shanghai 201602, China; 2. Shanghai Vocational College of Agriculture and Forestry, Shanghai 201699)

Abstract: As an important large park green space in Shanghai, Chenshan Botanical Garden not only satisfies people's recreation and leisure needs, but also has the core function of introducing and conserving the genetic germplasm resources of east China flora. The contradiction between limiting the use of weed chemical herbicides and the spread of weeds is prominent. In order to solve the contradiction, sample method was used to investigate the species, occurrence period and distribution of weeds in the botanical garden. It was found that there were 108 species of weeds in the primary plant conservation area of Chenshan Botanical Garden, 49 species of weeds in the central artificial garden, and 19 species of weeds under the two types of vegetation. Compositae and gramineae accounted for the majority of weeds, accounting for 15.2% and 11.6%, respectively. The species of weeds mainly occurred in March of spring and summer and July of summer and autumn, and the occurrence time of weeds was consistent with the annual occurrence regularity of "dicotyledonous weeds - monocotyledonous weeds - dicotyledonous weeds" and "perennial weeds - annual weeds - perennial weeds". On the basis of investigation and analysis of weed occurrence, according to the weed harm grade, through physical and chemical comprehensive control measures to compare the control effect of the two background turf grass species, it is concluded that the grass with zoysia 'Belair' as the background can achieve the best weed control effect in July. This systematic weed control strategies could provide valuable reference methods for other botanical gardens and parks.

Key words: botanical garden; introduction and conservation; weed; integrated control