申须仁,董名扬,王朝勇,等.高锰胁迫对香根草矿质元素吸收及光合系统的影响[J].农业环境科学学报,2019,38(10):2297-2305. SHEN Xu-ren, DONG Ming-yang, WANG Chao-yong, et al. Effects of high manganese stress on the mineral element absorption and photosynthetic system of vetiver grass[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(10): 2297-2305.

高锰胁迫对香根草矿质元素吸收及光合系统的影响

申须仁^{1,2},董名扬¹,王朝勇¹,王杰¹,周强^{1,3*}

(1. 吉首大学植物资源保护与利用湖南省高校重点实验室,湖南 吉首 416000; 2. 锰锌钒产业技术协同创新中心,湖南 吉首 416000; 3. 锰锌矿业重金属污染综合防治技术湖南省工程实验室,湖南 吉首 416000)

摘 要:为了探讨高锰(Mn)胁迫对香根草矿质元素吸收、光合系统的影响,揭示香根草对高Mn胁迫的耐受能力、Mn积累特征及 生理响应,通过水培试验,研究不同浓度Mn胁迫(15、30、60、120 mmol·L⁻¹)下香根草叶绿素含量SPAD值、光合以及叶绿素荧光指 标、K、Mg、Fe元素含量等生理生化指标的变化。在Mn处理下,香根草的SPAD值、叶片含水率、株高、植株干物质质量、K含量、净 光合速率(P_n)、潜在最大电子传导率(*ETR*_{max})等参数均呈现出下降的趋势。但在15~60 mmol·L⁻¹Mn处理下,香根草的植株干物质 质量为对照的77.6%~88.1%;光系统II最大光化学效率(F_e/F_m)、SPAD值等部分参数接近正常水平或降幅较小;且根叶中的Mn 含量分别为14 393~18 845 mg·kg⁻¹和4118~4782 mg·kg⁻¹;根中的Mn富集系数也大于1。此外,还发现在30~120 mmol·L⁻¹Mn处理 下,根中的Mn含量没有明显差异,但根部的Mn富集系数持续下降;而在15~60 mmol·L⁻¹处理下,叶中的Mn含量和转移系数没有 明显差异。在Mn胁迫下,随着光照强度的增加,非调节性被动能量耗散Y(NO)保持稳定,而调节性主动耗散Y(NPQ)增加。高 Mn处理下叶中K含量有小幅降低,Mg和Fe的含量基本维持稳定。但根中K和Mg的含量大幅度下降,而Fe则显著增加。香根草 对 60 mmol·L⁻¹以下的Mn胁迫有较好的耐受和积累能力,具有修复Mn污染环境的潜力。限制Mn离子的吸收和转运、增加PSII 调节性能量耗散消耗、维持叶中Mg、Fe的相对稳定是香根草对高Mn胁迫的适应性响应。

关键词:Mn胁迫;香根草;矿质元素;光合作用;植物修复

中图分类号:X171.5 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2019)10-2297-09 doi:10.11654/jaes.2019-0319

Effects of high manganese stress on the mineral element absorption and photosynthetic system of vetiver grass SHEN Xu-ren^{1,2}, DONG Ming-yang¹, WANG Chao-yong¹, WANG Jie¹, ZHOU Qiang^{1,3*}

(1.Key Laboratory of Plant Resources Conservation and Utilization, College of Hunan Province, Jishou University, Jishou 416000, China;
2. The Collaborative Innovation Center of Manganese–Zinc–Vanadium Industrial Technology, Jishou 416000, China;
3. Hunan Provincial Engineering Laboratory of Control and Remediation of Heavy Metal Pollution from Mn–Zn Mining, Jishou 416000, China)

Abstract: In this study, we investigated the effect of manganese stress on metal absorption and the photosynthetic system of *Vetiveria zizani*oides and determined this plant's tolerance, accumulation, and physiological responses under high Mn stress. Seedlings of *V. zizanioides* were treated for 60 days with half-strength Hoagland nutrient solution containing normal Mn (control) or 15, 30, 60, or 120 mmol·L⁻¹ Mn-SO₄, and, thereafter, the morphological, photosynthetic, and chlorophyll fluorescence parameters and the content of mineral elements were measured. The results showed that SPAD, leaf water content, plant height, plant dry weight, potassium content, net photosynthetic rate (P_n), and potential maximum electron conductivity (*ETR*_{max}) showed a decreasing trend in response to an increasing concentration of applied Mn. Under 15~60 mmol·L⁻¹ Mn treatments, the dry weights of the plants were between 77.6% and 88.1% of those of the control. In contrast, F_n /

