

## 间作模式对社区花园可食植物生理特性及铅吸收的影响

颜越<sup>1,2</sup>, 金荷仙<sup>1</sup>, 王瑛<sup>1,2</sup>, 陈超怡<sup>1</sup>, 范颖佳<sup>1</sup>, 柳丹<sup>2</sup>

(1. 浙江农林大学 风景园林与建筑学院, 浙江 杭州 311300; 2. 浙江农林大学 浙江省土壤污染生物修复重点实验室, 浙江 杭州 311300)

**摘要:** 【目的】研究间作东南景天 *Sedum alfredii* 的社区花园受铅污染土壤中的植物生理特性及对重金属铅的吸收特征, 以期筛选出降低可食植物对重金属铅吸收的最佳种植模式。【方法】以东南景天以及可食植物青芹 *Apium graveolens*、上海青 *Brassica chinensis*、辣椒 *Capsicum annuum* 和樱桃萝卜 *Raphanus sativus* 为研究材料, 在浙江省杭州市临安区平山苗圃开展盆栽试验。以单作为对照, 分析间作东南景天对可食植物生理生化指标的影响, 以及可食植物的铅吸收转移特征、植物根际土壤 pH 和铅形态分布特征。【结果】①间作显著增加了东南景天、青芹和辣椒的生物量 ( $P < 0.05$ ), 降低了上海青和樱桃萝卜生物量; ②东南景天和可食植物叶片内丙二醛浓度变化表现出一致规律, 间作均低于单作; 间作体系中青芹、辣椒、樱桃萝卜叶片内过氧化氢酶活性比单作分别显著增长 33.92%、41.94%、53.80% ( $P < 0.05$ ); ③间作东南景天显著降低了青芹、辣椒、樱桃萝卜可食部位对铅的积累 ( $P < 0.05$ ), 与单作相比分别下降了 24.37%、162.50% 和 39.82%; ④间作模式降低植物根际土壤 pH, 且改变土壤中铅形态分布。间作东南景天降低了可食植物根际土壤弱酸提取态铅和可氧化态铅的形态占比, 提高了可还原态铅的形态占比。【结论】间作模式促进东南景天对铅的富集和迁移, 减缓铅对可食植物的毒害作用。与东南景天间作, 青芹、辣椒可食部位铅质量分数显著降低, 达到安全食用标准; 樱桃萝卜可食部位铅质量分数有降低的趋势。图 6 表 3 参 31

**关键词:** 社区花园; 可食植物; 间作; 铅污染; 生理指标; 植物修复

中图分类号: TU986; X53 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2023)02-0338-10

## Effects of intercropping patterns on physiological characteristics and Pb uptake of edible plants in community gardens

YAN Yue<sup>1,2</sup>, JIN Hexian<sup>1</sup>, WANG Ying<sup>1,2</sup>, CHEN Chaoyi<sup>1</sup>, FAN Yingjia<sup>1</sup>, LIU Dan<sup>2</sup>

(1. College of Landscape and Architecture, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China; 2. Key Laboratory of Soil Contamination Bioremediation of Zhejiang Province, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China)

**Abstract:** [Objective] The objective is to study the physiological characteristics of plants in Pb contaminated soil and uptake characteristics of Pb in community gardens intercropped with *Sedum alfredii*, in order to screen out the best planting mode to reduce the uptake of Pb by edible plants. [Method] *S. alfredii*, *Apium graveolens*, *Brassica chinensis*, *Capsicum annuum* and *Raphanus sativus* were used as research materials. A pot experiment was carried out in Pingshan Nursery of Lin'an District of Hangzhou City, Zhejiang Province. The effects of intercropping *S. alfredii* on physiological and biochemical indexes of edible plants, uptake and transfer characteristics of Pb, the pH of rhizosphere soil and distribution characteristics of Pb were analyzed.

收稿日期: 2022-05-23; 修回日期: 2022-09-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52278084, 51978626); 上海市城市化生态过程与生态恢复重点实验室项目 (SHUES2021A12)

作者简介: 颜越 (ORCID: 0000-0001-7506-5245), 从事生态修复与地景规划研究。E-mail: 994584807@qq.com。通信作者: 金荷仙 (ORCID: 0000-0002-3752-3097), 教授, 博士生导师, 从事康复花园、生态修复与地景规划、风景园林历史与理论等研究。E-mail: lotusjhx@zafu.edu.cn

[**Result**] (1) Intercropping significantly improved the biomass of *S. alfredii*, *A. graveolens* and *C. annuum*, and reduced the biomass of *B. chinensis* and *R. sativus* ( $P < 0.05$ ). (2) The content of MDA in leaves of *S. alfredii* and edible plants showed a consistent pattern, and intercropping was lower than monoculture. In the intercropping system, CAT activities in leaves of *A. graveolens*, *C. annuum* and *R. sativus* significantly increased by 33.92%, 41.94% and 53.80%, compared with the monoculture system ( $P < 0.05$ ). (3) Intercropping *S. alfredii* significantly reduced Pb accumulation in edible parts of *A. graveolens*, *C. annuum* and *R. sativus*, which decreased by 24.37%, 162.50% and 39.82%, respectively ( $P < 0.05$ ), compared with monoculture. (4) Intercropping decreased the pH of rhizosphere soil and changed the distribution of Pb in soil. Intercropping *S. alfredii* decreased the form proportion of weak acid extracted and oxidized Pb in the rhizosphere soil of edible plants, but increased the form proportion of reducible Pb in soil. [**Conclusion**] The intercropping mode can promote the enrichment and migration of Pb in *S. alfredii* and reduce the toxic effect of Pb on edible plants. Intercropping *S. alfredii* significantly reduces Pb content in edible parts of *A. graveolens* and *C. annuum*, reaching the safe edible standard. The Pb content in edible parts of *R. sativus* tends to decrease, which is an ideal combination mode for intercropping restoration. [Ch, 6 fig. 3 tab. 31 ref.]

