



不同种植模式下重金属污染对牧草叶片光合特性和重金属含量的影响

邹文桐, 王艳君, 曹智, 金美芳, 林茂兹

引用本文:

邹文桐, 王艳君, 曹智, 等. 不同种植模式下重金属污染对牧草叶片光合特性和重金属含量的影响[J]. 热带亚热带植物学报, 2021, 29(1): 31-40.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11926/jtsb.4244>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

竹柏2种颜色叶片的光合特性研究

Photosynthetic Characteristics of Two Color Leaves of *Podocarpus nagi*

热带亚热带植物学报. 2020, 28(2): 177-184 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4134>

遮荫对裸花紫珠苗期光合特性及总黄酮含量的影响

Effect of Shading on Photosynthetic Characteristics and Total Flavonoid Content of *Callicarpa nudiflora* Seedlings

热带亚热带植物学报. 2017, 25(6): 569-578 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3751>

红马蹄草的生态生物学特征及其扦插繁殖

Ecological and Biological Characteristics and Cutting Propagation of *Hydrocotyle nepalensis* Hook

热带亚热带植物学报. 2015, 23(4): 435-441 <https://doi.org/10.11926/j.issn.1005-3395.2015.04.011>

红马蹄草的生态生物学特征及其扦插繁殖

Ecological and Biological Characteristics and Cutting Propagation of *Hydrocotyle nepalensis* Hook.

热带亚热带植物学报. 2015(4): 435-441 <https://doi.org/10.11926/j.issn.1005-3395.04.011>

柠檬酸和EDTA-Na₂对黑麦草吸收Pb及营养元素特性的影响

Effects of Citric Acid or EDTA-Na₂ on the Absorption Characteristic of Pb and Nutrient Elements of *Lolium perenne* L.

热带亚热带植物学报. 2016, 24(5): 545-552 <https://doi.org/10.11926/j.issn.1005-3395.2016.05.010>

不同种植模式下重金属污染对牧草叶片光合特性和重金属含量的影响

邹文桐, 王艳君, 曹智, 金美芳, 林茂兹

(福建师范大学福清分校海洋与生化工程学院, 福建 福清 350300)

摘要: 为探索不同种植模式下重金属污染对牧草生理特性的影响, 皇竹草(*Pennisetum sinense*)、黑麦草(*Lolium perenne*)和龙须草(*Juncus effusus*)采用单作和间作模式, 研究了重金属污染对其叶片光合参数、光合色素和重金属含量的影响。结果表明, 与单作相比, 间作下皇竹草叶片的叶绿素(Chl) a、Chl a+b 和类胡萝卜素(Car)含量极显著上升, 净光合作用速率(P_n)、气孔导度(G_s)、细胞间隙 CO_2 浓度(C_i)和 Chl b 含量极显著下降, 但蒸腾速率(T_r)的差异不显著; 黑麦草和龙须草叶片的 C_i 、Car 含量极显著增加, P_n 、 T_r 、 G_s 、Chl a、Chl b 和 Chl a+b 显著或极显著下降(龙须草 Chl a 除外)。除龙须草的铜含量极显著降低外, 3 种牧草叶片和总生物量和重金属含量均极显著上升。与对照相比, 低浓度污染的皇竹草叶片的光合参数、光合色素含量及叶片和总生物量极显著提高, 而黑麦草和龙须草叶片的 P_n 、 T_r 、 G_s 、 C_i 、叶片和总生物量极显著减少, 光合色素含量极显著增加, 但黑麦草的 T_r 、 C_i 、叶片生物量及黑麦草和龙须草的 Chl b 差异不显著; 重金属污染使 3 种牧草叶片的重金属含量均极显著上升。种植模式 \times 重金属污染互作对牧草叶片的光合参数、光合色素含量、干质量及重金属含量的影响均极显著。因此, 在复合污染土壤间作 3 种牧草有利于叶片干物质的积累和重金属的吸收, 单作更有利于提高叶片的光合作用能力; 且皇竹草对重金属污染的适应性强于黑麦草和龙须草。

关键词: 重金属; 污染; 牧草; 种植模式; 光合特性

doi: 10.11926/jtsb.4244

Effects of Heavy Metal Pollution on Photosynthetic Characteristics and Heavy Metal Contents in Forage Leaves under Different Planting Patterns

ZOU Wen-tong, WANG Yan-jun, CAO Zhi, JIN Mei-fang, LIN Mao-zi

(College of Ocean Science and Biochemistry Engineering, Fuqing Branch of Fujian Normal University, Fuqing 350300, Fujian, China)

Abstract: In order to explore the effects of heavy metal pollution on physiological characters of forage under different planting patterns, three forages, such as *Pennisetum sinense*, *Lolium perenne* and *Juncus effusus*, were single cropping and intercropping, the effects of heavy metal pollution on photosynthetic parameters, photosynthetic pigments and heavy metal contents in leaves under different planting patterns were studied. The results showed that compared with monoculture, the contents of chlorophyll (Chl) a, Chl a+b and carotenoid (Car) of *P. sinense* leaves under intercropping increased significantly, while P_n , G_s , C_i and Chl b content decreased significantly, but there was no significant difference in transpiration rate (T_r). The C_i and Car content in *L. perenne* and *J. effusus* increased significantly, while P_n , T_r , G_s , contents of Chl a, Chl b, and Chl a+b decreased significantly except of Chl a content in *J. effusus*. The leaf and total biomass, heavy metal contents in three forage leaves

收稿日期: 2020-05-07 接受日期: 2020-06-25

基金项目: 福建省自然科学基金项目(2019J01891); 福建省教育厅中青年项目(JT180617); 中央引导地方科技发展专项(2019L3013); 现代设施农业福建省高校工程研究中心开放课题(G2-KF1802); 近海流域环境测控治理福建省高校重点实验室开放课题(S1-KF1709)资助

This work was supported by the Project for Natural Science of Fujian Province (Grant No. 2019J01891), the Youth Project of Education Department of Fujian Province (Grant No. JT180617), the Special Project for Guiding Local Science and Technology Development by Central Government (Grant No. 2019L3013), the Open Project of Fujian Universities and Colleges Engineering Research Center of Modern Facility Agriculture (Grant No. G2-KF1802), and the Open Project of Key Laboratory of Measurement and Control System for Coastal Environment Fujian Universities and Colleges (Grant No. S1-KF1709).

作者简介: 邹文桐(1981~), 男, 硕士, 实验师, 主要从事植物生理生化以及重金属污染土壤的植物修复等。E-mail: wtz_5267370@163.com

increased significantly under intercropping, except that copper content of *J. effusus* decreased significantly. Compared with control, the photosynthetic parameters, photosynthetic pigment content in leaves, leaf and total biomass of *P. sinense* were significantly improved treated with low concentration heavy metal pollution, while the P_n , T_r , G_s , C_i in leaves, leaf and total biomass of *L. perenne* and *J. effusus* decreased significantly, and photosynthetic pigment contents increased significantly, but there was no significant difference in T_r , C_i , leaf biomass of *L. perenne* and Chl b content in *L. perenne* and *J. effusus*. The contents of heavy metals in three forage leaves increased significantly under heavy metal pollution. The interaction of planting pattern \times heavy metal pollution on photosynthetic parameters, photosynthetic pigment content, leaf and total biomass, and heavy metal content of forage leaves were significant. Therefore, on the heavy metal combined pollution soil, it was beneficial for accumulation of dry matter and absorption of heavy metals of three forages under intercropping, while under monoculture, it was more beneficial to improve their photosynthetic capacity. Under different planting patterns, the adaptability of *P. sinense* to heavy metal pollution was stronger than that of *L. perenne* and *J. effusus*.