收稿日期:2019-03-24 录用日期:2019-06-10

作者简介:申须仁(1992—),男,湖南长沙人,硕士研究生,从事修复生态学研究。E-mail:2833316897@qq.com

^{*}通信作者:周 强 E-mail:6494796@qq.com

基金项目:国家自然科学基金项目(31300337,31860117);锰锌钒产业技术协同创新中心研究课题(2017mzvg008)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China (31300337, 31860117); The Collaborative Innovation Center of Manganese-Zinc-Vanadium Industrial Technology(2017mzvg008)

农业环境科学学报 第38卷第10期

 F_m and SPAD showed no significant changes. The Mn contents in roots and leaves were 14 393~18 845 mg·kg⁻¹ and 4118~4782 mg·kg⁻¹, respectively. The accumulation coefficients of Mn in the roots were above 1. Although the content of Mn in the roots showed no significant changes, the Mn accumulation coefficients of Mn decreased under 30~120 mmol·L⁻¹ Mn treatments. The content of Mn and the translocation coefficient in the leaves showed no significant changes in response to treatment with 15~60 mmol·L⁻¹ Mn. Under Mn stress, non-regulatory passive energy dissipation [Y(NO)] remained stable, whereas regulatory active energy dissipation [Y(NO)] increased with increasing light intensity. The K content in the leaves decreased slightly, whereas Mg and Fe content remained relatively stable. In contrast, K and Mg content in the roots decreased significantly, whereas the content of Fe increased significantly. Vetiver grass shows Mn tolerance and accumulation in response to high Mn stress(below 60 mmol·L⁻¹ Mn), which indicates that vetiver grass could be used for the phytoremediation of Mn-polluted environments. Furthermore, limiting the absorption and translocation of Mn, increasing PS II regulatory active energy dissipation, and maintaining stable Mg and Fe content in the leaves might be the adaptive responses of *V. zizanioides* to high Mn stress. **Keywords**; Mn stress; vetiver grass; mineral element; photosynthesis; phytoremediation

锰(Mn)是植物代谢过程中必需的微量元素,当 Mn含量超标时,植物会发生Mn毒反应,对植物的产 量、生长发育、光合作用、矿质营养吸收等生理代谢活 动均产生负面的影响^[1-2]。Mn毒害也被认为是限制植 物在酸性及渍水土壤生长的重要因素^[3]。在我国南 方地区的酸性土壤中、pH较低的水稻土壤中以及Mn 矿区及尾渣库区的土壤中,Mn离子大量积累,对农作 物生长及农产品环境安全造成巨大的危害^[4]。尤其 是在矿区,Mn元素可以通过各种途径进入农田土壤 中^[5],灌溉农田土壤中Mn含量可达5700 mg·kg⁻¹,其 最大值可达10 000 mg·kg⁻¹。矿渣堆周边的农田土壤 Mn含量也接近1000 mg·kg⁻¹,蔬菜中的Mn含量超过 正常值5~80倍,亟待治理^[6-7]。

近年来,重金属植物修复技术日益受到社会的重 视和关注^[8]。香根草[Vetiveria zizanioides(L.) Nash]是 禾本科香根草属多年生C4类草本植物,根系发达、生 物量大,每年干草产量可达100 t·hm⁻²。能够适应旱 涝、酸碱等多种环境,并对多种重金属都有较强的耐 受和积累能力,已广泛应用于环境修复领域[9-10]。其 在农田生态系统中也有较广泛的应用。通过与作物 间作,香根草可以防止农田水土流失、诱集作物害虫、 修复多环芳烃污染土壤等[11-12]。所以,香根草在农业 及废弃地的生态修复领域有着良好的应用前景。但 目前对于采用植物修复技术治理高Mn污染的基础和 应用研究较少,香根草对高Mn胁迫耐受和生理响应 也未见报道。所以,本文采用实验室水培试验,研究 高Mn胁迫对香根草矿质元素吸收和光合系统的影 响,揭示香根草对高Mn胁迫的耐受范围、Mn积累特 征及生理响应,以期为香根草用于高 Mn 污染地区环 境修复提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验所用香根草由试验室长年种植在未受污染的苗圃中,在试验准备阶段,将分蘖繁殖得到的香根草幼苗单株培养,挑选长势健壮的香根草(苗龄5个月)置于1/2Hoagland营养液中培养,待其恢复生长后进行 Mn 胁迫处理。