**Key words:** community garden; edible plants; intercropping; Pb contamination; physiological indicators; phytoremediation

社区花园 (community gardens) 是指居民在社区碎片绿地内共同建造维护、种植花果蔬菜等的场地<sup>[1]</sup>, 是都市农业在社区应用中的主要形式之一, 因其具有生态、社会和经济效益而广受人们欢迎<sup>[2]</sup>。在社区花园内以种植果蔬为目的的园艺活动能促进居民之间的交流与互动, 满足人们在农耕习俗等中国传统文化中产生的对自然和田园生活的需求与向往<sup>[3]</sup>。作为能够提供公众参与园艺活动和种植食用植物的场所, 土壤环境质量和植物的生长状况对社区花园健康建设具有重大的影响。重金属是土壤环境的主要污染物之一。受长期施肥<sup>[4]</sup>、生活垃圾<sup>[5]</sup>和交通运输<sup>[6]</sup>等人为活动的影响, 社区花园土壤中重金属铅无处不在, 对健康园艺实践产生一定的阻碍。近年来, 国外学者对社区花园土壤中重金属铅污染进行了检测和评估<sup>[7]</sup>, 发现社区花园土壤中的重金属会在可食植物中积累, 对人体产生健康风险<sup>[8]</sup>。MITCHELL 等<sup>[9]</sup>对纽约市社区花园中的 564 个土壤样本进行重金属分析发现: 土壤中铅含量超出标准值。国内社区花园研究处于起步阶段, 对社区花园土壤重金属污染研究较少。杨剑洲等<sup>[10]</sup>在对与社区花园功能相似的种植园农作物调查时发现: 土壤中的铅可在蔬果中积累, 超标率达 2.67%。土壤作为社区花园植物生长最基本的载体, 一方面铅的累积势必会影响植物各项生理指标, 造成社区花园内可食植物产量、质量的降低以及土壤性质的恶化<sup>[11]</sup>; 另一方面铅会在可食植物中积累进入食物链危害人类健康, 增加患病概率<sup>[12]</sup>, 其可能引发的潜在危害已成为城市社区花园土壤污染亟待解决的问题之一。

目前, 以植物修复为代表的生物修复被认为是最经济、安全且可持续的土壤重金属修复方法<sup>[13]</sup>。超富集植物是植物修复技术的核心。东南景天 *Sedum alfredii* 因其环境适应性强, 生长速度较快成为重金属铅污染下的理想植物修复材料<sup>[14]</sup>。近年来, 利用超富集植物去除土壤重金属的研究取得许多成果, 但大多局限于工业区、矿区或农田等场地, 极少关注城市社区花园土壤重金属污染修复问题, 且间作对铅污染下植物生理特性变化及重金属吸收研究较少, 修复策略还不具备较强的针对性和实践性。本研究通过盆栽试验, 探究社区花园土壤铅污染下的 4 种可食植物 (上海青 *Brassica chinensis*、樱桃萝卜 *Raphanus sativus*、辣椒 *Capsicum annuum*、青芹 *Apium graveolens*) 在单作及与东南景天间作 2 种植模式下的生理特性以及对重金属铅的吸收特征, 以期筛选出降低可食植物对铅吸收的最佳种植模式, 打造集生态可持续性和景观多元为一体的社区花园, 促进社区生态与景观协同发展。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

1.1.1 供试土壤 本研究供试土壤采自绍兴市上虞区小担山苗圃区, 取样深度为 0~20 cm。供试土壤自

然风干后, 小部分土壤过 10 目筛, 测定土壤基本理化性质和重金属铅质量分数。经测定, 土壤 pH 6.22, 速效钾为  $7.40 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 有机质为  $2.13 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 碱解氮为  $118.50 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 有效磷为  $2.43 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 铅为  $258.64 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。参照 GB 15618—2018《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准》土壤铅筛选值, 苗圃区铅质量分数超过约 2.8 倍, 并且高于《浙江省土壤地球化学背景值》中规定铅元素环境背景值 8.5 倍。其余土壤过 5 mm 筛, 清除植物残体和石块, 磨碎, 用于盆栽试验。

1.1.2 供试植物 超富集植物东南景天采自浙江省杭州市临安区平山温室。选取长势良好且大小一致的东南景天, 截取 5 cm 枝条, 移至温室在营养土中培育 2 周至长出根系, 选长势良好的苗备用。选择辣椒、上海青、樱桃萝卜、青芹为可食植物。以上 4 种可食植物为本地居民常见种植, 且在人们的日常饮食中不可或缺。

## 1.2 方法

1.2.1 处理方法 盆栽试验于 2021 年 9 月 11 日在浙江省临安区浙江农林大学平山苗圃 ( $30^{\circ}25'N$ ,  $119^{\circ}72'E$ ) 进行。培养盆上、下口径分别为 29.5、17.5 cm, 高 19.7 cm。每盆放置 6 kg 污染土并浇水, 稳定 7 d 后播种, 同时挑选长势相同、生长健壮的东南景天幼苗移栽。待可食植物长出 3~4 片真叶后进行间苗定植, 株距为 10 cm。每盆按十字划分, 以呈对角方式种植 4 株, 且间作使同种植物保持在对角线上。植物单作为对照组, 间作东南景天为处理组, 共设 2 种植植模式, 每组处理 3 次重复, 共计 27 盆 (表 1), 随机分布, 培养 120 d。试验期间定期浇水, 土壤水分维持在田间持水量的 70%, 光照条件为自然光, 观察其生长状况。

表 1 盆栽试验设计

Table 1 Pot experiment design

| 种植模式 | 处理            | 代号   | 种植模式 | 处理              | 代号   |
|------|---------------|------|------|-----------------|------|
| 单作   | 青芹            | Q    | 间作   | 东南景天-上海青(东南景天)  | S-D1 |
| 单作   | 上海青           | S    | 间作   | 东南景天-上海青(上海青)   | S-D2 |
| 单作   | 辣椒            | L    | 间作   | 东南景天-辣椒(东南景天)   | L-D1 |
| 单作   | 樱桃萝卜          | B    | 间作   | 东南景天-辣椒(辣椒)     | L-D2 |
| 单作   | 东南景天          | D    | 间作   | 东南景天-樱桃萝卜(东南景天) | B-D1 |
| 间作   | 东南景天-青芹(东南景天) | Q-D1 | 间作   | 东南景天-樱桃萝卜(樱桃萝卜) | B-D2 |
| 间作   | 东南景天-青芹(青芹)   | Q-D2 |      |                 |      |

说明: 间作模式各处理括号中列出的是该模式下的采样植物

1.2.2 样品收集 可食植物和东南景天同期收获取样, 用尺子测量每株植物的株高和根长, 并将植物分解成根、茎、叶 3 个部分。将根系浸泡于  $20 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  乙二胺四乙酸二钠 ( $\text{EDTANa}_2$ ) 中 20 min, 以去除根系表面吸附的重金属, 随后用去离子水反复冲洗 3 次, 吸干植物表面水分后分成根、茎、叶、果 4 个部分, 装入牛皮纸信封袋内, 分别取样测定鲜质量; 再于  $105 \text{ }^{\circ}\text{C}$  下杀青 0.5 h, 随后在  $70 \text{ }^{\circ}\text{C}$  下烘干至恒量, 测定干质量并粉碎, 分别过 100 目备用用于重金属指标测定。取盆栽中土壤混合样约 1 kg 左右, 清除植物碎片带回实验室自然风干, 将干燥的土样经研磨后分别过 10 和 100 目尼龙筛, 置于样品袋中备用。