Key words: Heavy metal; Pollution; Forage; Planting pattern; Photosynthetic characteristics

随现代工业的迅速发展, 矿区土壤的重金属污染日趋严重。2014 年的调查表明全国约 1/6 耕地面积的土壤都存在重金属超标现象, 且南方较北方严重, 其中工业废弃地污染的重金属元素主要以铅、镉、锌为主^[1]。福建长汀的稀土矿废弃地重金属污染元素主要以铅、镉、锌为主^[2]; 紫金山铜矿废弃地主要以锌、铜、镉为主^[3]。众多研究表明, 福建矿区土壤中的重金属都不是单一的, 而是多种元素相互作用的复合重金属污染, 且主要以铅镉铜锌复合污染为主, 造成土壤和农作物污染, 进而危害人类的健康^[4]。

目前, 对土壤重金属复合污染研究多集中在铅镉^[5]、铜镉^[6]、铅镉^[7]、铅锌^[8]、镉锌^[9]、铜铅^[10]、铜锌^[11]等复合污染上, 而对铅镉铜锌复合污染的研究很少。有研究表明, 皇竹草(*Pennisetum sinense*)的光合作用受镉胁迫^[12], 铅、镉对龙须草(*Juncus effusus*)的生理生化特性和光合作用有影响^[13], 重金属污染对黑麦草(*Lolium perenne*)光合作用的影响研究较少, 主要开展了对铀的吸收研究^[14]。皇竹草、龙须草和黑麦草均可用于造纸, 具有回收利用的经济价值。因此, 本试验开展铅镉铜锌复合污染对间作皇竹草、黑麦草和龙须草的光合作用和叶片生物量影响的研究, 探讨重金属复合污染对间作和单作牧草生长代谢的影响, 从而为间作技术在福建矿区铅镉铜锌复合污染土壤的修复应用中提供参考。

1 材料和方法

1.1 材料

供试牧草为多年生的皇竹草(*Pennisetum sinense*)

和黑麦草(*Lolium perenne*), 以及野生的龙须草(*Juncus effusus*)。采集福建师范大学福清分校笃思公园未受重金属污染的土壤, 参照《土壤农业化学分析方法》^[15]测定土壤理化性状, pH 为 7.860, 有机质含量为 43.81 g/kg、碱解氮、速效磷、速效钾、交换性钙和镁含量分别为 105.0、49.81、217.5、3 951 和 142.5 mg/kg; 另外, 有效铅、有效镉、有效铜和有效锌含量分别为 0.03、0.10、0.92 和 2.76 mg/kg, 总铅、总镉、总铜和总锌含量分别为 24.64、0.38、4.21 和 11.73 mg/kg。

1.2 试验设计

采用双因素(2 \times 3)随机区组设计, 因素 A 为间作、单作 2 个种植模式; 因素 B 为对照(CK)、低浓度和高浓度 3 个铅镉铜锌复合污染水平。低浓度重金属复合污染液用 400 mg/kg Pb(NO₃)₂+15 mg/kg CdCl₂+300 mg/kg CuSO₄+300 mg/kg ZnSO₄ 配制, 高浓度重金属复合污染液用 800 mg/kg Pb(NO₃)₂+30 mg/kg CdCl₂+600 mg/kg CuSO₄+600 mg/kg ZnSO₄ 配制。将采集的新鲜土壤拣去植物残叶、杂质及大石子后晒干铺平在大麻袋上, 将复合污染溶液连续分批少量地加入土壤并混合均匀, 制成重金属复合污染土壤。然后将 2 kg 土壤倒入桶内老化处理 1 个月后测定土壤重金属含量, 对照土壤的 Pb²⁺、Cd²⁺、Cu²⁺和 Zn²⁺含量分别为 23.55、0.350、4.450 和 12.24 mg/kg; 低浓度污染土壤的相应离子含量分别为 402.1、14.92、285.7 和 293.3 mg/kg; 高浓度污染土壤的相应离子含量分别为 764.3、30.09、575.5 和 589.6 mg/kg。

老化处理 1 个月后, 选取长势一致的皇竹草、黑麦草和龙须草移栽至塑料桶中, 间作是每种牧草 2 株分别种在 3 桶中交替摆放; 单作为每种牧草 6 株分别种在 9 桶中, 摆放在一起。每处理 3 次重复。间作和单作盆栽试验同时进行, 总计 36 桶。移栽牧草后常规管理, 定期浇水保持土壤湿度。

1.3 方法

光合指标的测定 土壤经复合重金属老化 1 个月后, 分别将皇竹草、黑麦草和龙须草移栽至塑料桶中, 在旺长期选择天气晴朗的条件下, 在上午 8:30-11:30 用 CIRAS-2 光合作用测定系统(美国汉莎科学仪器有限公司)测定牧草上部叶片(空间取向和角度尽量一致)的净光合作用速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)和细胞间隙 CO_2 浓度(C_i), 测定的光照强度为 $1\ 000\ \mu mol/(m^2 \cdot s)^{[16]}$ 。每株测 1 片叶片, 重复 3 次, 每处理重复 3 次。

光合色素含量的测定 旺长期采集牧草同一叶位的叶片用 95% 乙醇提取光合色素, 用 722 型可见分光光度计测定叶绿素(Chl) a、Chl b、类胡萝卜素(Car)含量^[17], 每处理重复 3 次。

生物量的测定 移栽 90 d 后收获牧草, 洗净用吸水纸吸干表面水分, 皇竹草按叶、茎和根分开; 黑麦草和龙须草按地上部、地下部分开, 各部分在 $105^\circ C$ 下杀青 10 min, 再 $80^\circ C$ 烘至恒定, 然后称量各部位的干物质质量^[16]。

重金属含量的测定 采用干灰化法制备重金属含量测定样品, 用火焰原子吸收分光光度计测定牧草不同部位的铅、镉、铜和锌的含量^[18]。

1.4 数据分析

数据取 3 次重复的平均值, 用 DPS 2005 软件进行方差分析, 利用 Duncan 氏新复极差法进行差异显著性检验, 以 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 分别表示处理间差异显著和极显著。

2 结果和分析

2.1 对牧草叶片光合作用的影响

由表 1 可见, 间作模式下, 皇竹草叶片的 P_n 、 T_r 、 G_s 和 C_i 均随重金属浓度的升高呈先增后减的变化趋势, 且均以低浓度的最大, T_r 、 G_s 和 C_i 比对照(CK)分别极显著提高了 46.40%、52.18% 和