1.2 试验设计

每3株香根草固定于1个500 mL塑料盆中,以1/ 2Hoagland营养液作为培养液,Mn以MnSO4·H₂O的形 式直接加入营养液中。以1/2Hoagland营养液作为对 照处理,其他处理组的Mn浓度分别为:15、30、60、 120 mmol·L⁻¹,营养液pH调节至5.8,并隔日更换。于 植物培养箱中生长60 d。培养条件为昼夜温度分别 为(28±2)℃和(22±2)℃;白昼16 h·d⁻¹;光照强度 1000 μ mol·m⁻²·s⁻¹。每处理设置3个重复(即每处理3 盆9株苗)。

1.3 含水率、株高、SPAD值、植株干物质质量的测定

将植物用去离子水多次冲洗,吸干表面水分称鲜 质量。分离根、叶组织,在105℃下杀青20min,70℃ 下烘48h至恒质量,冷却至室温后称干质量(即整个 植株干物质质量)。植物含水率=(鲜质量 – 干质量)/ 鲜质量×100%。植物株高用卷尺测量基部到叶片最 高点的高度。采用SPAD-502叶绿素仪(Konica Minolta Sensing,日本)夹取植物倒3或倒4叶的1/4处和 3/4处测量植物SPAD值。

1.4 Mn及矿质元素含量的测定

将香根草干样粉碎过60目筛。称取0.1g并加入 HNO₃和HClO₄(V:V=4:1)静置6~8h,然后于石墨消 解仪消煮至溶液澄清,冷却并定容于25 mL,再经滤纸过滤,于安捷伦240fs火焰原子吸收光谱仪(安捷伦,美国)测定矿质元素含量^[13];以24种金属元素混合标准液(GSB04-1767-2004)配制5个梯度浓度的标准液,制作标准曲线。每测定5~10个样品,将仪器重新置零,并测量一个浓度的标准品,以监测仪器的稳定性。

1.5 Mn富集系数与转移系数的测定^[14]

Mn的根系富集系数=Croot/C solution

Mn的转移系数=Cleaf/Croot×100%

富集量=W_{root}×C_{root}+W_{leaf}×C_{root}

式中:C_{solution}表示培养液中的Mn含量;C_{root}表示根中的Mn含量;C_{leaf}表示叶中的Mn含量;W_{root}表示根的干物质量;W_{leaf}表示叶的干物质量。

1.6 光合作用参数的测定

采用 Li-6400 便携式光合仪(LICOR,美国)于 9:30—11:00进行测定,植物先在阳光下进行充分光 诱导,然后进行光合测量。叶室光强根据环境光强设 置为 1300 μmol·m⁻²·s⁻¹,净光合速率(*P_n*)、气孔导度 (Cond)、胞间二氧化碳浓度(*C_i*)、蒸腾速率(Trmmol) 均从仪器直接读取。

1.7 叶绿素荧光参数的测定

采用 PAM-2500(Walz,德国)于 20:00 以后进行 测定,植物先放置在黑暗环境下进行 30 min 暗适应。 梯度作用光强为 8、16、32、90、165、245、325、430、 580、770、1100、1400、1700 μ mol·m⁻²·s⁻¹,测定间隔为 30 s。PS II 最大光化学效率(F_e/F_m)、潜在最大电子传 导率(*ETR*_{max})直接从仪器上读取,PS II 实际光化学效 率[Y(II)]、调节性主动耗散[Y(NPQ)]、非调节性被动 能量耗散[Y(NO)]均通过系统自动拟合得出。

1.8 数据分析

以上试验数据使用 SPSS 20.0 进行 Tukey 算法以 及多重比较分析,显著性水平为 P<0.05,数据均以平 均值±标准误表示。并采用该软件中 Pearson 相关系 数和双侧显著性检验进行相关性分析。

2 结果与分析

2.1 Mn对香根草 SPAD、含水率、株高、植株干物质质量的影响

50 ſ 90 В А 叶含水率Leaf water content/% 40 SPAD 值 SPAD values b 60 h 30 20 30 Ŧ 10 0 0 30 60 120 30 60 120 CK 15 CK 15 Mn浓度 Mn concentration/mmol·L⁻¹ Mn浓度 Mn concentration/mmol·L⁻¹ 180_Γ 植株干物质质量 Plant dry weight/g С ab 24 h **株高 Plant height/cm** ah 135 Ŧ h h 18 90 12 45 6 0 0 CK 15 30 60 120 CK 15 30 60 120 Mn浓度 Mn concentration/mmol·L⁻¹ Mn浓度 Mn concentration/mmol·L⁻¹ 不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05)。下同