1.2.3 测定分析指标 采用硫代巴比妥酸法测定丙二醛 (MDA) 浓度<sup>[15]</sup>, 采用紫外分光光度法测定过氧化氢酶 (CAT) 活性。采用  $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$  混合酸法消解植物样品中的铅, 在消煮植物样品过程中采取平行样和 GSB 标准植物样进行分析质量控制, 同时做空白实验; 采用  $\text{HNO}_3\text{-HF-HClO}_4$  三酸法消解, 测定土壤铅含量, 在消煮过程中采用平行样和 GSS 标准土样进行质量控制, 同时做空白实验。采用 pH 计在 1.0:2.5 土水质量比下测定土壤 pH。采用 BCR 三步萃取法<sup>[16]</sup> 分析土壤铅形态, 分别提取弱酸提取态铅、可还原态铅、可氧化态铅和残渣态铅。每组试验均重复 3 次, 采用石墨炉原子吸收光谱法 (GFAAS, PerkinmerAA800, 美国) 检测样品上层清液中铅质量分数。

## 1.3 数据处理

采用 Excel 2010 和 SPSS V22.0 统计软件进行数据统计与方差分析, Duncan 新复极差法进行差异显著性分析 ( $P < 0.05$ ), 用 GraphPad Prism 9 作图。富集系数 ( $F_{BC}$ ) = 植物器官中铅质量分数/土壤中铅质量分数; 转移系数 ( $F_T$ ) = 植物地上部铅质量分数/植物地下部铅质量分数。

## 2 结果与分析

### 2.1 间作东南景天对可食植物生长及生理特性的影响

2.1.1 植物生长状况 如图1所示：与单作相比，间作模式均显著增加东南景天地上部生物量 ( $P < 0.05$ )，根部生物量均有不同程度增加，但无显著差异 (图1A)。东南景天与樱桃萝卜间作相较于其他3种模式中地上部和根部生物量增幅最大，分别达120.97%、184.78%。与可食植物单作相比，间作促进青芹、辣椒地上部和根部生物量的积累 (图1B)，分别增加了34.47%、52.49%和63.58%、59.86%；其中间作模式下青芹总生物量增幅最大，辣椒增幅最小。上海青地上部生物量显著降低42.05% ( $P < 0.05$ )，根部生物量降低32.05%，但无显著差异；樱桃萝卜地上部生物量降幅达65.10%，根部生物量由  $16.94 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$  降低到  $11.77 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ ，存在显著差异 ( $P < 0.05$ )。

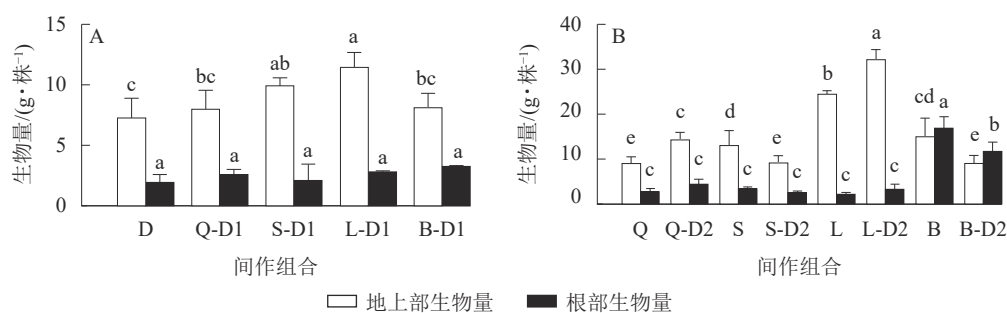


图1 不同间作组合下的植物生物量

Figure 1 Plant biomass under different combination patterns

2.1.2 植物叶片中丙二醛浓度 由图2可知：东南景天和可食植物在不同处理模式下丙二醛浓度表现出较为一致的规律，间作均低于单作。对比东南景天和可食植物在间作下丙二醛浓度的变化，发现东南景天叶片中丙二醛浓度比可食性植物下降明显，其中与上海青间作降幅最高，达156.25% (图2A)。辣椒在间作中丙二醛浓度降低最多，樱桃萝卜次之，分别较单作下降了47.62%、36.76%；上海青、青芹在间作模式中无显著性差异 (图2B)。

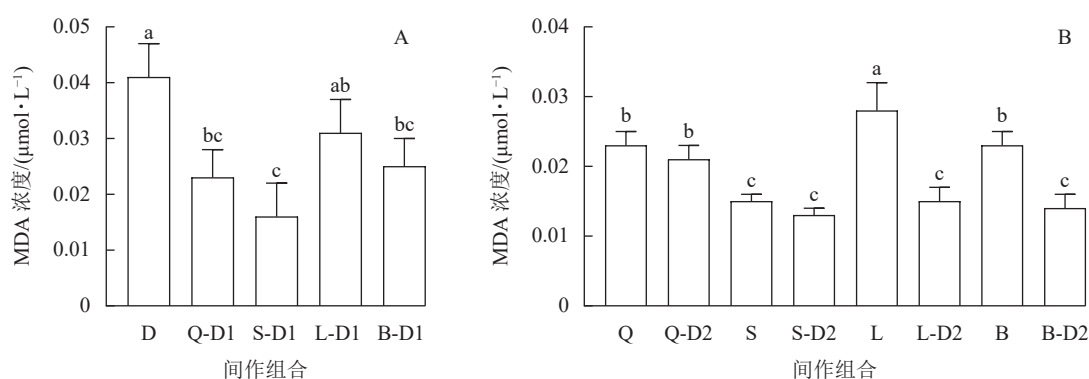
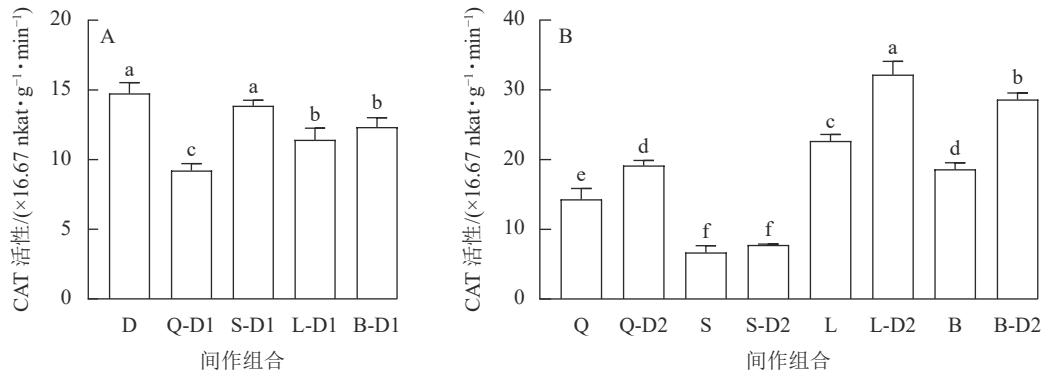


