

Pb²⁺和Zn²⁺胁迫下3种草坪草光合特征及吸附重金属能力差异性

杨军银,李强,纪童,何国兴,关文昊,刘志刚,柳小妮*

(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 730030)

摘要:【目的】探索Pb²⁺、Zn²⁺污染地区最适宜的修复草坪草品种。【方法】采用盆栽的方法,以黑麦草(*Lolium perenne*)、高羊茅(*Festuca arundinacea*)和草地早熟禾(*Poa pratensis*)为研究对象,以河沙为栽培基质,测定各处理的光合指标和重金属含量。设置不加重金属(CK)、Pb²⁺胁迫(500、1 000、1 500、2 000 mg/L)、Zn²⁺胁迫(500、800、1 100、1 400 mg/L)处理。测定不同重金属浓度胁迫下的草坪草的光合特征及其对重金属吸收能力。【结果】研究表明:随着Pb²⁺、Zn²⁺浓度的增加,3种草坪草净光合速率、气孔导度、蒸腾速率和胞间CO₂浓度均呈先升高后降低趋势,但是出现峰值的浓度梯度各异;当Pb²⁺胁迫浓度为500 mg/L时,对高羊茅和黑麦草叶片光合能力具有促进作用;当Pb²⁺胁迫为1 000 mg/L时,对草地早熟禾叶片光合能力具有促进作用。当Zn²⁺胁迫为800 mg/L时对黑麦草和高羊茅叶片净光合速率具有促进作用;当Zn²⁺胁迫为500 mg/L时,对草地早熟禾叶片净光合速率具有促进作用。【结论】综合分析3种草坪草的光合特征和对植物体内重金属富集能力表明,高羊茅和黑麦草适用于低于1 000 mg/L的Pb²⁺、Zn²⁺污染土壤的修复。

关键词:草坪草;重金属胁迫;光合特征;吸附

中图分类号:S688.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-5500(2023)03-0054-08

DOI:10.13817/j.cnki.cycp.2023.03.007



重金属是土壤环境中一类具有潜在危害的污染物,它们在土壤中一般不易随水淋溶,不能被土壤微生物分解,具有明显的生物富集作用^[1]。Pb、Zn是我国土壤—植物生态系统中典型的重金属污染物,过量

的Pb²⁺、Zn²⁺进入环境并参与水体—土壤—生物系统循环,当植物吸收过量Pb²⁺、Zn²⁺后,会抑制对其他矿物营养的吸收,从而抑制植物生长,而且植物吸收的Pb²⁺、Zn²⁺会通过食物链的传递最终危害人类自身健康^[2]。植物修复因低成本和环境友好的优点,在土壤修复中担任着至关重要的角色^[2]。草坪草作为城镇绿化不可或缺的植物种类,研究重金属胁迫对草坪草光合特征的影响具有重要意义^[3]。黑麦草(*Lolium perenne*)、高羊茅(*Festuca arundinacea*)和草地早熟禾(*Poa pratensis*)均属禾本科多年生草本植物,为冷季型草坪草^[2-3]。高羊茅属于质地粗糙丛生型,用途广、抗逆性极强;黑麦草生长速度快,分蘖能力强,是风景区绿化的先锋草种,对贫瘠地、有机物、污水等都表现出较强的抗性;黑麦草在生境恶劣、寸草不生的尾矿地都能生存,甚至能正常生长^[4-5];早熟禾根系发达,成坪速度亦快,绿期长,耐践踏,再生性好^[4]。相关研究

收稿日期:2022-12-29;**修回日期:**2023-03-30

基金项目:甘肃省新一轮草原补奖效益评估及草原生态评价研究(XZ20191225);甘肃省草原监测评价(GSZYTC-ZCJC-21010);兰州市草原资源与生态监测评价(GSAU-JSFW-2022-22);2022年草畜平衡区遥感监测试点示范政府采购项目(GSZR-2022-ZC-098);河西荒漠区草地土壤碳密度空间分布及碳储量估算(2021kj071)

作者简介:杨军银(1995-),男,甘肃天水人,硕士研究生,主要从事草地生态、资源与环境方面的研究。

E-mail:2312869811@qq.com

*通信作者。E-mail:Liuxn@gsau.edu.cn

发现,高羊茅、黑麦草、草地早熟禾等对重金属具有一定的富集能力,通过对上述草坪草反复修剪,可降低土壤中重金属含量^[6-10]。同时,3种草坪草成坪速度快,通过覆盖土壤截留雨水,可减少因降雨淋溶带来的重金属向地下的迁移^[4]。草坪草是园林植物,在降低环境污染与改善人类居住环境等方面发挥着极其重要的作用,是值得推荐的植物修复材料。

当植物受到重金属胁迫时,重金属元素对植物的毒害现象主要表现为抑制生长、叶片病害发生率提高、光合作用降低等。叶绿素是植物进行光合作用的主要色素,叶绿素含量的高低可以反映光合系统受到损害的程度^[11]。研究表明,重金属能降低植物叶绿素的含量,高浓度的重金属会使叶绿体发生膜过氧化反应,叶绿素的含量也会减少。影响植物生产力和作物产量的重要因素是光合效率^[12],光合效率对环境某些因素的敏感度比较高,也容易受到重金属的影响。气孔作为叶片内的叶绿体与外界进行气体交换的通道^[13],也影响光合作用强度,当光照强度增强时,气孔导度会增大^[14];而光照强度减弱时,气孔导度减小,紧接着净光合速率下降^[15]。

近年来,国内外草坪草的重金属胁迫研究主要集中在毒性效应、毒性机理的抗性机制方面^[3-9],而胁迫下草坪草光合特性和吸收能力的研究相对较少。本研究选择以高羊茅、黑麦草、草地早熟禾作为研究材料,明确不同浓度 Pb^{2+} 、 Zn^{2+} 胁迫下草坪草光合特征的变化及草坪草对重金属吸附效果,为 Pb^{2+} 、 Zn^{2+} 污染地区的环境修复提供理论参考和数据支撑。