与对照相比,15、30 mmol·L⁻¹Mn处理中,SPAD略

The different lowercase letters indicate significant differences among treatments (P<0.05). The same below

图1 不同浓度 Mn 对香根草 SPAD 值(A)、叶片含水率(B)、株高(C)和植株干物质质量(D)的影响

 $Figure \ 1 \ Effects \ of \ different \ concentrations \ of \ manganese \ on \ SPAD(A), leaf \ water \ content(B), plant \ height(C) \ and \ a$

plant dry weight(D) of vetiver grass



微下降,但未达到显著差异水平;当 Mn 处理浓度在 60 mmol·L⁻¹和120 mmol·L⁻¹时其出现显著性下降,且 在120 mmol·L⁻¹时,SPDA 值最低,仅为对照的35.5% (图1A)。而香根草的含水率、株高、植株干物质质量 在 Mn 处理浓度>30 mmol·L⁻¹时即出现明显的降低, 株高、植株干物质质量下降已达到显著差异水平。随 着 Mn 处理浓度的增加,3个参数下降的幅度更大。 在120 mmol·L⁻¹时,其分别为对照组的51.5%、70.3% 和50.5%(图1B、图1C、图1D)。

2.2 Mn 对香根草 Mn 含量、富集系数和转移系数的 影响

Mn处理的根、叶中Mn含量均显著高于对照。在

农业环境科学学报 第38卷第10期

根部,30~120 mmol·L⁻¹处理组间的 Mn含量没有明显 差异,且显著高于 15 mmol·L⁻¹ Mn 处理组(图 2A)。 而在叶中,15~60 mmol·L⁻¹处理组间的 Mn含量没有 明显差异,但在 120 mmol·L⁻¹ Mn 处理时出现大幅度 上升(图 2B)。其转移系数的变化与叶片中的 Mn含 量变化一致。在 15~60 mmol·L⁻¹ Mn 处理下,转移系 数为 24.5%~28.1%,在 120 mmol·L⁻¹时,转移系数增 加至 66.5%(图 2C)。香根草根系对 Mn 的富集系数随 着 Mn 处理浓度的增加而显著降低,在 120 mmol·L⁻¹ 时降至 2.9; Mn 处理下根系的 Mn 富集系数始终大于 1 (图 2D)。而富集量则在 99.9~135.1 mg·株⁻¹间波动。 其中,120 mmol·L⁻¹处理下的富集量要显著高于 30、



Figure 2 Effects of different concentrations of manganese on manganese content in roots and leaves, and transfer coefficients enrichment coefficients and bioaccumulation quantity

60 mmol·L⁻¹处理(图 2E)。

2.3 Mn对香根草K、Mg、Fe吸收的影响

Mn处理的根、叶中K含量呈现下降的趋势,当处 理浓度≥30 mmol·L⁻¹时,达到显著性差异,其中,根中 K含量的下降幅度远大于叶中(图3A)。根中的Mg 含量在Mn处理下显著下降,仅为对照的25.5%~ 39.4%,且Mn处理组之间的变化较小(图3B)。根的 Fe含量则与Mg的变化相反,在Mn处理下呈现出不





Figure 3 Effect of different concentrations of manganese on the absorption of K , Mg and Fe in vetiver grass

同程度的增幅,比对照组增加了1.9~3.9倍(图3C)。 与对照相比,叶中Mg和Fe的含量在各处理组有上升 和下降不同的变化,但变化幅度总体不大(图3B、图 3C)。

2.4 Mn对香根草光合作用的影响

与对照组相比,Mn处理下P_n显著降低了37.3%~ 81.0%,并随着Mn浓度的增加而总体呈下降趋势。 尤其在120 mmol·L⁻¹处理组,其P_n值仅为对照的 19.0%(图4A)。与P_n变化趋势相反,C_i在Mn处理下 显著高于对照,且Mn处理组间的C_i较为相似(图 4C)。Trmmol和Cond的变化趋势一致,在15 mmol· L⁻¹处理组中,其与对照组无明显变化,在30、60 mmol·L⁻¹处理下则出现一定程度的增加,但在120 mmol·L⁻¹处理下则出现大幅度的下降,并显著低于对 照水平(图4B、图4D)。