144.78%, 而高浓度处理的比低浓度处理的有所下降, 但 P_n 仍显著提高了 18.44%。黑麦草的 P_n 、 T_r 和 C_i 均随复合重金属浓度的增加呈先升后降的变化趋势, 且均以低浓度处理的最大, 分别比 CK 极显著提高了 33.10%、20.23% 和 22.05%, G_s 则急剧下降, 以高浓度处理的最低, 比 CK 极显著降低了 35.97%。龙须草的光合参数随土壤复合重金属浓度的增加而降低, 高浓度处理的 P_n 、 T_r 、 G_s 和 C_i 均最小, 分别比 CK 极显著下降 38.53%、45.77%、41.52% 和 28.82%。

单作模式下, 随土壤复合重金属浓度的增加, 皇竹草叶片的 C_i 呈先增后减的变化趋势, 低浓度处理比 CK 增加 5.53%, 无显著差异, 高浓度处理则极显著下降了 21.65%; 而 P_n 、 T_r 、 G_s 呈逐渐升高的变化趋势, 高浓度处理的最大, 分别比 CK 极显著提高了 104.13%、57.62% 和 153.34%。黑麦草和龙须草的 P_n 、 T_r 、 G_s 和 C_i 均呈下降的趋势, 且均以高浓度处理的最小, 分别比 CK 极显著降低了 49.31%、16.80%、20.17%、42.44% 和 57.65%、38.60%、56.55%、50.11%。

随铅镉铜锌复合浓度的增加, 皇竹草叶片的 P_n 、 T_r 、 G_s 和 C_i 均呈增加的趋势, 均以高浓度处理的最大, 分别比 CK 极显著上升了 42.04%、35.44%、82.14% 和 48.23%; 黑麦草的 P_n 和 G_s 呈下降的趋势, 以高浓度处理的最小, 分别比 CK 极显著减少了 47.14% 和 26.94%, T_r 和 C_i 呈先升后降的趋势, 与 CK 的差异均不显著; 龙须草的 P_n 、 T_r 、 G_s 和 C_i 呈下降的趋势, 高浓度处理的最小, 分别比 CK 极显著降低了 53.24%、41.75%、51.50% 和 39.40%。

2.2 对牧草叶片光合色素含量的影响

从表 2 可见, 间作模式下, 皇竹草和龙须草叶片 Chl a、Chl b、Chl a+b 和 Car 含量均随土壤铅镉铜锌复合浓度的增加呈先增后减的变化趋势, 且均以低浓度处理的最大, 分别比 CK 极显著增加了 44.59%、96.30%、52.17%、12.50% 和 46.36%、40.74%、45.26%、77.78%。黑麦草叶片 Chl a、Chl b、Chl a+b 含量也呈先升后降的变化规律, 以低浓度处理的最大, 分别比 CK 极显著增加了 18.37%、34.78% 和 22.31%; Car 含量则逐渐增加, 低、高浓度处理的比 CK 显著增加了 13.33% 和 43.33%。

单作模式下, 皇竹草叶片的 Chl a、Chl b、Chl a+b 和 Car 含量均随土壤铅镉铜锌复合浓度的增加

表 1 不同种植模式下重金属污染对牧草叶片光合作用的影响

Table 1 Effects of heavy metal pollution on photosynthesis of forage leaves under different planting patterns

牧草 Forage	P _n [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$]			T _r [$\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$]			G _s [$\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$]			C _i ($\mu\text{mol}/\text{mol}$)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
PS 对照 CK	8.23cC	9.60bAB	8.92cB	3.87cC	4.03bB	3.95bB	110.0cC	129.7cC	119.8cC	72.33aA	32.00cC	52.17cC
低 Low	11.57bB	11.37aA	11.47bA	4.80bB	5.90aA	5.35aA	190.3bB	197.3aA	193.8bB	76.33aA	78.33aA	56.50bB
高 High	16.80aA	8.53bB	12.67aA	6.10aA	4.60bAB	5.35aA	278.7aA	157.7bB	218.2aA	56.67bB	56.33bB	77.33aA
平均 Mean	12.20aA	9.83bB		4.92aA	4.82aA		193.0aA	161.5bB		68.44aA	55.55bB	
LP 对照 CK	16.77aA	4.23bB	10.50aA	6.13aA	4.30bB	5.22aA	226.3aA	168.7aA	197.5aA	136.7aA	127.0cB	131.8aA
低 Low	11.53bB	5.63aA	8.58bB	5.50bAB	5.17aA	5.33aA	183.7bB	151.7bB	167.7bB	109.7bB	155.0aA	132.3aA
高 High	8.50cC	2.60cC	5.55cC	5.10bB	3.77cC	4.43bB	180.7bB	108.0cC	144.3cC	78.67cC	143.7bA	111.2bB
平均 Mean	12.27aA	4.16bB		5.58aA	4.41bB		196.9aA	142.8bB		108.3bB	141.9aA	
JE 对照 CK	11.57aA	3.53aA	7.55aA	5.70aA	4.37aA	5.03aA	198.7aA	100.3aA	149.5aA	153.0aA	155.0aA	154.0aA
低 Low	6.87bB	2.73bB	4.80bB	4.73bB	2.67bB	3.70bB	140.3bB	68.67bB	104.5bB	124.7bB	149.7aA	137.2bB
高 High	4.90cC	2.17cB	3.53cC	3.50cC	2.37bB	2.93cC	86.33cC	58.67cC	72.50cC	76.33cC	110.3bB	93.33cC
平均 Mean	7.78aA	2.81bB		4.64aA	3.13bB		141.8aA	75.89bB		118.0bB	138.3aA	

PS: 皇竹草; LP: 黑麦草; JE: 龙须草; 1: 单作; 2: 间作; 3: 平均; P_n: 净光合速率; T_r: 蒸腾速率; G_s: 气孔导度; C_i: 胞间 CO₂ 浓度。同列数据后不同小写和大写字母分别表示差异显著 ($P < 0.05$) 和极显著 ($P < 0.01$)。下表同。

PS: *Pennisetum sinense*; LP: *Lolium perenne*; JE: *Juncus effusus*; 1: Monoculture; 2: Intercropping; 3: Mean; P_n: Net photosynthetic rate; T_r: Transpiration rate; G_s: Stomatal conductance; C_i: Inter-cellular CO₂ concentration. Data followed different small and capital letters within column indicate significant differences at 0.05 and 0.01 levels, respectively. The same is following Tables.