1 材料和方法

1.1 试验材料

试验材料为高羊茅品种红象(*Festuca arundinacea* cv. Hongxiang),百灵鸟多年生黑麦草(*Lolium perenne* cv. Bailingniao),草地早熟禾肯塔基(*Poa pratensis* cv. Kentucky),草种2017年购自北京克劳沃草业技术研发中心。

栽培基质:取洁净的河沙,过2 mm筛,去除大粒石块等杂质,用流水淘洗至沙粒表面水流不再浑浊,去离子水洗3~4次,最后置于烘箱中于105℃,烘24 h,冷却备用。

1.2 试验设计

试验在甘肃农业大学组织培养室进行,温室温度控制为昼(23±2)℃、夜(18±2)℃;光照强度2 000 lx、光照/黑暗时间为16 h/8 h;相对湿度为50%。用塑料花盆(上口径10 cm,底径8 cm,高10 cm)作为容器,以沙子作为基质做沙培试验,每个花盆中沙子填充至盆高3/4处,每盆播种50粒草坪草种子,待其长出第1片真叶后,按草坪草幼苗时期正常生长的营养需求量,定时定量浇灌Hoagland营养液(靠近杯壁缓慢浇注,防止侧漏及扰动沙层以暴露黑麦草根);出苗期,为防止灼伤幼苗将Hoagland营养液按照标准配方配制为1/1 000 Hoagland浓度使用;出苗后,配置成1/2 Hoagland营养液^[16]浓度使用;每隔4天浇灌1次营养液,浇灌量:200 mL/次,浇灌时注意不让营养液沾到植株地上部分。育苗期每天称重并用蒸馏水补齐蒸发的溶液;配好的营养液用HCl和NaOH溶液调pH值至6.0),沙子含水率保持在55%~65%。根据中华人民共和国国家土壤环境质量标准^[17]3级土壤环境标准量设置重金属 Pb^{2+} 、 Zn^{2+} 浓度。配制5个 Pb^{2+} 浓度,分别为:0(CK)、500、1 000、1 500、2 000 mg/L,配制5个 Zn^{2+} 浓度,分别为:0(CK)、500、800、1 100、1 400 mg/L。30 d后,进行重金属 Pb^{2+} 、 Zn^{2+} 胁迫处理,每个处理6个重复。

1.3 指标测定

1.3.1 不同草坪草光合作用的测定 采用德国WALZ公司生产的便携式光合荧光测量系统GFS-3000测定光合参数。选取黑麦草、高羊茅和草地早熟禾完全展开的健康叶片,用游标卡尺量出叶片的宽度,并以此与光合仪叶室的长度之积计算出所测叶片的实际面积,输入到GFS-3000仪器,每处理选取12株,选择植株中上部叶片,每个叶片测5次光合数据,取平均值作为黑麦草、高羊茅和草地早熟禾各处理的净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)和胞间 CO_2 浓度(C_i),测定时间为9:00~11:00和14:00~16:00^[12]。

1.3.2 草坪草重金属含量测定 洗净根部沙粒,105℃杀青30 min,80℃烘干(48 h),将地上部分(茎、叶)和地下部分(根)混合,磨碎,用浓硝酸—高氯酸消煮,消煮后用原子吸收火焰分光光度计测定^[18]。

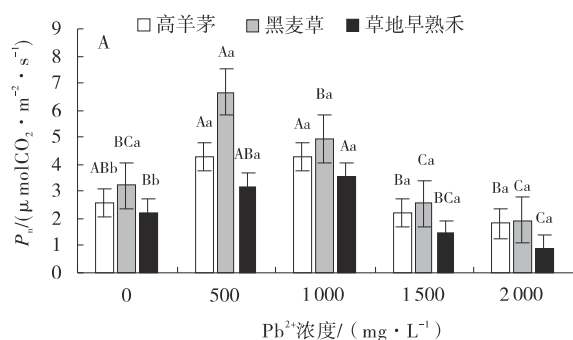
1.4 数据分析

试验中的数据采用 Microsoft Excel 2016 进行整理,采用 SPSS20.0 进行差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 草坪草光合特性对 Pb^{2+} 、 Zn^{2+} 胁迫的响应

2.1.1 光合速率(P_n) 随着 Pb^{2+} 、 Zn^{2+} 浓度的增加,3 种草坪草净光合速率均呈先升高后降低趋势。净光合速率在 Pb^{2+} 胁迫下,高羊茅和黑麦草均在 500 mg/L 达最大值,高羊茅为 $4.30 \mu\text{mol}\cdot\text{CO}_2/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,黑麦草为 $6.66 \mu\text{mol}\cdot\text{CO}_2/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,草地早熟禾在 1000 mg/L 达最大值,为 $3.56 \mu\text{mol}\cdot\text{CO}_2/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。 Zn^{2+} 胁迫下,高羊茅在 1100 mg/L 达最大值,为 $3.94 \mu\text{mol}\cdot\text{CO}_2/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,黑麦草在 800 mg/L 达最大值,为 $6.86 \mu\text{mol}\cdot\text{CO}_2/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,草地早熟禾在 500 mg/L 达最大值,为 $(4.15 \mu\text{mol}\cdot\text{CO}_2/(\text{m}^2\cdot\text{s}))$ 。



Pb^{2+} 胁迫下,与对照相比,500、1 000、1 500 和 2 000 mg/L 处理的高羊茅净光合速率分别增加 65.99%、65.25%、-15.40% 和 -30.29%,黑麦草净光合速率分别增加 107.31%、54.05%、-20.06% 和 -39.48%,草地早熟禾净光合速率分别增加 44.12%、61.98%、-33.92% 和 -59.98%; Zn^{2+} 胁迫下,与对照相比,500、800、1 100 和 1 400 mg/L 处理的高羊茅净光合速率分别增加 23.29%、78.97%、82.20% 和 -43.63%,黑麦草净光合速率分别增加 34.42%、99.16%、-8.19% 和 -30.22%,草地早熟禾净光合速率分别增加 203.73%、17.38%、1.62% 和 -23.14%。在相同 Pb^{2+} 或 Zn^{2+} 浓度胁迫下,不同草坪草净光合速率由高到低依次为黑麦草>高羊茅>草地早熟禾(图 1)。