2.5 Mn对香根草叶绿素荧光参数的影响

Mn处理下香根草的 F_v/F_m 和 ETR_{max} 均呈现下降 的趋势。 ETR_{max} 在 15 mmol·L⁻¹处理下即出现显著的 下降,在 60~120 mmol·L⁻¹下降的幅度更大(图 5B)。 而 F_v/F_m 在 15~30 mmol·L⁻¹处理下保持稳定,当 Mn浓 度上升至 60、120 mmol·L⁻¹时,其显著低于对照组(图 5A)。随着光强的增加, $Y(\Pi)$ 呈现下降的趋势,而 Y(NPQ)呈现上升的趋势,Y(NO)基本保持稳定。Mn 处理组的 $Y(\Pi)$ 均低于对照,而 Y(NO)均高于对照 (图 5C、图 5E);15、30 mmol·L⁻¹Mn胁迫下,Y(NPQ)接 近或低于对照;而 30~120 mmol·L⁻¹Mn胁迫下,Y(NPQ)总体高于对照(图 5D)。

3 讨论

3.1 香根草对 Mn 胁迫的 Mn 耐受和积累能力及特点

过量的 Mn 会对植物产生一系列的生理毒害作用,多数植物对 Mn 的耐受浓度通常低于 15 mmol·L⁻¹。仅有水蓼^[15]、木荷^[16]等 Mn 超富集植物能够耐受高浓度的 Mn 胁迫。考虑到矿区土壤中可能存在高浓度的 Mn 离子,所以,本研究中设置的 Mn 处理浓度达到了 120 mmol·L⁻¹,与金政等^[16]在木荷研究使用 Mn 浓度接近。PS II 的最大量子产量(*F_e*/*F_m*)是衡量原初光能捕获的最大能力的指标,植物处于逆境下,*F_e*/*F_m*下降,其直接反映植物受到外界胁迫程度^[17]。植物叶绿素含量降低也是高 Mn 导致的胁迫伤害症状之一^[18]。诸多研究表明在 Mn 胁迫下植物的 *F_e*/*F_m*和叶绿素含量会明显下降^[19-20]。本研究发现,香根草 *F_e*/*F_m*(图 5A)和 SPAD(图 1A)在 15~60 mmol·L⁻¹内接近正常水



intercellular carbon dioxide concentration (C_i) and transpiration rate(Trmmol) of vetiver grass

农业环境科学学报 第38卷第10期

平,植株干物质量(图1D)也能维持在对照的77.6%~ 88.1%。说明香根草能够耐受60 mmol·L⁻¹以下的 Mn 环境,具有良好的Mn耐受能力。在60 mmol·L⁻¹以下的 Mn处理中,根和叶中的Mn含量分别为14 393~18 845 mg·kg⁻¹和4118~4782 mg·kg⁻¹;并且,根中的Mn富集 系数也大于1。总体而言,香根草有良好的 Mn 积累 能力,远超于大多数植物(20~500 mg·kg⁻¹)^[19]。而且, 在15~60 mmol·L⁻¹的 Mn环境下,根中的 Mn含量已经 达到Mn 超积累植物的标准(Mn含量大于10000 mg· kg⁻¹)^[19],叶中的Mn含量达到该标准的40%。此外,试 验中香根草 Mn的富集量在15~60 mmol·L⁻¹的 Mn环 境中差异不显著,可达99.9~115.2 mg·株⁻¹。由于试 验用苗是苗期,其生物量并不大(对照组生物量仅 23.4 g·株⁻¹),导致富集量偏小,有研究报道在4株· m⁻²密度下,经过8个月的生长,香根草的每株生物量 可达300 g^[21],据此推测,香根草在高Mn环境中富集 量相当可观,显示其具有用于高Mn污染环境修复的 潜力。

在Mn处理下,香根草根部Mn的含量高于叶片, Mn转移系数为24.5%~28.1%(图2A、图2B、图2D), 说明香根草的根部是富集 Mn 的主要器官, 刘云国 等^[22]的研究也表明香根草根部是Cd离子的主要富集 部位。随着 Mn浓度的增加,根、叶中 Mn含量表现出 不一样的变化。在30~120 mmol·L⁻¹Mn处理下根中 的 Mn 含量保持稳定(图 2A)。在 15~60 mmol·L⁻¹处 理下叶中的 Mn 含量和转移系数无显著差异;但在 120 mmol·L⁻¹处理下,叶中Mn含量和转移系数均出 现大幅度的增加(图2B、图2D)。结果表明在一定Mn 浓度内,香根草根、叶中的Mn离子并没有随着Mn处 理浓度的增加而递增。在木荷的根中也发现了类似 的现象[16]。这可能是在高 Mn 环境中,香根草存在着 限制 Mn 吸收和向叶片转运的机制。在超高 Mn 浓 度下(120 mmol·L⁻¹),可能由于该机制受到破坏,才 导致 Mn 离子向地上部位运输增加, 叶中 Mn 离子大 量积累。