表 2 不同种植模式下重金属污染对牧草叶片光合色素含量的影响

Table 2 Effects of heavy metal pollution on photosynthetic pigment content of forage leaves under different planting patterns

牧草 Forage	Chl a (mg/g)			Chl b (mg/g)			Chl a+b (mg/g)			Car (mg/g)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
PS 对照 CK	1.77bB	1.57cB	1.67bB	0.42bB	0.27cC	0.34bB	2.18bB	1.84cC	2.01bB	0.39bB	0.48bB	0.43cC
低 Low	1.91aA	2.27aA	2.09aA	0.56aA	0.53aA	0.54aA	2.47aA	2.80aA	2.63aA	0.55aA	0.54aA	0.55aA
高 High	0.86cC	2.11bA	1.49cC	0.32cC	0.40bB	0.36bB	1.17cC	2.52bB	1.84cC	0.42bB	0.53aAB	0.47bB
平均 Mean	1.51bB	1.99aA		0.43aA	0.40bB		1.94bB	2.39aA		0.45bB	0.52aA	
LP 对照 CK	1.25aA	0.98bB	1.11bB	0.33aA	0.23bB	0.28aA	1.58aA	1.21bB	1.39bB	0.29bAB	0.30cB	0.29bB
低 Low	1.13bB	1.16aA	1.15aA	0.27bB	0.31aA	0.29aA	1.40bB	1.48aA	1.44aA	0.31aA	0.34bB	0.33aA
高 High	1.01cC	0.59cC	0.80cC	0.21cC	0.14cC	0.17bB	1.21cC	0.73cC	0.97cC	0.26cB	0.43aA	0.34aA
平均 Mean	1.13aA	0.91bB		0.27aA	0.23bB		1.40aA	1.14bB		0.29bB	0.36aA	
JE 对照 CK	1.36aA	1.10cB	1.23bB	0.47aA	0.27bB	0.37aA	1.82aA	1.37bB	1.60bB	0.36aA	0.27cC	0.31bB
低 Low	1.32bA	1.61aA	1.47aA	0.37bB	0.38aA	0.38aA	1.69bB	1.99aA	1.84aA	0.32bA	0.48aA	0.40aA
高 High	1.23cB	1.25bB	1.24bB	0.28cC	0.23cB	0.26bB	1.51cC	1.49bB	1.50cC	0.27cB	0.37bB	0.32bB
平均 Mean	1.30aA	1.32aA		0.37aA	0.29bB		1.67aA	1.62bA		0.31bB	0.37aA	

呈先增后减的变化趋势, 均以低浓度处理最高, 分别比 CK 极显著增加了 7.91%、33.33%、13.30% 和 41.03%。黑麦草叶片的 Chl a、Chl b、Chl a+b 含量则呈下降的趋势, 以高浓度处理最小, 分别比 CK 极显著减少了 23.76%、36.36% 和 23.41%; 低浓度处理的 Car 含量比 CK 显著提高 10.34%, 而高浓度处理的显著低于 CK。龙须草叶片的 Chl a、Chl b、Chl a+b 和 Car 含量均逐渐降低, 以高浓度处理的最小, 分别比 CK 极显著降低了 9.56%、40.43%、17.03% 和 25.00%。

随铅镉铜锌复合浓度的增加, 皇竹草和龙须草叶片的 Chl a、Chl b、Chl a+b 和 Car 含量均呈先增后减的趋势, 均以低浓度处理的最大, 分别比 CK 增加了 25.15%、58.82%、30.84%、27.91% 和 19.51%、2.70%、15.00%、29.03%, 除龙须草 Chl b 含量与 CK 差异不显著外, 其余均达极显著差异; 黑麦草叶片的 Chl a、Chl b 和 Chl a+b 含量呈先升后降的趋势, 以低浓度处理的最大, 分别比 CK 增加了 3.60%、3.57% 和 3.60%, 除 Chl b 与 CK 的差异不显著, 其余均达极显著差异, Car 含量呈递增的趋势,

以高浓度处理最大, 比 CK 极显著提高了 17.24%。

2.3 对牧草叶片和总生物量的影响

由表 3 可知, 间作模式下, 随土壤铅镉铜锌复合浓度的增加, 皇竹草叶生物量呈先升后降的趋势, 低浓度处理的最高, 比 CK 极显著增加 51.76%; 黑麦草的地上部生物量呈逐渐增加的趋势, 以高浓度处理的最高, 比 CK 极显著增加 88.89%; 龙须草的地上部生物量呈递减的趋势, 以高浓度处理的最小, 比 CK 极显著减少 42.86%。单作模式下, 皇竹草叶生物量随土壤铅镉铜锌复合浓度的增加呈先升后减的变化趋势, 低浓度处理的最高, 比 CK 极显著增加 29.09%; 黑麦草的地上部生物量呈下降的趋势, 高浓度处理的最小, 比 CK 极显著降

低 50.00%; 龙须草的地上部生物量呈下降的趋势, 高浓度处理的最小, 比 CK 极显著降低 60.00%。

总体来说, 间作下的 3 种牧草的叶片和总生物量均极显著高于单作。随铅镉铜锌复合浓度的增加, 皇竹草的叶片和总生物量均呈先增后减的趋势, 以低浓度处理的最高, 叶片生物量比 CK 极显著增加 44.15%, 总生物量与 CK 的差异不显著; 黑麦草的叶片生物量呈增加的趋势, 高浓度处理比 CK 极显著提高 22.22%, 总生物量呈递减的趋势; 龙须草的叶片和总生物量均呈下降的趋势, 以高浓度处理的最小, 分别比 CK 极显著减少 52.17% 和 53.66%。

2.4 对牧草叶片重金属含量的影响

由表 4 可见, 在单作模式下, 3 种牧草叶片的

表 3 不同种植模式下重金属污染对牧草叶片和总生物量的影响

Table 3 Effect of heavy metal pollution on leaf and total biomass of forages under different planting patterns

牧草 Forage		叶生物量 Leaf biomass (g)			总生物量 Total biomass (g)		
		1	2	3	1	2	3
PS	对照 CK	1.10bB	1.99bB	1.54bB	2.51aA	4.33bB	3.42aA
	低 Low	1.42aA	3.02aA	2.22aA	2.35aA	4.79aA	3.57aA
	高 High	0.91cC	1.73bB	1.32cC	1.29bB	2.63cC	1.96bB
	平均 Mean	1.14bB	2.24aA		2.05bB	3.92aA	
LP	对照 CK	0.10aA	0.09cC	0.09bB	0.13aA	0.19aA	0.13aA
	低 Low	0.06bB	0.14bB	0.10bAB	0.07bB	0.16bB	0.11cC
	高 High	0.05bB	0.17aA	0.11aA	0.05cC	0.14cC	0.12bB
	平均 Mean	0.07bB	0.13aA		0.08bB	0.16aA	
JE	对照 CK	0.25aA	0.21aA	0.23aA	0.38aA	0.45aA	0.41aA
	低 Low	0.10bB	0.18bB	0.14bB	0.20bB	0.36bB	0.28bB
	高 High	0.10bB	0.12cC	0.11cC	0.18cB	0.20cC	0.19cC
	平均 Mean	0.15bB	0.17aA		0.25bB	0.33aA	

表 4 不同种植模式下重金属污染对牧草叶片重金属含量的影响

Table 4 Effect of heavy metal pollution on heavy metal content in forage leaves under different planting patterns