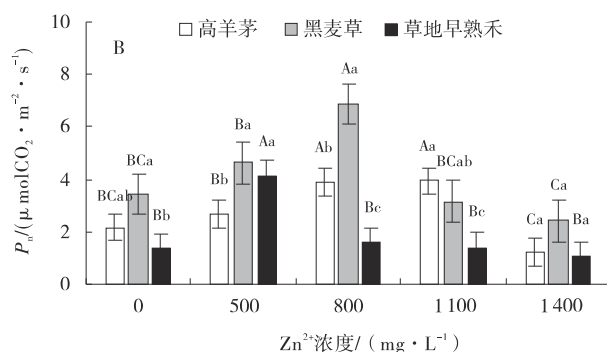


图 1 不同浓度 Pb^{2+} 、 Zn^{2+} 胁迫下 3 种草坪草净光合速率

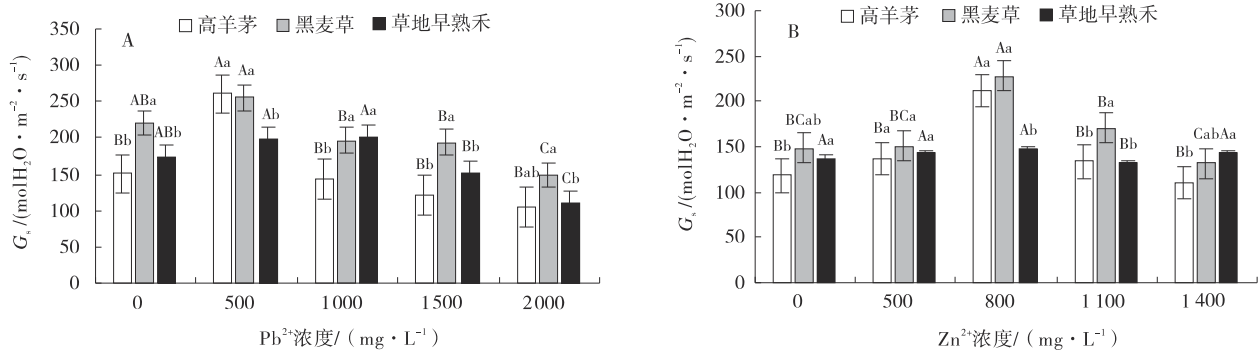
Fig. 1 Effects of different concentrations of Pb^{2+} and Zn^{2+} stress on net photosynthetic rate of three turfgrasses

注:图中不同大写字母表示同一植物同一重金属不同浓度间差异显著($P<0.05$);图中不同小写字母表示同一重金属同一浓度不同植物间差异显著($P<0.05$),下同

2.1.2 气孔导度(G_s) 随着 Pb^{2+} 、 Zn^{2+} 浓度的增加,3 种草坪草气孔导度呈先升高后降低趋势。 Pb^{2+} 胁迫下高羊茅和黑麦草在 500 mg/L 均达最大值,分别为 $260.51 \text{ mol}\cdot\text{H}_2\text{O}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 、 $255.09 \text{ mol}\cdot\text{H}_2\text{O}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,早熟禾在 1000 mg/L 达最大值,为 $201.11 \text{ mol}\cdot\text{H}_2\text{O}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$;而 Zn^{2+} 胁迫下高羊茅、黑麦草和早熟禾在 800 mg/L 达最大值,分别为 211.23、228.31、147.41 $\text{mol}\cdot\text{H}_2\text{O}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。 Pb^{2+} 胁迫下,与对照相比,500、1 000、1 500 和 2 000 mg/L 处理的高羊茅气孔导度分别增加 73.36%、-5.37%、-19.85% 和 -29.8%,黑麦草气孔导度分别增加 15.77%、-11.00%、-12.21% 和 -32.63%,早熟禾气孔导度分别增加 14.08%、15.34%、-13.59% 和 -37.20%; Zn^{2+} 胁迫

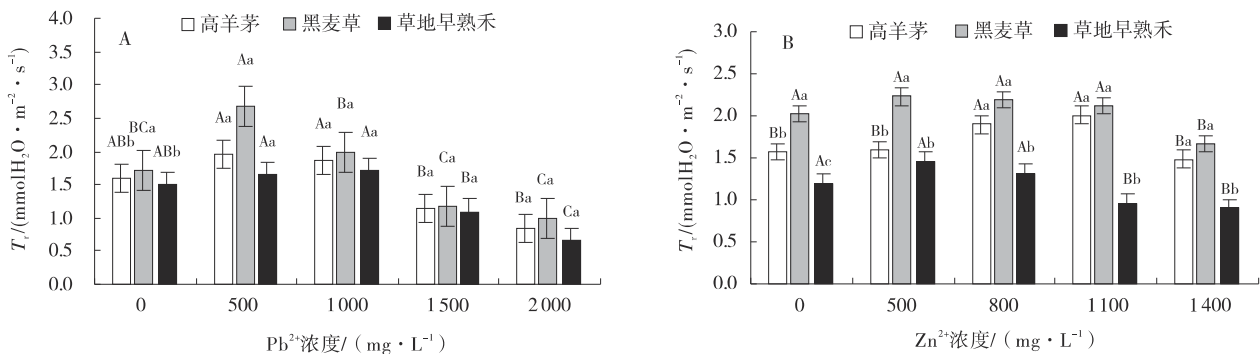
下,与对照相比,500、800、1 100 和 1 400 mg/L 处理的高羊茅气孔导度分别增加 15.32%、78.99%、13.32% 和 -6.51%,黑麦草气孔导度分别增加 1.77%、53.97%、15.03% 和 -11.13%,早熟禾气孔导度分别增加 4.19%、6.98%、-4.17% 和 3.35%(图 2)。