3.2 光合系统和矿质元素吸收对高 Mn 胁迫的响应

Mn过量会产生大量的活性氧,破坏叶绿素,影响 PSI与PSI的活性,降低植物的光合速率^[23]。水稻 等农作物在Mn毒害下光合速率会显著降低,光合系 统的有关基因表达会发生改变^[24-25],本研究发现,香 根草光合作用受抑制程度与Mn处理浓度、根、叶中 Mn含量呈极显著负相关(表1)。P_n显著下降,C_i显著 增高(图4A、图4C),同时,ETR_{max}、Y(Ⅱ)也显著下降 (图5B、图5C),这说明造成香根草光合速率下降的主要因素并不是气孔受限,而是光合系统和光合代谢活动受到了损伤。在Mn胁迫下,随着光照强度的增加, Y(NO)保持稳定,而Y(NPQ)显著增加(图5D、图5E), 表明PSII以热耗散等保护性调节机制消耗的光能增加。Y(NPQ)的增加是植物的一种保护机制^[26]。梁文斌等^[19]也认为是Mn超积累植物垂序商陆的保护机制之一。

植物体内矿质元素平衡是其正常生长发育的必

要条件,重金属胁迫会改变植物体内矿质元素的吸收 与分布^[27]。本研究选取了大量元素K、中量元素Mg、 微量元素Fe作为阳离子矿质元素的代表进行分析, 结果显示,在高浓度Mn胁迫下,植物体内的3种元素 在根、叶中表现出不同的变化趋势。在叶中,除K含 量有一定程度的降低外(图3A),Mg和Fe的含量基本 维持稳定(图3B、图3C)。但在根中,K和Mg的含量 均出现大幅度下降(图3A、图3B),而Fe则显著增加 (图3C)。相关性分析发现,根、叶中的K含量和根中



效率[Y(Ⅱ)]、光系统Ⅱ调节性能量耗散[Y(NPQ)]、光系统Ⅱ非调节性能量耗散[Y(NO)]的影响

Figure 5 Effects of different concentrations of manganese on maximum photochemical efficiency (F_v/F_m) , potential maximum relative electron conductivity (ETR_{max}) , quantum efficiency of photosystem II [Y(II)], down-regulation energy dissipation [Y(NPQ)], non-light induced energy dissipation[Y(NO)] of vetiver grass

农业环境科学学报 第38卷第10期

表1 处理溶液及根叶中Mn含量与香根草净光合速率、根叶中K、Mg含量的相关系数

 Table 1 Correlation coefficients between Mn contents in solutions, roots, leaves and net photosynthetic rate or K and

 Mg contents in roots, leaves of vetiver grass

	U		8		
	净光合速率	根中K含量	叶中K含量	根中 Mg含量	叶中 Mg含量
	P_n	K contents in roots	K contents in leaves	Mg contents in roots	Mg contents in leaves
Mn处理浓度Mn contents in solutions	-0.727**	-0.818**	-0.804**	-0.597*	0.221
根中 Mn 含量 Mn contents in roots	-0.751**	-0.766**	-0.846**	-0.985**	0.029
叶中Mn含量Mn contents in leaves	-0.767**	-0.684**	-0.704**	-0.651**	0.438

注:*P<0.05;**P<0.01。

的 Mg含量与根、叶中 Mn 的含量呈极显著负相关(表 1)。这可能是因为高 Mn 能抑制植物对 K、Mg 的吸 收^[28-29]。本试验发现根、叶中 K 含量与植株干物质质 量和 F_e/F_m 呈极显著正相关(相关系数为 0.675 和 0.674,0.772 和 0.750),暗示 K 营养在香根草耐受高 Mn 胁迫中具有重要的作用。此外,有研究发现 Mn 胁 迫下 Mn 耐受型水稻根、叶中的 Fe 含量增加^[28]。香根 草根中 Fe 含量的增加可能是 Mn 耐受力强的表现。 但有关机制还未见报道。

4 结论

香根草能够长时间耐受60 mmol·L⁻¹以下的Mn环境,并能够在根、叶中积累高含量的Mn,具有修复Mn污染环境的潜力。限制Mn离子的吸收和转运、增加PSII调节性能量耗散消耗、维持叶中Mg、Fe的相对稳定是香根草对高Mn胁迫的适应性响应。

参考文献:

- Millaleo R, Reyes D M, Ivanov A G, et al. Manganese as essential and toxic element for plants: Transport, accumulation and resistance mechanisms[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2010, 10 (4): 470–481.
- [2] Santos E F, Kondo S, José M, et al. Physiological highlights of manganese toxicity symptoms in soybean plants: Mn toxicity responses[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2017, 113:6–19.
- [3] Foy C D, Chaney R L, White M C. The physiology of metal toxicity in plants[J]. Annual Review of Plant Physiology, 1978, 29(1):511-566.
- [4] 臧小平. 土壤 Mn 毒与植物 Mn 的毒害[J]. 土壤通报, 1999, 30(3): 139-141.