牧草 Forage		Pb (mg/kg)			Cd (mg/kg)			Cu (mg/kg)			Zn (mg/kg)		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
PS	对照 CK	0.00cC	0.00cC	0.00cC	0.00cC	0.00cC	0.00cC	0.00cC	0.00cC	0.00cC	0.00cC	0.00cC	0.00cC
	低 Low	14.47bB	24.46bB	19.46bB	9.30bB	20.58bB	14.94bB	145.1bB	155.8bB	150.5bB	122.3bB	140.4bB	131.3bB
	高 High	32.39aA	42.42aA	37.41aA	14.96aA	25.87aA	20.41aA	197.3aA	233.3aA	215.3aA	155.0aA	160.7aA	157.8aA
	平均 Mean	15.62bB	22.29aA		8.08bB	15.48aA		114.1bB	129.7aA		92.43bB	100.3aA	
LP	对照 CK	0.00cC	0.00cC	0.00cC	0.00cC	0.00cC	0.00cC	0.00cC	0.00cC	0.00cC	0.00cC	0.00cC	0.00cC
	低 Low	28.68bB	41.56bB	35.12bB	10.89bB	15.39bB	13.14bB	14.13bB	15.40bB	14.77bB	229.5bB	284.0bB	256.7bB
	高 High	42.72aA	52.82aA	47.77aA	25.80aA	37.86aA	31.83aA	49.13aA	68.24aA	58.68aA	461.0aA	510.4aA	485.7aA
	平均 Mean	23.80bB	31.46aA		12.23bB	17.75aA		21.09bB	27.88aA		230.2bB	264.8aA	
JE	对照 CK	0.00cC	0.00cC	0.00cC	0.00cC	0.00cC	0.00cC	0.00cC	0.00cC	0.00cC	0.00cC	0.00cC	0.00cC
	低 Low	10.63bB	16.75bB	13.69bB	3.98bB	5.45bB	4.72bB	180.3bB	175.6bB	177.9bB	56.58bB	63.93bB	60.25bB
	高 High	32.63aA	39.31aA	35.97aA	6.28aA	13.03aA	9.65aA	283.9aA	218.4aA	251.2aA	77.85aA	85.24aA	81.54aA
	平均 Mean	14.42bB	18.69aA		3.42bB	6.16aA		154.7aA	131.3bB		44.81bB	49.72aA	

Pb、Cd、Cu、Zn 含量均随铅镉铜锌复合浓度的升高呈上升的趋势, 高浓度处理极显著高于 CK, 皇竹草分别提高 32.39、14.96、197.3、155.0 mg/kg, 黑麦草提高 42.72、25.80、49.13 和 461.0 mg/kg, 龙须草提高 32.63、6.28、283.9 和 77.85 mg/kg。

在间作模式下, 3 种牧草叶片的 Pb、Cd、Cu 和 Zn 含量均随铅镉铜锌复合浓度的升高呈增加的趋势, 高浓度处理极显著高于 CK, 皇竹草提高 42.42、25.87、233.3、160.7 mg/kg, 黑麦草提高 52.82、37.86、68.24 和 510.4 mg/kg, 龙须草提高 39.31、13.03、218.4 和 85.24 mg/kg。

总体上看, 间作的 3 种牧草叶片 Pb、Cd、Cu、Zn 含量均极显著高于单作。随铅镉铜锌复合浓度的增加, 3 种牧草叶片的 Pb、Cd、Cu、Zn 含量均呈增加的趋势, 高浓度处理的极显著高于 CK, 皇竹草分别增加 37.41、20.41、215.3 和

157.8 mg/kg; 黑麦草增加 47.77、31.83、58.68 和 485.7 mg/kg; 龙须草增加 35.97、9.65、251.2 和 81.54 mg/kg。

2.5 方差分析

方差分析表明(表 5), 除种植模式对皇竹草的 T_r 影响不显著外, 种植模式、重金属污染和种植模式×重金属污染交互对皇竹草、黑麦草和龙须草叶片光合参数的影响均达到极显著水平。同时, 除种植模式对龙须草叶片的 Chl a+b 含量的影响仅达显著水平, 对 Chl a 含量的影响不显著外, 种植模式、重金属污染浓度及其交互对 3 种牧草叶片的 Chl a、Chl b、Chl a+b 和 Car 含量的影响均达极显著水平。从表 6 可见, 种植模式、重金属污染及其交互对 3 种牧草叶片生物量、总生物量和 Pb、Cd、Cu 和 Zn 含量的影响均达到极显著水平。

表 5 种植模式和重金属污染对牧草叶片光合作用和光合色素影响的 F 值

Table 5 F value of effect of planting pattern and heavy metal pollution on photosynthesis of forage leaves

牧草 Forage	因子 Factor	P_n	T_r	G_s	C_i	Chl a	Chl b	Chl	Car
PS	A	49.39**	0.35	269.80**	146.60**	407.40**	13.14**	555.90**	102.20**
	B	43.12**	50.91**	954.40**	213.00**	229.00**	211.00**	649.80**	113.60**
	A×B	78.54**	33.80**	550.80**	166.50**	322.40**	54.25**	673.80**	35.09**
LP	A	1415**	131.60**	1587**	572.20**	837.70**	51.73**	762.60**	118.40**
	B	178.60**	30.87**	513.40**	98.85**	865.20**	162.80**	995.70**	21.70**
	A×B	105.10**	18.79**	76.43**	253.70**	315.40**	54.28**	336.70**	57.77**
JE	A	602.60**	257.60**	1201**	194.50**	1.26	160.10**	6.76*	91.80**
	B	137.30**	169.90**	551.90**	615.20**	67.06**	155.90**	87.47**	80.29**
	A×B	61.42**	9.08**	117.40**	42.70**	70.38**	100.60**	100.10**	152.90**

*: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$. A: 种植模式; B: 重金属污染。下表同。

*: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$. A: Planting pattern; B: Heavy metal pollution. The same is following Table.

表 6 种植模式和重金属污染对牧草叶片生物量和重金属含量影响的 F 值

Table 6 F value of effects of planting pattern and heavy metal pollution on biomass and heavy metal content in forage leaves

牧草 Forage	因子 Factor	叶片生物量 Leaf biomass	总生物量 Total biomass	Pb	Cd	Cu	Zn
PS	A	489.00**	638.90**	515.30**	574.1**	77.05**	105.9**
	B	117.70**	192.30**	5404**	1561**	5180**	16073**
	A×B	25.50**	18.55**	128.80**	143.6**	36.21**	47.91**
LP	A	569.30**	7558**	152.20**	403.1**	119.3**	159.5**
	B	9.34**	136.30**	2119**	4514**	3210**	10475**
	A×B	178.20**	1805**	39.74**	163.8**	98.42**	40.17**
JE	A	32.16**	164.10**	182.30**	1105**	344.1**	131.4**
	B	507.40**	430.40**	4405**	4567**	13952**	12992**
	A×B	105.50**	39.27**	45.85**	618.1**	279.2**	32.85**

3 结论和讨论

叶绿素可以吸收、转化及传递光能, 在光合反

应中起着至关重要的作用。叶绿素含量会直接影响植物的光合作用, 光合作用不仅与叶片的叶绿素含量有关, 还与 P_n 、 T_r 、 G_s 、 C_i 等有关^[19-20]。本研究