图2 不同间作组合下植物叶片中丙二醛浓度

Figure 2 MDA contents in leaves under different combination modes

2.1.3 植物叶片中过氧化氢酶的活性 由图3可知：东南景天在不同间作处理下过氧化氢酶活性均有不同程度的降幅。东南景天与上海青在间作模式中东南景天相比单作降幅为6.40%，但无显著性差异。而东南景天与樱桃萝卜、青芹、辣椒在间作模式下过氧化氢酶活性相比单作分别降低了19.63%、60.07%、29.17%，均存在显著差异 ( $P < 0.05$ ) (图3A)。可食植物青芹、辣椒、樱桃萝卜与东南景天间作模式处理中叶片过氧化氢酶活性均存在显著差异 ( $P < 0.05$ )，相比单作分别升高了33.92%、41.94%、53.80% (图3B)。



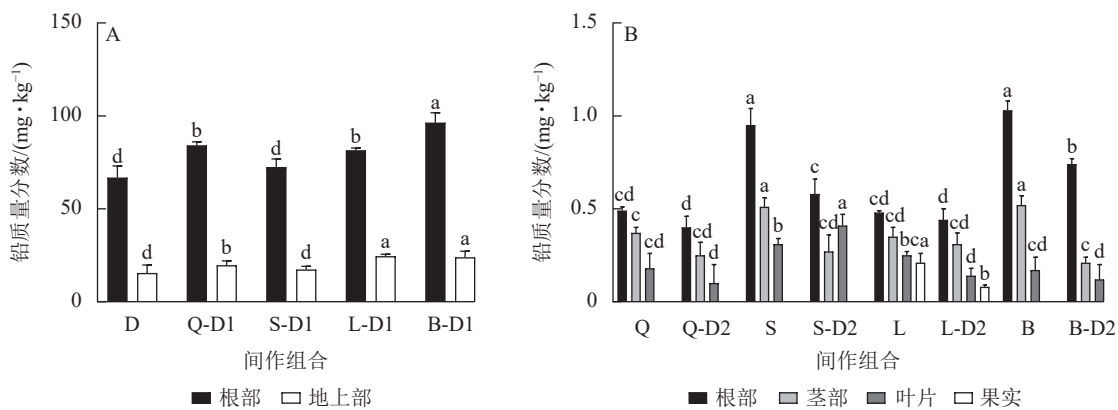
A. 东南景天; B. 可食植物。不同小写字母表示各处理间存在显著差异 ( $P < 0.05$ );  $n=3$ 。代号所表示处理见表 1

图 3 不同间作组合下植物叶片中过氧化氢酶活性

Figure 3 CAT contents in leaves under different combination modes

## 2.2 间作模式下植物不同器官吸收铅的质量分数

如图 4 所示: 东南景天地上部和根部铅质量分数均为间作显著高于单作 ( $P < 0.05$ ), 且多集中于根部。与樱桃萝卜间作后, 东南景天地上部铅质量分数比其他 3 种植物显著增加了 55.00%, 与青芹、辣椒间作后, 东南景天体内平均铅质量分数较单作分别增加了 26.00% 和 29.00%; 与上海青间作时, 东南景天铅质量分数均增加, 但较单作无显著性差异 (图 4A)。除上海青外, 青芹、辣椒、樱桃萝卜可食部位铅质量分数在间作模式下均有不同程度的降低, 分别与单作相比降低 24.37%、162.5%、39.82%。其中青芹、辣椒可食部位质量分数分别为 0.10 和 0.08  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 达到 GB 2762—2017《食品中污染物限量标准》规定的安全范围。樱桃萝卜可食部位的铅质量分数虽高于标准中的限量值, 未达到安全食用范围, 但在间作处理下樱桃萝卜中质量分数均低于单作处理, 且随着间作时间的延长, 间作东南景天有望实现樱桃萝卜的安全生产。间作使上海青体内铅质量分数整体下降, 其中根部下降 63.79%, 但可食部位叶片中铅质量分数较单作增加 31.18% (图 4B)。根据 GB 2762—2017《食品中污染物限量标准》, 间作模式下上海青叶片中铅质量分数仍高于标准限量值 0.3  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 不可食用。



A. 东南景天; B. 可食植物。不同小写字母表示各处理间存在显著差异 ( $P < 0.05$ );  $n=3$ 。代号所表示处理见表 1

图 4 不同间作组合下植物的铅质量分数

Figure 4 Pb contents in plants under different combination modes

## 2.3 间作模式下植株铅积累特征

由表 2 可知: 间作提高了东南景天吸收重金属的能力 ( $P < 0.05$ )。与青芹、辣椒、樱桃萝卜间作后东南景天地上部铅富集系数较单作分别上升了 3.73%、32.98%、33.37%; 与上海青间作后东南景天根部铅富集系数较单作下降 24.53%。东南景天与辣椒间作后铅转运系数显著上升了 29.87% ( $P < 0.05$ ), 与青芹、樱桃萝卜间作后转运系数较单作无显著差异。

由于铅在不同可食植物体内转运速度不同, 从而导致可食植物体内各部位铅分布出现差异。由表 3 可知: 间作模式减弱可食植物富集铅的能力。青芹各部位在间作模式下铅富集系数较单作均有不同程度