2.1.3 蒸腾速率(T_r) 随着 Pb^{2+} 、 Zn^{2+} 浓度的增加,3 种草坪草气孔导度呈先升高后降低趋势。 Pb^{2+} 胁迫下高羊茅和黑麦草在 500 mg/L 达最大值,分别为 1.96、2.67 $\text{mmol H}_2\text{O}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,早熟禾在 1 000 mg/L 达最大值,1.71 $\text{mmol H}_2\text{O}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$;而 Zn^{2+} 胁迫下高羊茅在 1 100 mg/L 达最大值,为 2.01 $\text{mmol H}_2\text{O}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,黑麦草和早熟禾在 500 mg/L 达最大值(分别为 2.23、1.46 $\text{mmol}\cdot\text{H}_2\text{O}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$)。 Pb^{2+} 胁迫下,与对照相比,

图 2 不同浓度 Pb^{2+} 、 Zn^{2+} 胁迫下 3 种草坪草气孔导度Fig. 2 Effects of different concentrations of Pb^{2+} and Zn^{2+} stress on stomatal conductance of three turfgrasses

500、1 000、1 500 和 2 000 mg/L 处理的高羊茅蒸腾速率分别增加 23.29%、17.47%、-27.77% 和 -47.38%，黑麦草蒸腾速率分别增加 54.76%、15.13%、-31.83% 和 -42.99%，早熟禾蒸腾速率分别增加 10.39%、14.52%、-26.30% 和 -55.72%； Zn^{2+} 胁迫下，与对照相比，500、800、1 100 和 1 400 mg/L

处理的高羊茅蒸腾速率分别增加 1.53%、20.78%、27.91% 和 -5.57%，黑麦草蒸腾速率分别增加 10.38%、8.55%、4.57% 和 -17.35%，早熟禾蒸腾速率分别增加 21.15%、9.37%、-20.01% 和 -25.06% (图 3)。

图 3 不同浓度 Pb^{2+} 、 Zn^{2+} 胁迫下 3 种草坪草蒸腾速率Fig. 3 Effects of different concentrations of Pb^{2+} and Zn^{2+} stress on transpiration rate of three turfgrasses

2.1.4 胞间 CO_2 浓度 (C_i) 随着 Pb^{2+} 、 Zn^{2+} 浓度的增加，3 种草坪草胞间 CO_2 浓度呈先升高后降低趋势。 Pb^{2+} 胁迫下高羊茅和黑麦草在 1 000 mg/L 达最大值，分别为 793.43、806.38 $\mu mol CO_2/mol$ ，早熟禾在 1 500 mg/L 达最大值，为 612.39 $\mu mol CO_2/mol$ 。 Zn^{2+} 胁迫下高羊茅和黑麦草在 1 100 mg/L 达最大值，分别为 641.51、610.09 $\mu mol CO_2/mol$ ，早熟禾在 800 mg/L 达最大值，为 635.51 $\mu mol CO_2/mol$ 。 Pb^{2+} 胁迫下，与对照相比，500、1 000、1 500 和 2 000 mg/L 处理的高羊茅胞间 CO_2 浓度分别增加 3.80%、42.75%、9.63% 和 -17.26%，黑麦草胞间 CO_2 浓度分别增加 27.19%、42.30%、31.92% 和 2.52%，早熟禾胞间 CO_2 浓度分别增加 19.87%、23.32%、27.81% 和 27.22%； Zn^{2+} 胁迫下，与对照相比，500、800、1 100 和 1 400 mg/L 处

理的高羊茅胞间 CO_2 浓度分别增加 14.54%、18.99%、25.66% 和 21.35%，黑麦草胞间 CO_2 浓度分别增加 0.52%、4.14%、6.11% 和 -3.12%，早熟禾胞间 CO_2 浓度分别增加 22.59%、37.60%、17.89% 和 2.29% (图 4)。

2.2 Pb^{2+} 、 Zn^{2+} 在草坪草中含量

Pb^{2+} 、 Zn^{2+} 胁迫后，3 种草坪草体内有一定的 Pb^{2+} 、 Zn^{2+} 积累，且随着重金属浓度的升高，积累量呈先升高后降低趋势。

Pb^{2+} 胁迫下高羊茅和早熟禾在 1 000 mg/L 达最大值，分别为 0.88、0.86 mg/kg，黑麦草在 1 500 mg/L 达最大值，为 0.74 mg/kg；而 Zn^{2+} 胁迫下高羊茅和早熟禾在 1 100 mg/L 达最大值，分别为 1.83、1.35 mg/kg，黑麦草在 800 mg/L 达最大值，为 1.37 mg/kg (图 5)。

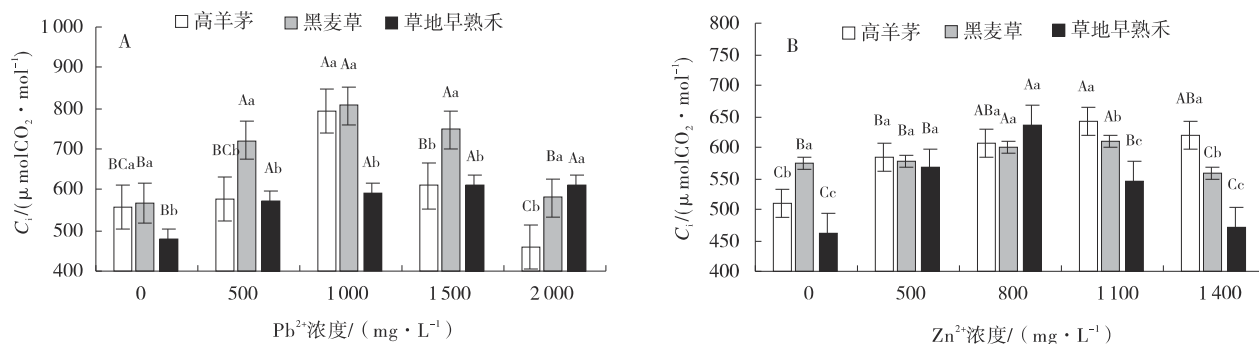


图4 不同浓度Pb、Zn胁迫下3种草坪草胞间CO₂浓度

Fig. 4 Effects of different concentrations of Pb²⁺ and Zn²⁺ stress on intercellular CO₂ concentration of three turfgrasses