结果表明, 低浓度重金属污染下, 间作的皇竹草光合作用参数和光合色素含量均高于单作, 黑麦草和龙须草的光合色素含量高于单作、光合作用参数低于单作, 说明间作使皇竹草光反应中心吸收较多的光能, 促进光合参数的增加, 但是光合色素含量并不是决定光合作用的决定性因素, 因此黑麦草和龙须草的光合作用参数在间作下并未得到提高, 可能与牧草品种等有关。这与杨晶^[21]的研究结果一致。高浓度重金属污染下间作的 3 种牧草光合特性均低于单作, 与单作相比, 间作皇竹草叶片的光合色素含量极显著上升, 光合作用参数极显著下降; 黑麦草和龙须草叶片的 C_i 、 Car 极显著增加, P_n 、 T_r 、 G_s 、 $Chl a$ 、 $Chl b$ 和 $Chl a+b$ 极显著减少, 可能是间作系统中, 尤其在高污染逆境环境中, 不同植物的地上部会竞争性利用光照和热量^[22], 导致光合作用参数和光合色素有所降低。从单一或总体重金属污染来看, 与单作相比, 间作 3 种牧草的叶片生物量和总生物量及重金属含量均极显著上升, 可能是间作加快了不同植物共生期间的养分转化, 改善土壤的养分状况, 提高植物对有效养分的吸收, 以确保植物在间作期间所需养分的供给, 还能改善作物的铁营养状况, 提高作物的生物量^[23]等。间作体系主要是通过改变 3 种牧草根系的分泌物、土壤酶活性、土壤微生物等根际环境, 间接改变土壤中重金属铅镉铜锌的有效性, 最终直接提高牧草对铅镉铜锌的吸收累积^[21]。这与前人^[23-25]的研究结果类似。因此选择合适的植物间作可以提高富集植物吸收重金属的量。

重金属胁迫会影响植物的光合作用, 导致碳固定和同化效率降低^[14]。胁迫使活性氧在细胞中积累, 大量的活性氧扩散到叶绿体, 可加速叶绿素的分解, 进而影响光合作用^[26]。重金属污染胁迫造成植物许多生理活动异常, 使生长发育受阻, 但其对植物的影响存在剂量效应^[27]。本研究结果表明, 皇竹草和黑麦草叶片的光合参数随重金属胁迫程度上升而上升, 而龙须草叶片的光合参数则下降。这与前人^[28-29]的研究结果相近。低浓度下牧草通过提高气孔导度、蒸腾速率等从而增强光合速率, 这是一种对最初伤害进行自我保护的应激代谢活动, 植物应激产生大量的代谢产物同铅镉铜锌结合以解毒, 这也是牧草的适应性反应^[30]。高浓度铅镉铜锌的胁迫导致激活的代谢系统加速损伤, 引起牧草体内营养元素的不平衡, 造成代谢失调, 抑制生长,

从而减少叶的同化面积, 缩短叶的寿命, 造成光合速率下降; 另外, 铅镉铜锌还引起气孔开度减少甚至关闭, CO_2 不能进入叶片, 叶片内淀粉的水解作用加强, 光合产物运出又较缓慢, 结果造成糖分累积, 呼吸消耗增加, 光合速率降低。皇竹草叶片的光合作用参数随重金属污染浓度保持持续上升, 可能是皇竹草对重金属污染的耐性强于黑麦草和龙须草。3 种牧草叶片的光合色素含量均呈现低促高抑现象, 与前人^[28,31]的研究结果相似, 可能是在低浓度时, 牧草的适应性大于重金属铅镉铜锌复合的毒害作用, 从而表现出积极的刺激效果, 随着铅镉铜锌复合浓度的加大, 铅镉铜锌进入细胞内作用于几种叶绿素合成酶(原叶绿素酸脂还原酶、S-氨基乙酐丙酸合成酶、胆色素原脱氨酶)的肽链中富含-SH 基的部分, 抑制了酶活性, 从而阻碍了叶绿素的合成^[32], 还有可能是由于铅镉铜锌取代了其中的 Fe^{3+} 、 Zn^{2+} 和 Mg^{2+} , 破坏了叶绿体的结构和功能活性, 进而表现出抑制和毒害作用^[27]。重金属胁迫使皇竹草的叶生物量和总生物量呈低促高抑现象, 可能是低浓度铅镉铜锌复合污染能刺激某些酶的活性, 促进植物生长, 随着复合污染程度的增加, 保护反应消失, 导致植物生长量下降^[29]。而重金属胁迫使黑麦草和龙须草的叶生物量和总生物量下降, 可能是黑麦草和龙须草对重金属的耐性比皇竹草低, 光合作用参数和光合色素含量的变化也导致生物量的下降, 同时生物量还与作物种类、土壤等因素密切相关^[33-34]。3 种牧草叶片的重金属含量在重金属胁迫下极显著增加, 说明他们对重金属铅镉铜锌均具有一定吸收能力, 这与前人^[10-11]的结论相近。

本研究结果表明, 种植模式×重金属污染互作对牧草叶片的光合参数、光合色素含量、生物量和重金属含量的影响基本上达极显著水平。在复合污染土壤中, 间作 3 种牧草有利于叶片干物质的积累和重金属的吸收, 单作更有利于提高叶片的光合作用能力; 重金属胁迫下, 不同种植模式皇竹草叶片光合特性、生物量和吸收重金属能力整体强于黑麦草和龙须草, 说明种植模式与重金属污染具有一定的相关性。但是, 种植模式×重金属污染交互作用的影响比较复杂, 与作物种类、重金属污染种类和浓度、土壤种类、间作系统中如何合理安排不同植物的种植时间、空间布局等因素密切相关, 因此, 有关种植模式×重金属污染交互作用仍有待于深入