的下降，其中在可食部位(茎)中下降显著 ( $P < 0.05$ )，降幅达 31.79%。在间作模式下上海青根、茎部富集系数有所降低，与单作相比分别降低 53.36%、76.86%，但叶中铅富集系数却较单作显著提高了 40.10% ( $P < 0.05$ )。辣椒可食部位(果) 铅富集系数相比单作同样呈现显著下降 ( $P < 0.05$ )，降幅达 133.39%。间作东南景天能使樱桃萝卜可食部位铅富集系数呈显著下降 ( $P < 0.05$ )，降幅为 18.23%。青芹、辣椒在间作模式下转运系数较单作均有所下降，与单作相比分别下降了 33.01%、38.96%。而上海青、樱桃萝卜与东南景天间作后，铅转运系数较单作分别增加了 35.85%、6.74%。

表 2 不同组合下东南景天对铅的富集系数及转运系数

Table 2  $F_{BC}$  and  $F_T$  of Pb by *S. alfredii* in different treatments

| 植物   | 处理   | $F_{BC}$   |            | $F_{T根-茎叶}$ |
|------|------|------------|------------|-------------|
|      |      | 根          | 茎叶         |             |
| 东南景天 | D    | 0.426 76 b | 0.098 39 b | 0.231 b     |
|      | Q-D1 | 0.438 03 b | 0.102 06 b | 0.233 b     |
|      | S-D1 | 0.331 30 c | 0.079 01 c | 0.238 b     |
|      | L-D1 | 0.435 77 b | 0.130 85 a | 0.300 a     |
|      | B-D1 | 0.529 70 a | 0.131 23 a | 0.248 b     |

说明：表中数据为平均值 ( $n=3$ )。同列不同字母表示各处理间显著差异 ( $P < 0.05$ )。代号所表示处理见表 1

表 3 不同间作组合下可食植物对铅的富集系数及转运系数

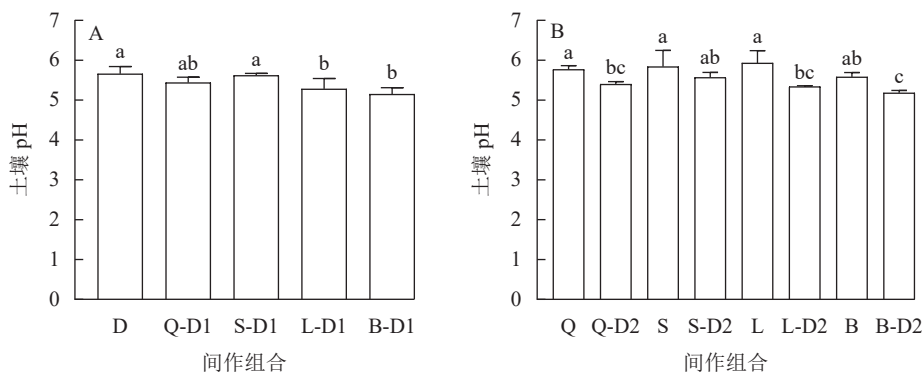
Table 3  $F_{BC}$  and  $F_T$  of Pb by edible plants in different treatments

| 植物   | 处理   | $F_{BC}$   |             |             |            | $F_{T根-茎叶}$ |
|------|------|------------|-------------|-------------|------------|-------------|
|      |      | 根          | 茎           | 叶           | 果          |             |
| 青芹   | Q    | 0.002 24 c | 0.001 69 bc | 0.000 80 cd | -          | 1.164 b     |
|      | Q-D2 | 0.002 07 c | 0.001 28 c  | 0.000 50 d  | -          | 0.875 c     |
| 上海青  | S    | 0.004 07 b | 0.002 19 a  | 0.001 33 b  | -          | 0.863 c     |
|      | S-D2 | 0.002 65 c | 0.001 24 c  | 0.001 86 a  | -          | 1.173 b     |
| 辣椒   | L    | 0.002 16 c | 0.001 57 bc | 0.001 11 bc | 0.000 96 a | 1.688 a     |
|      | L-D2 | 0.002 34 c | 0.001 66 bc | 0.000 75 cd | 0.000 41 b | 1.215 b     |
| 樱桃萝卜 | B    | 0.004 79 a | 0.002 02 ab | 0.000 71 cd | -          | 0.570 d     |
|      | B-D2 | 0.004 06 b | 0.001 65b c | 0.000 82 bc | -          | 0.608 d     |

说明：-表示无此项。数据为平均值( $n=3$ )。同列不同字母表示各处理间具有显著差异( $P < 0.05$ )。代号所表示处理见表 1

### 2.4 间作模式下植株根际土壤 pH 和铅形态分布特征

如图 5 所示：与东南景天单作相比，青芹、辣椒和樱桃萝卜 3 种间作模式显著降低东南景天根际土壤 pH ( $P < 0.05$ )。上海青-东南景天间作模式下东南景天根际土壤 pH 值降低，但没有达到显著水平(图 5A)。与可食植物单作相比，间作模式均不同程度的降低青芹、辣椒和樱桃萝卜根际土壤 pH，分别降低至 5.40、5.34 和 5.57，差异显著 ( $P < 0.05$ ) (图 5B)。



A. 东南景天；B. 可食植物。不同小写字母表示各处理间存在显著差异 ( $P < 0.05$ )； $n=3$ 。代号所表示处理见表 1

图 5 不同间作组合下植物根际土壤 pH

Figure 5 Rhizosphere soil pH of different combinations

如图 6 所示：在间作模式下，东南景天根际土壤弱酸提取态、可还原态铅质量分数占总铅比例均有不同程度的提升，而可氧化态和残渣态铅的形态占比降低。与单作相比，东南景天与樱桃萝卜在间作模

式下,其根际土壤弱酸提取态和可氧化态铅质量分数占总铅比例高于间作上海青和青芹;东南景天根际土壤残渣态铅的形态占比在4种间作模式之间无显著差别(图6A)。可食植物在间作模式下根际土壤可还原态铅的形态占比增大,弱酸提取态和可氧化态铅的形态占比均不同程度降低,残渣态铅则无显著变化。与单作相比,间作处理下樱桃萝卜根际土壤弱酸提取态铅质量分数降低了 $7.07\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,可氧化态铅质量分数降低了 $25.79\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ;在间作模式下,上海青相较于其他3种可食植物根际土壤可还原态铅质量分数增幅最大,达24.36%,青芹次之,增幅为12.82%(图6B)。