Pb²⁺胁迫下,与对照相比,500、1 000、1 500和2 000 mg/L处理的高羊茅体内的重金属含量分别增加15.94%、27.54%、21.74%和-1.45%,黑麦草体内的重金属含量分别增加6.78%、20.34%、25.42%和6.78%,草地早熟禾体内的重金属含量分别增加31.25%、34.38%、-6.25%和-17.19%;Zn²⁺胁迫

下,与对照相比,500、800、1 100和1 400 mg/L处理的高羊茅体内的重金属含量分别增加32.38%、38.10%、74.29%和65.71%,黑麦草体内的重金属含量分别增加159.62%、163.46%、140.38%和148.08%,早熟禾体内的重金属含量分别增加13.27%、32.65%、37.76%和22.45%。

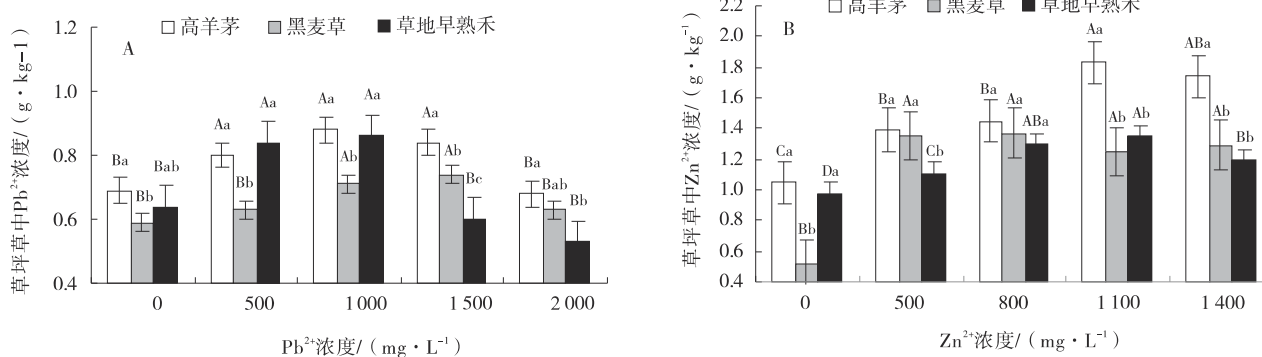


图5 不同浓度Pb²⁺、Zn²⁺胁迫后3种草坪草体内的含量

Fig. 5 Content of three Turfgrasses under different concentrations of Pb²⁺ and Zn²⁺

2.3 相关性分析

将3种草坪草同一种重金属不同浓度胁迫下 P_n 、 G_s 、 C_i 、 T_r 及重金属含量分别计算平均值,然后分析其相关性。

经相关性分析发现(表1),在Pb²⁺胁迫下,3种草坪草的 P_n 与 C_i 呈显著正相关, P_n 与 G_s 、 T_r 呈显著正相关; G_s 与 T_r 呈极显著正相关。在Zn²⁺胁迫下,3种草坪草的 P_n 与 G_s 、 T_r 呈极显著正相关; C_i 与 T_r 和草坪草重金属含量呈显著正相关。

3 讨论

3.1 Pb²⁺、Zn²⁺胁迫对3种草坪草光合性能的影响

重金属胁迫对植物的生长和代谢影响是多方面的,但对光合作用的影响尤为显著^[19]。植物的生长发

育和有机物同化通过光合作用实现,光合作用是植物生产力的源泉^[20-23]。大量的研究表明,重金属胁迫会影响植物的光合作用^[12,19]。在本试验中,3种草坪草随着处理浓度的升高净光合速率均呈“低促高抑”的趋势。Pb、Zn是土壤环境中常见的重金属污染元素,当过多的Pb、Zn被植物吸收后,会对植物生长造成一定的毒害作用,甚至影响植物正常的新陈代谢水平^[24]。

王娅玲等^[25]认为低浓度的铅胁迫可以增强植物体内叶绿体的酶活性,促进叶绿素的合成,从而使叶绿素含量增加;高浓度的铅可能会导致叶绿体酶活性失调,从而加快叶绿素分解。邹洪梅等^[26]也指出,高浓度的金属离子会抑制某些酶的活性,而这些酶与叶绿素生物合成密切相关,导致叶绿素合成受阻,叶绿

表 1 Pb²⁺和 Zn²⁺胁迫下光合指标与草坪草中重金属含量之间的相关性Table 1 Correlation between photosynthetic indexes and heavy metal content in turfgrasses under Pb²⁺ and Zn²⁺ Stress

种类	相关性	净光合速率 P_n	胞间 CO ₂ 浓度 C_i	气孔导度 G_s	蒸腾速率 T_r	重金属含量
Pb ²⁺	P_n	1				
	C_i	0.558*	1			
	G_s	0.747**	0.228	1		
	T_r	0.953**	0.422	0.801**	1	
	重金属含量	0.294	0.223	0.287	0.261	1
Zn ²⁺	P_n	1				
	C_i	0.417	1			
	G_s	0.721**	0.269	1		
	T_r	0.801**	0.576*	0.5	1	
	重金属含量	0.06	0.519*	0.006	0.075	1

注:* 表示显著相关($P<0.05$);** 表示极显著相关($P<0.01$)