ZANG Xiao-ping. Soil manganese toxicity and plant manganese toxicity[J]. *Chinese Journal of Science*, 1999, 30(3):139–141.

[5] 贾赵恒, 罗 瑶, 沈友刚, 等. 大冶龙角山矿区农田土壤重金属形态 分布及其来源[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(2):264-271.

JIA Zhao-heng, LUO Yao, SHEN You-gang, et al. Speciation, distribution and sources of heavy metals in agricultural soils from the mining area of Longjiao Mountain in Daye City[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(2):264-271.

[6] 祝 滔, 江长胜, 郝庆菊, 等. 重庆秀山 Mn 矿区土壤和植物 Mn 污染

调查与评价[J]. 环境科学与技术, 2012, 35(9):167-172.

ZHU Tao, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju, et al. Investigation and assessment of contaminated soils and plants by Mn in manganese mining area in Xiushan autonomous county of Chongqing[J]. *Environmental Science and Technology*, 2012, 35(9):167–172.

[7] 黄小娟, 江长胜, 郝庆菊. 重庆溶溪 Mn 矿区土壤重金属污染评价及 植物吸收特征[J]. 生态学报, 2014, 34(15):4201-4211.

HUANG Xiao-juan, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju. Assessment of heavy metal pollutions in soils and bioaccumulation of heavy metals by plants in Rongxi Manganese mineland of Chongqing[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(15):4201-4211.

- [8] Raskin I, Smith R D, Salt D E. Phytoremediation of metals: Using plants to remove pollutants from the environment[J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 1997, 8(2):221–226.
- [9] 徐礼煜, 夏汉平. 香根草系统的理论与实践[M]. 北京:中国广播电 视出版社, 2008:20-27.

XU Li-yu, XIA Han-ping. Theory and practice of vetiver system[M]. Beijing: China Radio and Television Press, 2008:20-27.

 [10]周 强, 胡淑宝, 王青青, 等.6种生态型香根草光合光响应特征及 光合参数日变化的比较[J]. 生态与农村环境学报, 2015, 31(5): 690-696.

ZHOU Qiang, HU Shu-bao, WANG Qing-qing, et al. Comparison between six ecotypes of vetiver grasses in photosynthetic light response and diurnal variation of photosynthetic parameters[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2015, 31(5):690–696.

- [11] 鲁艳辉,白 琪,郑许松,等.不同地理种群二化螟对诱集植物香根草的选择趋性比较[J]. 植物保护学报, 2017, 44(6):968-972.
 LU Yan-hui, BAI Qi, ZHENG Xu-song, et al. Selective tropism of different geographical populations of *Chilo suppressalis* to the trapping vetiver grass, *Vetiveria zizanioiaes*[J]. *Journal of Plant Protection*, 2017, 44(6):968-972.
- [12] 王娇娇,呼世斌,魏丽琼,等.甜菜与牧草间作对多环芳烃污染土 壤的修复作用[J].农业环境科学学报,2016,35(6):1090-1096.
 WANG Jiao-jiao, HU Shi-bin, WEI Li-qiong, et al. Phytoremediation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) - contaminated soil by intercropped beet-grasses[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2016, 35(6):1090-1096.
- [13] Zhou Q, Yu B J. Changes in content of free, conjugated and bound polyamines and osmotic adjustment in adaptation of vetiver grass to water deficit[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2010, 48 (6) : 417-425.

- [14] 陈 立,王 丹,龙 婵,等.三种螯合剂对芥菜修复铀镉复合污染土壤的影响[J].农业环境科学学报,2018,37(8):1690-1697.
 CHEN Li, WANG Dan, LONG Chan, et al. Effects of three kinds of chelating agents on U and Cd phytoremediation in *Brassica juncea* L.
 [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(8):1690-1697.
- [15] 王 华,唐树梅,廖香俊,等.超积累植物水蓼吸收Mn的生理与分子机制[J].云南植物研究,2008(4):489-495.
 WANG Hua, TANG Shu-mei, LIAO Xiang-jun, et al. Physiological and molecular mechanisms of Mn uptake by hyperaccumulting plant *Polygonum hydropiper* (Polygonaceae) [J]. *Acta Botanica Yunnanica*, 2008(4):489-495.
- [16] 金 政, 李俊凯, 刘群录. Mn 胁迫对 Mn 超富集植物西南木荷矿质 元素吸收的影响[J]. 上海交通大学学报(农业科学版), 2018, 36 (1):24-29.