研究。在实际应用中应综合考虑二者的关系,以确定不同种植模式下,各种牧草在重金属污染下的适应能力以及达到最大程度吸收土壤中的重金属,达到土壤修复的目的。

参考文献

- [1] ZHAO M. Status, reason, harmfulness and remediation of heavy metal contaminated soil [J]. *Resour Economiz Environ Prot*, 2016(4): 181, 184. doi: 10.3969/j.issn.1673-2251.2016.04.152.
- 赵铭. 土壤重金属污染现状、原因、危害及修复研究 [J]. *资源节约与环保*, 2016(4): 181, 184. doi: 10.3969/j.issn.1673-2251.2016.04.152.
- [2] WANG Y S, HOU X L, WU P F, et al. Analysis of the characteristics and the evaluation of heavy metal pollutions in the deserted land-area left-over by the rare earth mining in Changting, Fujian [J]. *J Safety Environ*, 2014, 14(4): 259–262. doi: 10.13637/j.issn.1009-6094.2014.04.056.
- 王友生, 侯晓龙, 吴鹏飞, 等. 长汀稀土矿废弃地土壤重金属污染特征及其评价 [J]. *安全与环境学报*, 2014, 14(4): 259–262. doi: 10.13637/j.issn.1009-6094.2014.04.056.
- [3] HOU X L, ZHUANG K, LIU A Q, et al. Comparison of soil quality at different revegetation stages of mining wasteland at Zijinshan Gold-copper Mine Fujian Province [J]. *Chin Agric Sci Bull*, 2012, 28(14): 258–263. doi: 10.3969/j.issn.1000-6850.2012.14.051.
- 侯晓龙, 庄凯, 刘爱琴, 等. 福建紫金山金铜矿废弃地不同植被恢复阶段土壤质量比较 [J]. *中国农学通报*, 2012, 28(14): 258–263. doi: 10.3969/j.issn.1000-6850.2012.14.051.
- [4] LIAO J B, WEN Z W, RU X, et al. Distribution and migration of heavy metals in soil and crops affected by acid mine drainage: Public health implications in Guangdong Province, China [J]. *Ecotoxicol Environ Safety*, 2016, 124: 460–469. doi: 10.1016/j.ecoenv.2015.11.023.
- [5] GUO H J. Studies on remediation and treatment of Pb, Zn and Cd contaminated soil [D]. Zhengzhou: Zhongyuan University of Technology, 2017: 4–5.
- 郭红江. Pb、Zn、Cd 复合重金属污染土壤的修复与处理研究 [D]. 郑州: 中原工学院, 2017: 4–5.
- [6] LIU C. Remediation of heavy metal contaminated soil by intercropping *Phyllostachys pubescens* with *Sedum plumbizincicola* [D]. Hangzhou: Zhejiang Agriculture & Forestry University, 2017: 4–5.
- 刘晨. 毛竹-伴矿景天间作修复重金属污染土壤研究 [D]. 杭州: 浙江农林大学, 2017: 4–5.
- [7] WANG M K. Effects of legume-gramineae intercropping on phyto-remediation of Pb, Cd contaminated soil [D]. Xianyang: Northwest Agriculture & Forestry University, 2017: 5–6.
- 王梦珂. 豆科-禾本科间作对铅镉污染土壤的植物络合诱导修复的影响 [D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2017: 5–6.
- [8] YI X Y, JIANG L J, CHEN J Z, et al. Effects of lead/zinc railings on photosynthetic characteristics and antioxidant enzyme system of *Ricinus communis* L. [J]. *Chin J Ecol*, 2016, 35(4): 880–887. doi: 10.13292/j.1000-4890.201604.009.
- 易心钰, 蒋丽娟, 陈景震, 等. 铅锌尾矿渣对蓖麻光合特性及抗氧化酶系统的影响 [J]. *生态学杂志*, 2016, 35(4): 880–887. doi: 10.13292/j.1000-4890.201604.009.
- [9] HOU Q Q. Effects of soil contaminants from Cd and Zn on soil enzyme activities and plant ryegrass recovery [D]. Xi'an: Chang'an University, 2018: 4–5.
- 侯琪琪. Cd、Zn 土壤污染物对土壤酶活性及修复植物黑麦草的影响研究 [D]. 西安: 长安大学, 2018: 4–5.
- [10] ZHU J F, LI M H, XIE P J, et al. Phytoremediation of single and combined pollution of Cu and Pb by *Medicago sativa*, *Lolium perenne*, and *Pennisetum alopecuroides* [J]. *Chin J Eco-Agric*, 2018, 26(2): 303–313. doi: 10.13930/j.cnki.cjea.170363.
- 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. doi: 10.13930/j.cnki.cjea.170363.
- [11] QIAN H Y, WANG X X, JIANG P L, et al. The endurance and the restorative effect of continuous stubbles ryegrass on Cu, Zn pollution in soil [J]. *Acta Agric Univ Jiangxi*, 2004, 26(5): 801–804. doi: 10.13836/j.jjau.2004183.
- 钱海燕, 王兴祥, 蒋佩兰, 等. 黑麦草连茬对铜、锌污染土壤的耐性及其修复作用 [J]. *江西农业大学学报*, 2004, 26(5): 801–804. doi: 10.13836/j.jjau.2004183.
- [12] YI Z C, HE J B, CHENG H, et al. Effects of Cd polluted soil on the modular growth and physiological characteristics of *Pennisetum hybridum* [J]. *J Agro-Environ Sci*, 2014, 33(2): 276–282. doi: 10.11654/jaes.2014.02.011.
- 易自成, 贺俊波, 程华, 等. 镉对皇竹草构件生长及生理特性的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(2): 276–282. doi: 10.11654/jaes.2014.02.011.
- [13] ZHANG L Q, LIN P, LI Y Z. Effects of combined pollution of Pb and Cd on photosynthesis of *Eulaliopsis binata* [J]. *Hunan For Sci Technol*, 2008, 35(6): 54–56, 58. doi: 10.3969/j.issn.1003-5710.2008.06.014.
- 张力群, 林鹏, 李有志. Pb、Cd 复合污染对龙须草光合作用的影响 [J]. *湖南林业科学*, 2008, 35(6): 54–56, 58. doi: 10.3969/j.issn.1003-5710.2008.06.014.
- [14] ZHAO J W, LUO X G, WANG Z, et al. Photosynthetic response of ryegrass to uranium stress and the absorption characteristics of