素含量下降。本研究发现,随着 Pb²⁺浓度的增加,3 种草坪草净光合速率、气孔导度、蒸腾速率和胞间 CO₂ 浓度均呈先升高后降低趋势,但是出现峰值的浓度梯度各异。与对照相比,低浓度的 Pb²⁺胁迫(500 mg/L)对黑麦草和高羊茅叶片净光合速率具有促进作用,当 Pb²⁺胁迫为 1 000 mg/L 时,对草地早熟禾叶片净光合速率具有促进作用,这可能是植物对重金属胁迫作出的应激反应,即一定范围内的重金属胁迫会刺激植物增加光合色素的合成,从而提高光合速率。但 Pb 胁迫超过一定程度时(高羊茅超过 1 000 mg/L,黑麦草超过 500 mg/L,草地早熟禾超过 1 000 mg/L),3 种草坪草净光合速率和蒸腾速率均下降,原因是 Pb 胁迫下 3 种草坪草叶片的光合色素生成受到抑制,叶片失水使保卫细胞膨压降低^[27],引起气孔关闭、净光合速率和蒸腾速率降低^[28]。与对照相比,低浓度的 Zn 胁迫(800 mg/L)对黑麦草和高羊茅叶片净光合速率具有促进作用;当 Zn 胁迫为 500 mg/L 时,对草地早熟禾叶片净光合速率具有促进作用,这可能是植物对重金属胁迫作出的应激反应,即一定范围内的重金属胁迫会刺激植物增加光合色素的合成,从而提高光合速率。但 Zn 胁迫超过一定程度时(高羊茅超过 1 100 mg/L,黑麦草超过 800 mg/L,草地早熟禾超过 500 mg/L),3 种草坪草叶片的光合色素生成受到抑制,导致光合速率减慢甚至为 0^[28]。

根据 Farquhar 等^[29]的观点,在逆境环境中导致植物光合速率降低的因素包括气孔限制和非气孔限制。如果光合速率和气孔导度的变化趋势与胞间 CO₂ 浓度的变化趋势一致,说明光合速率下降是受气孔因素限制;如果光合速率和气孔导度变化与胞间 CO₂ 浓度变

化的趋势相反,则说明光合速率下降是受非气孔因素(叶肉细胞光合活性)限制^[30-33]。在本研究中,高羊茅在 Pb 胁迫下,随着净光合速率、气孔导度显著降低,胞间 CO₂ 浓度也显著降低,说明光合速率下降是受气孔因素限制;黑麦草在 Pb 胁迫下,随着净光合率、气孔导度降低,胞间 CO₂ 浓度在 1 000 mg/L 增大,随后开始降低,说明当 Pb 浓度低于 1 000 mg/L 时,光合速率下降是受非气孔因素限制,随着胁迫浓度增大,光合速率开始受气孔因素限制;草地早熟禾在 Pb 胁迫下,其净光合速率、气孔导度显著降低,胞间 CO₂ 浓度的改变则不显著,但有增大的趋势,说明受非气孔因素(叶肉细胞光合活性)限制^[29,31-32]。

重金属胁迫会对植物的光合作用过程造成一定影响,最终导致碳固定和同化效率下降^[33-34]。有研究表明,Zn 是绿色植物体内与一些酶活性有关的重要的微量元素,同时也是参与蛋白质合成和能量转化的酶的重要组成部分。当植物体内缺乏 Zn 时,植物生长缓慢,成熟期延迟^[12]。然而,Zn 浓度较高时就能抑制光合碳同化过程。明华等^[35]在盆栽条件下研究 Pb 处理对玉米叶片的影响时发现,在不同浓度的 Pb 胁迫下,气孔导度下降,胞间 CO₂ 浓度降低,气孔有关闭的趋势,其净光合速率随玉米叶片的气孔导度和胞间 CO₂ 浓度降低而下降。本研究显示,高羊茅在 Zn 胁迫下,随着净光合速率、气孔导度降低,胞间 CO₂ 浓度在 1 100 mg/L 时最大,随后开始降低,说明当 Pb²⁺ 浓度低于 1 100 mg/L 时,光合速率下降是受非气孔因素限制,随着胁迫浓度增大,光合速率开始受气孔因素限制;黑麦草在 Zn 胁迫下,其净光合速率、气孔导度显著降低,胞间 CO₂ 浓度的显著增大,光合速率主要受气孔

因素限制;草地早熟禾在Zn胁迫不超过500 mg/L时,光合速率主要受气孔因素限制^[29,31-32]。也有研究^[36-37]表明光合速率下降的内在原因可能因光抑制引起的,即光合机构吸收的光能超过光合作用本身所能利用的能量而引起光合效率下降。本次试验的植物生长环境是在室内,在测量时,利用仪器自带的光源补光测定光合参数,所以猜测植物在测量时可能受到了光抑制。

3.2 Pb²⁺、Zn²⁺胁迫对3种草坪草重金属含量的影响

重金属耐性植物和超富集植物的筛选是特定污染区域植物修复的基础和关键^[3]。高秉婷等^[38]的研究同样表明随着植物的生长,铅浓度的增加,植物抵御铅胁迫和毒害作用的能力在减小,甚至有可能受毒害致死,铅对植物的生长抑制作用在增加。郭晓宏等^[9]研究发现,不同植物对铅的吸收能力也是不同的,对重金属的吸收量因植物类型而异。研究表明,高羊茅、黑麦草、草地早熟禾根系中重金属离子含量要显著高于地上部分,吸收重金属的主要器官是根系^[3]。本研究发现,在同一Pb²⁺浓度胁迫下,不同草坪草体内的重金属含量由高到低依次为高羊茅、早熟禾和黑麦草,与郭晓宏^[10]、刘慧芹^[39]、王艳^[40]的结果类似。而在同一Zn²⁺浓度胁迫下,不同草坪草体内的重金属含量由高到低依次为高羊茅、黑麦草和早熟禾,本研究结果与高秉婷^[38]的结果类似。3种草坪草重金属积累量随着Pb²⁺、Zn²⁺浓度的升高呈先升高后降低趋势。究其原因,可能是随着3种草坪草体内重金属离子含量的升高,对草坪草胁迫影响逐渐增强,其中重金属含量越高,脯氨酸含量和MDA含量越高,叶绿素含量和生长发育指标越低,对植物毒害越严重,影响了植物光合作用和生长发育,同时,草坪草抗氧化酶活性越高,以此来抵御胁迫对植物产生的毒害,体现了草坪草对重金属胁迫的适应性反应。Pb、Zn在最高浓度处理时草坪草重金属离子含量又有所下降,可能是在该浓度处理下草坪草正常的生理功能已经发生紊乱,不能吸收更多重金属离子^[3]。整体来看,同一Pb²⁺、Zn²⁺浓度下高羊茅和黑麦草富集能力最佳。