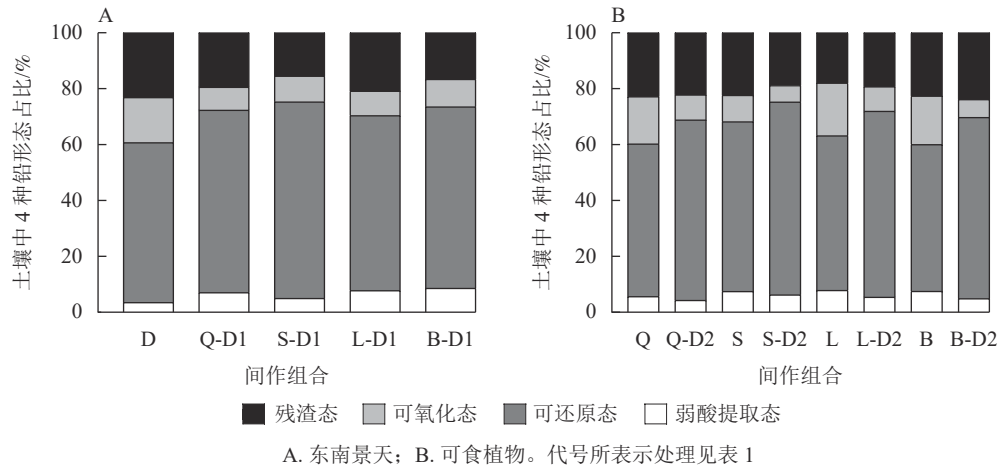


图6 不同间作组合下植物根际土壤中铅形态分布特征

Figure 6 Proportion of Pb forms in rhizosphere soils of plants of different assemblages

### 3 讨论

间作模式能改变植物生物量。本研究表明:与东南景天间作后,可食植物青芹、辣椒生物量较单作显著增加了65.51%、31.64%,但上海青、樱桃萝卜生物量有所降低。说明东南景天间作上海青、樱桃萝卜后,因盆栽空间的局限造成两者根系养分竞争激烈<sup>[17]</sup>,影响了上海青、樱桃萝卜的生长。青芹、辣椒生物量增加的原因可能是在间作模式下可以加快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<sup>[18]</sup>。与单作相比,东南景天生物量显著增加,其原因可能是可食植物为东南景天遮光,缓解了高温带来的不良影响,从而提高东南景天生物量<sup>[19]</sup>。

丙二醛是膜脂质氧化的产物,是反映植物膜系统受伤害的重要指标之一<sup>[20]</sup>。本研究结果表明:间作模式下东南景天和可食植物叶片中丙二醛浓度均有不同程度的下降,其中辣椒、樱桃萝卜间作叶片中丙二醛浓度比单作显著下降了47.62%、36.76%。说明间作能缓解铅对植物的毒性。这与王晓维等<sup>[21]</sup>研究在铜胁迫下玉米 *Zea mays* 与豌豆 *Pisum sativum* 间作使玉米丙二醛含量较单作下降的结果一致。过氧化氢酶是植物细胞在长期进化过程中形成的主要抗氧化酶<sup>[22]</sup>。它能清除和减少植物体内的自由基,有效降低重金属胁迫对植物细胞的损伤,其活性间接反映了植物对重金属污染物的抗性<sup>[23]</sup>。本研究表明:间作模式下东南景天过氧化氢酶下降,其原因是间作体系促进东南景天对铅的吸收,致使东南景天自我调节和保护功能下降。王吉秀等<sup>[24]</sup>研究发现:将玉米和小花南芥 *Arabis alpina* var. *parviflora* 间作种植,玉米叶片过氧化氢酶含量较单作显著增加。从本研究也可以看出:铅胁迫下可食植物青芹、上海青、辣椒、樱桃萝卜叶片内丙二醛活性均表现出间作高于单作。

间作模式中不同植物吸收重金属的能力存在显著差异。本研究发现:间作东南景天在铅积累能力增加的同时显著降低了铅在青芹、辣椒、樱桃萝卜可食部位的累积,与单作相比分别下降了24.37%、162.50%、39.82%;上海青叶片中铅富集系数较单作显著提高了40.10%,表明间作东南景天会提高上海青叶片对铅的积累量。这与蒋成爱等<sup>[25]</sup>研究超富集植物东南景天与玉米间作时,东南景天地上部铅含量比单作增加13.0%,同时显著增加玉米铅含量的结果一致。间作提高了上海青、樱桃萝卜的转运系数,其原因可能是上海青、樱桃萝卜属于转移能力较强的植物,通过根系吸收根际土壤中的铅,并将大部分铅转移和积累到植物的茎叶从而保护根部不受毒害,维持其正常的生命活动。间作模式中青芹、辣椒转

运系数降低,表明间作模式具有降低茎叶对铅的吸收能力。这与孟楠等<sup>[26]</sup>研究籽粒苋 *Amaranthus hypochondriacus* 与空心菜 *Ipomoea aquatica* 间作有效降低了空心菜对铅的吸收转运的结果一致。

植物对土壤重金属元素吸收积累的高低与植物根际环境及土壤中重金属形态存在密切联系<sup>[27]</sup>。间作主要是通过改变植物根系的分泌物、土壤 pH 等影响重金属的形态,间接地改变土壤中重金属的有效性,从而最终影响植物对重金属的吸收<sup>[28]</sup>。本研究发现:间作模式下东南景天和可食植物根际土壤 pH 显著降低。与单作相比,东南景天与青芹、辣椒和樱桃萝卜间作下其根际土壤 pH 显著降低,而上海青无显著差异。其原因可能是青芹、辣椒和樱桃萝卜在间作模式中与东南景天根系充分交叉,根系相互作用增强,引起东南景天根系分泌大量的有机酸,有机酸与铅离子形成螯合物,进而促进富集植物对铅的吸收和富集<sup>[29]</sup>;上海青在间作模式下仅有少部分根系交叉,根系相互作用较弱,未能引起东南景天根系大量分泌有机酸。不同间作组合模式下东南景天根际土壤弱酸提取态铅质量分数占总铅比例均呈增加趋势,进一步表明间作模式会引起植株根系分泌物有机酸增加,导致根际土壤 pH 降低,进而促进根际土壤弱酸提取态铅质量分数增加。有研究表明:弱酸提取态铅的生物有效性最高,易于迁移和转化,可被植物直接吸收<sup>[30]</sup>。与单作相比,青芹、辣椒和樱桃萝卜根际土壤 pH 以及弱酸提取态铅质量分数占总铅比例在间作模式下有不同程度的降低,这可能与东南景天和可食植物根系对弱酸提取态铅的竞争吸收有关,东南景天对铅的吸收和转运能力显著高于可食植物,导致青芹、辣椒和樱桃萝卜根际土壤中弱酸提取态铅大量向东南景天根际转移,被东南景天根系吸收,进而引起了植物根际土壤弱酸提取态铅质量分数降低。东南景天与上海青间作模式由于其根系互作较弱,根际土壤弱酸提取态铅质量分数无明显变化。另外,值得注意的是东南景天和可食植物在间作模式下根际土壤可还原态铅质量分数占总铅比例均有不同程度的提高,而可氧化态铅占比却都有一定降低,这可能是铅各形态之间存在着动态平衡<sup>[31]</sup>,土壤可还原态铅和可氧化态铅能进行直接或间接的相互转化,呈现此消彼长的趋势。