JIN Zheng, LI Jun-kai, LIU Qun-lu. Influence of Mn stress on mineral elements assimilation by Mn hyperaccumulator *Schima wallichii*[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2018, 36(1):24–29.

- [17] Yamazaki J Y, Kamata K, Maruta E. Seasonal changes in the excess energy dissipation from photosystem II antennae in overwintering evergreen broad-leaved trees Quercus myrsinaefolia and Machilus thunbergii[J]. Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology, 2011, 104(1/2):348-356.
- [18] Hauck M, Paul A, Gross S, et al. Manganese toxicity in epiphytic lichens: Chlorophyll degradation and interaction with iron and phosphorus[J]. Environmental and Experimental Botany, 2003, 49 (2): 181– 191.
- [19] 梁文斌,薛生国,沈吉红,等. Mn胁迫对垂序商陆光合特性及叶绿 素荧光参数的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(3):619-625.
 LIANG Wen-bin, XUE Sheng-guo, SHEN Ji-hong, et al. Effects of manganese stress on photosythesis and chlorophyll fluorescence parameters of *Phytolacca americana*[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30 (3):619-625.
- [20] Emamverdian A, Ding Y, Mokhberdoran F, et al. Heavy metal stress and some mechanisms of plant defense response[J]. *Scientific World Journal*, 2015:756120.
- [21] 刘金祥,张 涛,许小玉.种植密度对香根草生长动态及生物量的 影响[J]. 湖北农业科学, 2013, 52(17):4126-4129.
 LIU Jin-xiang, ZHANG Tao, XU Xiao-yu. Effects of planting density

on growth dynamics and biomass of vetiver[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2013, 52(17):4126-4129.

- [22] 刘云国, 宋筱琛, 王 欣, 等. 香根草对重金属镉的积累及耐性研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2010, 37(1):75-79.
 LIU Yun-guo, SONG Xiao-chen, WANG Xin, et al. Study of the cadmium accumulation and tolerance of *Vetiveria zizanioides*[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2010, 37(1):75-79.
- [23] Millaleo R, Reyes-Díaz M, Alberdi M, et al. Excess manganese differentially inhibits photosystem I versus II in Arabidopsis thaliana[J]. Journal of Experimental Botany, 2013, 64(1):343-354.
- [24] Lidon F C, Barreiroc M G, Ramalhob J C. Manganese accumulation in rice: Implications for photosynthetic functioning[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2004, 161:1235-1244.
- [25] Li P, Song A L, Li Z J, et al. Silicon ameliorates manganese toxicity by regulating both physiological processes and expression of genes associated with photosynthesis in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *Plant and Soil*, 2016, 397(1):289–301.
- [26] Badger M R, Von C S, Ruuska S, et al. Electron flow to oxygen in higher plants and algae: Rates and control of direct photoreduction (Mehler reaction) and rubisco oxygenase[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*: *Biological Sciences*, 2000, 355 (1402): 1433-1446.
- [27] 翁南燕,周东美,武 敬,等.铜镉复合胁迫下温度对小麦幼苗生长及其对铜、镉和矿质营养元素吸收与各元素在亚细胞分布的影响[J].生态毒理学报,2011,6(6):607-616.
 WENG Nan-yan, ZHOU Dong-mei, WU Jing, et al. Uptake, subcellular distributions of Cu, Cd and mineral elements, and plant growth for wheat seedlings under stress of Cu and Cd as affected by temperature [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2011, 6(6):607-616.
- [28] 李 萍, 宋阿琳, 李兆君, 等. 硅对 Mn 胁迫下水稻吸收矿质元素的影响[J]. 环境科学学报, 2015, 35(10):3390-3398.
 LI Ping, SONG A-lin, LI Zhao-jun, et al. Silicon-mediated mineral elements in rice (*Oryza sativa* L.) under excess manganese stress[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, 35(10):3390-3398.
- [29] Pittman J K. Managing the manganese: Molecular mechanisms of manganese transport and homeostasis[J]. New Phytologist, 2005, 167(3): 733-742.