4 结论

1) 当Pb²⁺胁迫浓度为500 mg/L时,对高羊茅和黑麦草叶片净光合速率具有促进作用;当Pb²⁺胁迫为

1 000 mg/L时,对草地早熟禾叶片净光合速率具有促进作用。当Zn²⁺胁迫为800 mg/L时对黑麦草和高羊茅叶片净光合速率具有促进作用;当Zn²⁺胁迫为500 mg/L时,对草地早熟禾叶片净光合速率具有促进作用。

2) 在实际生产应用过程中,单纯从重金属积累量考虑,可以利用高羊茅和黑麦草对Pb²⁺和Zn²⁺同时具有较高积累量的特点,对于受Pb²⁺和Zn²⁺污染的土壤,可以通过种植高羊茅和黑麦草达到减少土壤重金属含量的目的。同时由于高羊茅和黑麦草出苗较快,对重金属耐受性强,在受到Pb²⁺和Zn²⁺污染的土壤中进行种植,不仅可以达到植物修复的目的,还可以保持较好的生长特性,降低管理成本,保持较好的坪用性状。

参考文献:

- [1] 刘志坚,董元华,张琇,等. 卫宁平原农用地土壤重金属污染特征与生态风险研究[J]. 生态环境学报, 2022, 31(11): 2216—2224.
- [2] 邹丽娜,周志宇,颜淑云,等. 盐分胁迫对紫穗槐幼苗生理生化特性的影响[J]. 草业学报, 2011, 20(3): 84—90.
- [3] 陈伟. 重金属胁迫对草坪草生长发育及生理特性的影响[D]. 兰州:甘肃农业大学, 2014.
- [4] 王丽楠. 盐碱及重金属胁迫下三种草坪草的形态和生理适应性研究[D]. 扬州:扬州大学, 2018.
- [5] 陆敏英,包晓东,吴兴飞,等. 草坪修复污泥中重金属的研究与应用[J]. 生态学杂志, 2019, 38(4): 1212—1220.
- [6] Han Y L, Huang S Z, Yuan H Y, *et al.* Organic acids on the growth, anatomical structure, biochemical parameters and heavy metal accumulation of *Iris lacteal* var. *chinensis* seedling growing in Pb mine tailings [J]. 2013, 22(6): 1033—1042.
- [7] Wang S, Dong Q, Wang Z. Differential effects of citric acid on cadmium uptake and accumulation between tall fescue and Kentucky bluegrass. [J] *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2017, 145: 200—206.
- [8] Zhang G, Guo X, Zhao Z, *et al.* Effects of biochars on the availability of heavy metals to ryegrass in an alkaline contaminated soil [J]. *Environmental Pollution*, 2016, 218: 513—522.
- [9] 朱剑飞,李铭红,谢佩君,等. 紫花苜蓿、黑麦草和狼尾草对Cu、Pb复合污染土壤修复能力的研究[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(2): 303—313.