## 4 结论

间作模式显著增加了东南景天、青芹和辣椒的生物量,上海青生物量和樱桃萝卜根部生物量显著降低。东南景天和可食植物丙醛浓度均表现为间作低于单作;间作可食植物叶片中过氧化氢酶活性显著增加的同时,东南景天叶片内过氧化氢酶活性均有不同程度下降。间作模式显著降低青芹、辣椒、樱桃萝卜可食部位铅质量分数,而上海青叶片中铅质量分数显著提高。可食植物和东南景天根际土壤 pH 变化表现出一致规律,间作均低于单作。间作显著降低可食植物根系周围土壤弱酸提取态铅和可氧化态铅质量分数,增加可还原态铅质量分数,而间作体系对残渣态铅质量分数影响不显著。间作与单作比较,增加了东南景天根际土壤中弱酸提取态铅和可还原态铅质量分数,降低了残渣态铅质量分数,促进间作系统中东南景天对铅的积累作用。因此,青芹、辣椒和樱桃萝卜与东南景天间作能显著降低青芹和辣椒可食部位铅质量分数,减少可食植物铅安全风险,达到安全食用标准,也能降低樱桃萝卜可食部位铅质量分数,在间作修复中是较为理想的组合模式。

## 5 参考文献

- [1] 刘悦来,许俊丽,尹科变.高密度城市社区公共空间参与式营造——以社区花园为例[J]. *风景园林*, 2019, 26(6): 13-17.  
LIU Yuelai, XU Junli, YIN Keluan. Participatory construction of community public space in high-density cities: a case study of community gardens [J]. *Landscape Architecture*, 2019, 26(6): 13-17.
- [2] 钱静.西欧份地花园与美国社区花园的体系比较[J]. *现代城市研究*, 2011, 26(1): 86-92.  
QIAN Jing. The comparison of allotment garden in Europe and community garden in the United States [J]. *Modern Urban Research*, 2011, 26(1): 86-92.
- [3] 陈蓉蓉,金荷仙,颜越.近20年社区花园演进历程及热点趋势研究[J]. *风景园林*, 2021, 28(11): 114-119.  
CHEN Rongrong, JIN Hexian, YAN Yue. Evolution process, hotspots and trends of community gardens in recent 20 years [J]. *Landscape Architecture*, 2021, 28(11): 114-119.
- [4] BELON E, BOISSON M, DEPORTES I Z, et al. An inventory of trace elements inputs to French agricultural soils [J].



- Science of the Total Environment*, 2012, **439**: 87 – 95.
- [5] LAIDLAW M A S, ALANKARAGE D H, REICHMAN S M, *et al.* Assessment of soil metal concentrations in residential and community vegetable gardens in Melbourne, Australia [J]. *Chemosphere*, 2018, **199**: 303 – 311.
- [6] DAO Ligan, MORRISON L, ZHANG Hongxuan, *et al.* Influences of traffic on Pb, Cu and Zn concentrations in roadside soils of an urban park in Dublin, Ireland [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2013, **36**(3): 333 – 343.
- [7] ROUILLON M, HARVEY P J, KRISTENSEN L J, *et al.* VegeSafe: a community science program measuring soil-metal contamination, evaluating risk and providing advice for safe gardening [J]. *Environmental Pollution*, 2016, **222**: 557 – 566.
- [8] JEAN-SORO L, GUERN L C, BECHET B, *et al.* Origin of trace elements in an urban garden in Nantes, France [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2015, **15**(8): 1802 – 1812.
- [9] MITCHELL R G, SPLIETHOFF H M, RIBAUDO L N, *et al.* Lead (Pb) and other metals in New York City community garden soils; factors influencing contaminant distributions [J]. *Environmental Pollution*, 2014, **187**: 162 – 169.
- [10] 杨剑洲, 王振亮, 高健翁, 等. 海南省集约化种植园中谷物、蔬菜和水果中重金属累积程度及健康风险[J]. *环境科学*, 2021, **42**(10): 4916 – 4924.
- YANG Jianzhou, WANG Zhenliang, GAO Jianweng, *et al.* Accumulation and herisk of heavy metals in cereals, vegetables, and fruits of intensive plantations in Hainan Province [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(10): 4916 – 4924.
- [11] KIM H S, KIM Y J, SEO Y R. An overview of carcinogenic heavy metal: molecular toxicity mechanism and prevention [J]. *Journal of Cancer Prevention*, 2015, **20**(4): 232 – 240.
- [12] RAI P K, LEE S S, ZHANG M, *et al.* Heavy metals in food crops: Health risks, fate, mechanisms, and management [J]. *Environment international*, 2019, **125**: 365 – 385.
- [13] 曹瑞祺, 方松林, 曹盼宫. 重金属污染土壤园林植物修复研究进展[J]. *北方园艺*, 2019(16): 145 – 152.
- CAO Ruiqi, FANG Songlin, CAO Pangong. Research on garden plant restoration of heavy metal contaminated soil [J]. *Northern Horticulture*, 2019(16): 145 – 152.
- [14] 时健, 龙新宪, 徐祚荣, 等. 东南景天组培苗对镉、镉及其复合污染土壤的修复效能分析[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2022, **58**(1): 70 – 76.
- SHI Jian, LONG Xinxian, XU Zuorong, *et al.* Remediation by tissue culture seedlings of *Sedum alfredii* Hance in Zn-, Cd- and combination-contaminated soils [J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2022, **58**(1): 70 – 76.
- [15] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- LI Hesheng. *Experiment Principle and Technology of Plant Physiology and Biochemistry* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000.
- [16] RAURET G, LÓPEZ-SÁNCHEZ J F, SAHUQUILLO A, *et al.* Improvement of the BCR three step sequential extraction procedure prior to the certification of new sediment and soil reference materials [J]. *Journal of Environmental Monitoring*, 1999, **1**(1): 57 – 61.
- [17] 刘晨, 郭佳, 赵敏, 等. 毛竹幼苗与伴矿景天间作对铜镉锌转运积累的影响[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2017, **43**(5): 615 – 622.
- LIU Chen, GUO Jia, ZHAO Min, *et al.* Effects of moso bamboo and *Sedum plumbizincicola* intercropping on transport and accumulation of Cu, Cd and Zn in soil-plant system [J]. *Journal of Zhejiang University (Agriculture & Life Science)*, 2017, **43**(5): 615 – 622.
- [18] TAN Yan, HU Falong, CHAI Qiang, *et al.* Optimizing water use between intercropped pea and maize through strip row ratio expansion and N fertilizer reduction in arid areas [J/OL]. *Field Crops Research*, 2021, **260**: 108001 [2022-04-20]. doi: 10.1016/j.fcr.2020.108001.
- [19] 游梦, 邹茸, 王丽, 等. 不同富集植物与小麦间作对镉吸收转运的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2022(4): 201 – 208.
- YOU Meng, ZOU Rong, WANG Li, *et al.* Effects of intercropping different accumulators with wheat on Cd absorption and transport under Cd stress [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2022(4): 201 – 208.
- [20] 徐圆圆, 陆明英, 蒋维昕, 等. 铝胁迫下不同耐铝型桉树无性系根和叶抗氧化特征的差异[J]. *浙江农林大学学报*, 2016, **33**(6): 1009 – 1016.
- XU Yuanyuan, LU Mingying, JIANG Weixin, *et al.* Al stress with lipid peroxidation and antioxidant enzyme activities in eucalyptus roots and leaves [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2016, **33**(6): 1009 – 1016.