- enriched uranium [J]. *J Agro-Environ Sci*, 2019, 38(11): 2456–2464. doi: 10.11654/jaes.2019-0235.
- 赵继武, 罗学刚, 王焯, 等. 黑麦草对轴胁迫的光合响应及轴吸收特性研究 [J]. *农业环境科学学报*, 2019, 38(11): 2456–2464. doi: 10.11654/jaes.2019-0235.
- [15] LU R K. *Analysis Method of Soil Agricultural Chemistry* [M]. Beijing: Chinese Agricultural Science Press, 1999: 33–55, 73–89, 213–218.
- 鲁如坤. *土壤农业化学分析方法* [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999: 33–55, 73–89, 213–218.
- [16] ZOU W T, CHEN X F, XIONG D Z. Effects of Ca application on photosynthetic characteristics and dry weight of *Nicotiana tabacum* leaf under different N levels [J]. *J Plant Resour Environ*, 2015, 24(1): 69–76. doi: 10.3969/j.issn.1674-7895.2015.01.10.
- 邹文桐, 陈星峰, 熊德中. 不同氮水平下施钙量对烤烟叶片光合特性和干质量的影响 [J]. *植物资源与环境学报*, 2015, 24(1): 69–76. doi: 10.3969/j.issn.1674-7895.2015.01.10.
- [17] LIU J M, LI J, WEN A H, et al. Responses of photosynthetic pigment and photosynthetic characteristics of *Cinnamomum migao* to drought stress [J]. *Jiangsu Agric Sci*, 2019, 47(9): 171–174. doi: 10.15889/j.issn.1002-1302.2019.09.038.
- 刘济明, 李佳, 文爱华, 等. 米槁幼苗光合色素与光合特征对干旱胁迫的响应 [J]. *江苏农业科学*, 2019, 47(9): 171–174. doi: 10.15889/j.issn.1002-1302.2019.09.038.
- [18] CHEN B, PU H J, JIANG D H, et al. Determination method comparison of lead, cadmium and copper in tea [J]. *J Yunnan Univ (Nat Sci)*, 2011, 33(S2): 457–460.
- 陈保, 蒲泓君, 姜东华, 等. 茶叶中铅、镉、铜含量的测定方法比较 [J]. *云南大学学报(自然科学版)*, 2011, 33(S2): 457–460.
- [19] TIAN Y H, YUAN H F, LONG Y F, et al. Influence of growth light intensity on photosynthetic characteristics in six varieties of *Hevea brasiliensis* seedlings [J]. *J Trop Subtrop Bot*, 2012, 20(3): 270–276. doi: 10.3969/j.issn.1005-3395.2012.03.010.
- 田耀华, 原惠芳, 龙云峰, 等. 生长光强对六个橡胶树品种幼苗光合特性的影响 [J]. *热带亚热带植物学报*, 2012, 20(3): 270–276. doi: 10.3969/j.issn.1005-3395.2012.03.010.
- [20] LÜ Q J, CAO J Y. Photosynthetic Characteristics of two color leaves of *Podocarpus nagi* [J]. *J Trop Subtrop Bot*, 2020, 28(2): 177–184. doi: 10.11926/jtsb.4134.
- 闾邱杰, 曹景怡. 竹柏 2 种颜色叶片的光合特性研究 [J]. *热带亚热带植物学报*, 2020, 28(2): 177–184. doi: 10.11926/jtsb.4134.
- [21] YANG J. The effect and mechanism of intercropping on heavy metal absorption of pepper and maize [D]. Shenyang: Shenyang University, 2016: 5–6, 19.
- 杨晶. 辣椒与玉米间作对重金属吸收的影响及其机理的研究 [D]. 沈阳: 沈阳大学, 2016: 5–6, 19.
- [22] WANG Y Y, WANG H F, LI Z, et al. Effect of intercropping shading on growth and yield of peanut [J]. *J Shanxi Agric Sci*, 2020, 48(2): 218–221. doi: 10.3969/j.issn.1002-2481.2020.02.20.
- 王钰云, 王宏富, 李智, 等. 间作遮阴对花生生长发育及产量的影响 [J]. *山西农业科学*, 2020, 48(2): 218–221. doi: 10.3969/j.issn.1002-2481.2020.02.20.
- [23] CHEN X, GUO X H, ZU Y Q, et al. Accumulation characteristics of Cd and Pb in Broad bean/*Arabis alpina* intercropping system [J]. *J Yunnan Agric Univ (Nat Sci)*, 2016, 31(1): 167–172. doi: 10.16211/j.issn.1004-390X(n).2016.01.026.
- 陈兴, 郭先华, 祖艳群, 等. 蚕豆与小花南芥间作体系中 Cd、Pb 在植物中的累积特征 [J]. *云南农业大学学报(自然科学版)*, 2016, 31(1): 167–172. doi: 10.16211/j.issn.1004-390X(n).2016.01.026.
- [24] LI Z Q, CHEN Z, CHEN G L, et al. Effects of maize-rape intercropping on Cd uptake and accumulation by maize [J]. *Chin J Ecol*, 2016, 35(1): 26–31. doi: 10.13292/j.1000-4890.201601.004.
- 李志贤, 陈章, 陈国梁, 等. 镉富集植物油菜与玉米间作对玉米吸收积累镉的影响 [J]. *生态学杂志*, 2016, 35(1): 26–31. doi: 10.13292/j.1000-4890.201601.004.
- [25] WANG X G. Remediation of cadmium and pyrene contaminated soil by monoculture and intercropping of *Glycine max* and *Solanum nigrum* [D]. Xiayang: Northwest A&F University, 2015: 5–6.
- 王效国. 大豆、龙葵单作和间作对镉、芘污染土壤的修复 [D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2015: 5–6.
- [26] JIN J, YE Y X, LI D, et al. Effect of heavy metal (copper) coercion on maize [J]. *J Maize Sci*, 2006, 14(3): 83–86. doi: 10.13597/j.cnki.maize.science.2006.03.024.
- 金进, 叶亚新, 李丹, 等. 重金属铜对玉米的影响 [J]. *玉米科学*, 2006, 14(3): 83–86. doi: 10.13597/j.cnki.maize.science.2006.03.024.
- [27] LIU A Z. Study on enrichment and tolerance of *Eulaliopsis binata* to the individual pollution of heavy metal Cd and Pb [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2006: 49–51.
- 刘爱中. 单一污染方式下龙须草对重金属镉和铅的富集与耐性研究 [D]. 长沙: 湖南农业大学, 2006: 49–51.
- [28] WANG T. The effect of Pb and Zn compound stress on the physiology and heavy metals accumulation of two kinds of *Medicago* plants [D]. Nanchang: Jiangxi University of Finance and Economics, 2016: 8–9.
- 王婷. Pb、Zn 复合胁迫对两种苜蓿属植物生理及重金属富集作用的影响 [D]. 南昌: 江西财经大学, 2016: 8–9.
- [29] YI X Y. Study on the responses of *Ricinus communis* L. to lead and zinc stress and their mechanisms [D]. Changsha: Central South

- University of Forestry and Technology, 2018: 4–6.
- 易心钰. 蓖麻对铅锌胁迫的响应及其机制研究 [D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2018: 4–6.
- [30] PRASAD M N V. Cadmium toxicity and tolerance in vascular plants [J]. *Environ Exp Bot*, 1995, 35(4): 525–545. doi: 10.1016/0098-8472(95)00024-0.
- [31] YAN Z Q, CHEN Y P, QU M M, et al. Effects of Cd stress on physiological characteristics of alfalfa and its Cd enrichment [J]. *Guihaia*, 2019, 39(2): 218–227. doi: 10.11931/guihaia.gxzw201801040.
- 闫志强, 陈银萍, 蘧苗苗, 等. 镉胁迫对紫花苜蓿幼苗生理特性和镉富集的影响 [J]. *广西植物*, 2019, 39(2): 218–227. doi: 10.11931/guihaia.gxzw201801040.
- [32] SMITH G C, BRENNAN E G, GREENHALGH B J. Cadmium sensitivity of soybean related to efficiency in iron utilization [J]. *Environ Exp Bot*, 1985, 25(2): 99–106. doi: 10.1016/0098-8472(85)90015-2.
- [33] WANG X X. Study on effect of lead-zinc waste residues from mining tailing on chlorophyll fluorescence characteristics in *Melia azedarach* L. [D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2019: 4–5.
- 王旭旭. 铅锌矿区废渣对苦楝叶绿素荧光特性的影响研究 [D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2019: 4–5.
- [34] MU Z M, JIANG B B, PAN Y Z, et al. Effect of heavy metal stress on the growth and physiological characteristics of *Pelargonium hortorum* [J]. *Pratac Sci*, 2019, 36(2): 434–441. doi: 10.11829/j.issn.1001-0629.2018-0225.
- 牟祚民, 姜贝贝, 潘远智, 等. 重金属胁迫对天竺葵生长及生理特性的影响 [J]. *草业科学*, 2019, 36(2): 434–441. doi: 10.11829/j.issn.1001-0629.2018-0225.