- [10] 郭晓宏,朱广龙,魏学智. 5 种草本植物对土壤重金属铅的吸收、富集及转运[J]. 水土保持研究, 2016, 23, 14 (1):189—192.
- [11] 潘瑞炽. 植物生理学[M]. 北京:高等教育出版社, 2004:56—57.
- [12] 许大全. 光合作用效率[M]. 上海:上海科学技术出版社, 2002: 163—167.
- [13] 陈俊,王敦球,张学洪,等. 李氏禾修复重金属(Cr Cu Ni)污染水体的潜力研究[J]. 农业环境科学学报, 2008, 158(4):1514—1518.
- [14] Marcelle R. Effects of stress on photosynthesis [M]. Hague: Martinis Nijhoff, 1983: 317—382.
- [15] 张宝龙,陈美静,辛士刚,等. 铅胁迫对植物光合作用影响的研究进展[J]. 安徽农业科学, 2014, 42(12):3468—3470.
- [16] 张雯. 镉胁迫对二穗短柄草生长及生理特性的响应[D]. 兰州:甘肃农业大学, 2014.
- [17] 中华人民共和国国家环境保护局,中华人民共和国国家技术监督局. 土壤环境质量标准:GB 15618—1995[S]. 北京:中国标准出版社, 2006.
- [18] 李强,柳小妮,张德昱,等. 祁连山自然保护区不同草地类型地上生物量和土壤微量元素特征分析[J]. 草原与草坪, 2021, 41(3):48—56.
- [19] 张嘉桐,关颖慧,司莉青,等. Pb^{2+} 、 Cd^{2+} 复合胁迫对桑树光合作用的影响[J]. 北京林业大学学报, 2018, 40(4): 16—23.
- [20] 肖亚男. 光系统 II PsbV 蛋白中重要氨基酸残基的功能研究[D]. 北京:中国科学院大学.
- [21] 王晓娟,贾志宽,梁连友,等. 不同有机肥量对旱地玉米光合特性和产量的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23 (2):419—425.
- [22] 任金虎,谢军红,李玲玲,等. 种植模式对旱地玉米光合特性和产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35 (5):8—13.
- [23] 宋彩玲. 内蒙古大兴安岭兴安落叶松光合生理生态特性研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2009.
- [24] 刘建华,朱济友,姚姜铭,等. 土壤重金属胁迫对经济树种的光合响应特征研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51 (9):211—216.
- [25] 王娅玲,李维峰,杜华波,等. 铅胁迫对咖啡幼苗叶绿素含量及抗氧化酶活性的影响[J]. 贵州农业科学, 2014, 42(2):56—58.
- [26] 邹洪梅,蔡艳,吴德勇. 铅对狗牙根叶绿素含量的影响[J]. 北方园艺, 2011(18):88—91.
- [27] 董智,马宇飞,李红丽等. 4 个紫花苜蓿品种分枝期光合速率、蒸腾速率日变化及其影响因子分析[J]. 中国草地学报, 2009, 31(3):67—71.
- [28] 薛文秀,尚晓硕,蒋艺等. 铅胁迫对垂柳生长和光合生理特性的影响[J]. 天津师范大学学报(自然科学版), 2020, 40(3):28—32.
- [29] Farquhar G D, Sharkey T D. Stomatal conductance and photosynthesis [J]. Annual Review of Plant Physiology, 1982(33):317—345.
- [30] 陈玉真,王峰,王果,尤志明. 土壤锌污染及其修复技术研究进展[J]. 福建农业学报, 2012, 27(8):901—908.
- [31] 许大全. 光合作用气孔限制分析中的一些问题[J]. 植物生理学通讯, 1997(4):241—244.
- [32] Bragina T V, Drozdova I S, Ponomareva Y V, *et al.* Photosynthesis, respiration and transpiration in maize seedlings under hypoxia induced by complete flooding [J]. Doklady Biological Science, 2002, 384 (1/2/3/4/5/6): 274—277.
- [33] 刘飞虎. 植物品种净光合速率测定的取样技术——以苧麻(*Boehmeria nivea*(L.) Gaud.) 为例[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2010, 32(2):221—226.
- [34] 曹玲,王庆成,崔东海. 土壤镉污染对四种阔叶树苗叶绿素荧光特性和生长的影响[J]. 应用生态学报, 2006, 17(5):769—772.
- [35] 明华,曹莹,胡春胜,等. 铅胁迫对玉米光合特性及产量的影响[J]. 玉米科学, 2008(1):74—78.
- [36] 许大全,张玉忠,张荣铤. 植物光合作用的光抑制[J]. 植物生理学通讯, 1992(4):237—243.
- [37] Cao C S, Xu J J, Zheng G Y, *et al.* Evidence for the role of transposons in the recruitment of cis—regulatory motifs during the evolution of C4 photosynthesis [J]. BMC Genomics, 2016, 17(1):201.
- [38] 高秉婷,吴永贵,陈伟. Zn^{2+} 胁迫对 4 种草生长及抗逆生理特性的影响[J]. 江苏农业科学, 2019, 47 (13): 285—288.
- [39] 刘慧芹,沈高峰,刘峰,等. 草坪型高羊茅幼苗对基质铅污染的生理生化响应[J]. 草地学报, 2015, 23(1): 95—100.
- [40] 王艳,鄂巍,吴丹. 铜、铅污染对翦股颖和高羊茅生理的影响[J]. 沈阳师范大学学报(自然科学版), 2005, (1): 74—77.

STN and SOC content, C:P and N:P were the lowest in the central area where disturbance from the plateau pika was the highest, and the edge area with the least disturbance intensity was the highest. C:N was the highest in the subcentral area that had a moderate level of disturbance, and the edge area was the lowest. However, the STP did not vary with the intensity of disturbance from plateau pikas. **【Conclusion】** The above results indicate that the disturbance and intensity of the plateau pika have an impact on the C:N:P stoichiometrics in vegetated areas with pika territory. This suggests that changes in soil C:N:P stoichiometric in the patchy habitat of plateau pikas may be an important factor that could affect plant richness.

Key words: plateau pika; patchy habitat; winter pasture; ecological stoichiometric

(上接 61 页)

Differences of photosynthetic characteristics and adsorption capacity of three turfgrass under Pb^{2+} and Zn^{2+} stresses

YANG Jun-yin, LI Qiang, JI Tong, HE Guo-xing, GUAN Wen-hao,
LIU Zhi-gang, LIU Xiao-ni*

(College of Prataacultural Science, Gansu Agricultural University, Key Laboratory of Grassland Ecosystem, Ministry of Education/ Prataacultural Engineering Laboratory of Gansu Province/ Sino-U. S. American Centers for Grazingland Ecosystem Sustainability, Lanzhou 730030, China)

Abstract: **【Objective】** To explore the most suitable varieties of lawn grass for restoration in Pb^{2+} and Zn^{2+} polluted areas. **【Method】** Using a pot culture method, *Lolium perenne*, *Festuca arundinacea*, and *Poa pratensis* as the research objects, and river sand as the cultivation medium, the photosynthetic index and heavy metal content were measured for each treatment. The Treatments were without adding heavy metals (CK), Pb^{2+} stress (500, 1 000, 1 500, 2 000 mg/L), and Zn^{2+} stress (500, 800, 1 100, 1 400 mg/L). The photosynthetic characteristics and heavy metal absorption capacity of turfgrass under different concentrations of heavy metal stresses were measured. **【Result】** The results showed that with the increase of Pb^{2+} and Zn^{2+} concentrations, the net photosynthetic rate, stomatal conductance, transpiration rate, and intercellular CO_2 concentration of the three lawn grasses all showed a trend of first increasing and then decreasing, but the concentration gradients with peak values varied; When the concentration of Pb^{2+} stress was 500 mg/L, it promoted the photosynthetic capacity of tall fescue and ryegrass leaves; When Pb^{2+} stress was 1 000 mg/L, it promoted the photosynthetic capacity of *Poa pratensis* leaves. When Zn^{2+} stress was 800 mg/L, it promoted the net photosynthetic rate of ryegrass and tall fescue leaves; When Zn^{2+} stress was 500 mg/L, it promoted the net photosynthetic rate of *Poa pratensis* leaves. **【Conclusion】** A comprehensive analysis of the photosynthetic and heavy metal accumulation abilities of three lawn grasses showed that tall fescue and ryegrass were suitable for the remediation of Pb^{2+} and Zn^{2+} contaminated soil below 1 000 mg/L.

Key words: turfgrass; heavy metal stress; photosynthetic response; adsorption