- [21] 王晓维, 黄国勤, 徐健程, 等. 铜胁迫和间作对玉米抗氧化酶活性及丙二醛含量的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2014, **33**(10): 1890 – 1896.  
WANG Xiaowei, HUANG Guoqin, XU Jiancheng, *et al.* Effects of copper stresses and intercropping on antioxidant enzyme activities and malondialdehyde contents in maize [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, **33**(10): 1890 – 1896.
- [22] 沈徐悦, 张浪, 陈蓉蓉, 等. 盐胁迫对望春玉兰幼苗形态和相关生理指标的影响[J]. *浙江农林大学学报*, 2021, **38**(2): 289 – 295.  
SHEN Xuyue, ZHANG Lang, CHEN Rongrong, *et al.* Effect of NaCl stress on the morphology and related physiological indexes of *Magnolia biondii* seedlings [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2021, **38**(2): 289 – 295.
- [23] 张家洋. 重金属铅镉短期胁迫对蓬莱蕉生理生化指标的影响[J]. *水土保持学报*, 2016, **30**(2): 340 – 345.  
ZHANG Jiayang. The effect of Pb and Cd on physiological and biochemical indexes of *Monstera deliciosa* Liebm. in the short-term conditions [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, **30**(2): 340 – 345.
- [24] 王吉秀, 李元, 祖艳群, 等. 铅胁迫下小花南芥和玉米间作体系对植物生理的影响[J]. *环境科学与技术*, 2017, **40**(7): 54 – 59.  
WANG Jixiu, LI Yuan, ZU Yanqun, *et al.* Effects of *Arabis alpina* L. var. *parviflora* Franch and *Zea mays* L. in an intercropping system on plant physiology to lead stress [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, **40**(7): 54 – 59.
- [25] 蒋成爱, 吴启堂, 吴顺辉, 等. 东南景天与不同植物混作对土壤重金属吸收的影响[J]. *中国环境科学*, 2009, **29**(9): 985 – 990.  
JIANG Chengai, WU Qitang, WU Shunhui, *et al.* Effect of co-cropping *Sedum alfredii* with different plants on metal uptake [J]. *China Environmental Science*, 2009, **29**(9): 985 – 990.
- [26] 孟楠, 王萌, 李杉杉, 等. 草本植物间作对空心菜 Pb 吸收、转运的影响[J]. *地学前缘*, 2019, **26**(6): 103 – 111.  
MENG Nan, WANG Meng, LI Shanshan, *et al.* Effects of intercropping ten herbaceous plants on lead uptake by and accumulation in water spinach [J]. *Earth Science Frontiers*, 2019, **26**(6): 103 – 111.
- [27] 邱孝煊, 方守玲, 陈孔长, 等. 不同植物与芥菜间作对芥菜-土壤镉含量的影响[J]. *福建农业科技*, 2022, **53**(3): 63 – 69.  
QIU Xiaoxuan, FANG Shouling, CHEN Kongchang, *et al.* Effects of *Brassica juncea* intercropped with different plants on the content of Cadmium in *Brassica juncea* and soil [J]. *Fujian Agricultural Science and Technology*, 2022, **53**(3): 63 – 69.
- [28] 赵中秋, 朱永官, 蔡运龙. 镉在土壤-植物系统中的迁移转化及其影响因素[J]. *生态环境*, 2005, **14**(2): 282 – 286.  
ZHAO Zhongqiu, ZHU Yongguan, CAI Yunlong. Transport and transformation of cadmium in soil-plant systems and the influence factors [J]. *Ecology and Environment*, 2005, **14**(2): 282 – 286.
- [29] 崔晓荧, 秦俊豪, 黎华寿. 不同水分管理模式对水稻生长及重金属迁移特性的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2017, **36**(11): 2177 – 2184.  
CUI Xiaoying, QIN Junhao, LI Huashou. Effect of different water management modes on rice (*Oryza sativa* L. ) growth and heavy metal transport characteristics [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, **36**(11): 2177 – 2184.
- [30] 郭彦海, 高国龙, 王庆, 等. 典型平原地区生活垃圾焚烧厂周边土壤重金属赋存形态分布特征及生物有效性评价[J]. *环境科学研究*, 2019, **32**(9): 1613 – 1620.  
GUO Yanhai, GAO Guolong, WANG Qing, *et al.* Heavy metal speciation distribution and bioavailability assessment in soils surrounding a municipal solid waste incineration plant in the typical plain area in China [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019, **32**(9): 1613 – 1620.
- [31] 胡自航, 赵霞, 董晓芸, 等. 污泥与园林废弃物混合堆肥施用量对林地土壤重金属质量分数及微生物活性的影响[J]. *浙江农林大学学报*, 2021, **38**(1): 31 – 37.  
HU Zihang, ZHAO Xia, DONG Xiaoyun, *et al.* Effect of sludge and garden waste composting rates on heavy metal content and microbial activity in plantation soil [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2021, **38**(1): 31 – 37.