

香樟与地被植物配植对其生长和富集Cd的影响^①

冯丽涵, 李萧萧, 李凌

西南大学园艺园林学院, 重庆 400716

摘要:以草本植物肾蕨、麦冬和头花蓼的幼苗为材料,分别与香樟幼苗组合配植并进行Cd胁迫(0.1, 0.3, 1, 5 mg/L)溶液培养(CK: 香樟单种),4周后测定香樟幼苗生物量、幼苗和培养液Cd质量浓度,研究地被植物对香樟生长和富集Cd的影响。结果表明,香樟—肾蕨(CN)、香樟—麦冬(CO)组合可显著增加香樟生物量。当Cd的质量浓度为5.0 mg/L时,香樟全株生物量比CK分别提高46.77%和42.47%;CN组合能显著提高香樟Cd富集量。当Cd的质量浓度为0.1 mg/L时,其地上部分和全株富集量分别为 $(1.639 \pm 0.133) \mu\text{g}/\text{株}$ 和 $(7.351 \pm 0.575) \mu\text{g}/\text{株}$,比CK分别提高137.88%和77.86%;CN、香樟—头花蓼(CP)组合可显著提高香樟对Cd的转运能力。当Cd的质量浓度为5.0 mg/L时,其转移系数分别为0.161和0.138,比CK分别提高76.92%和106.41%;CO组合能显著提高培养液Cd去除率。当Cd质量浓度为0.1 mg/L时,Cd去除率达68.67%,比CK提高50.01%。结果显示,香樟与地被植物肾蕨、麦冬和头花蓼配植可显著促进其生长和对Cd的吸收转运。其中,香樟与肾蕨配植积极影响最全面,与麦冬配植Cd去除率最高。

关键词:香樟;肾蕨;麦冬;头花蓼;配植;镉

中图分类号: Q949.747.5; S792.23

文献标志码: A

文章编号: 1000-5471(2020)03-0095-06

随着我国城市化和工业化进程的加剧,土壤重金属污染日益严重^[1]。镉污染在无机污染物中超标率最高^[2],易被作物吸收并通过食物链在人体内富集,对人体健康产生极大威胁^[3]。目前,土壤镉的植物修复研究广受重视,但研究对象多为种类少、生长期短的超富集植物^[4],推广应用受到限制。木本园林植物生物量大、寿命长,对重金属表现出提取量大、固定时间长、固定效果稳定等特点^[5-6],因而在土壤镉修复中极具应用价值。

香樟(*Cinnamomum camphora*)、肾蕨(*Nephrolepis auriculata*)和麦冬(*Ophiopogon japonicus*)均为西南地区常见的园林绿化植物,头花蓼(*Polygonum capitatum*)是西南地区常见的乡土植物。鲁艳等^[7-10]发现木本植物香樟以及地被植物肾蕨、麦冬和头花蓼等均具有一定的镉(Cd)耐受、富集和转运能力。草本地被着生地表,根系分布于土壤浅层,与根系分布较深的木本植物配植,有可能促进木本植物生长和整体增强对土壤重金属的富集作用,而这方面的研究目前还鲜有报道。本试验将香樟与肾蕨等3种草本植物组合,采用溶液培养法研究不同组合对香樟生长和富集Cd的影响。

1 材料与方法

1.1 试验材料

香樟、肾蕨、麦冬和头花蓼采集自西南大学校内,用半量的改良Hoagland营养液培养。

1.2 试验方法

1.2.1 试验材料

香樟种子于2017年12月采集,催芽;2018年3月初播种;5月初挖取高10 cm左右的幼苗进行试验。

^① 收稿日期:2018-11-04

作者简介:冯丽涵(1994—),女,硕士研究生,主要从事园林植物栽培与生理研究。

通信作者:李凌,教授,硕士研究生导师。

肾蕨、麦冬和头花蓼原株采于 2018 年 3 月初和 4 月，均在温室内分株、扦插繁育。

1.2.2 Cd 胁迫水平

在营养液中添加 $\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$ (分析纯)对幼苗进行 Cd 胁迫处理，设 4 个质量浓度梯度：0.1 mg/L (0.1 Cd)，0.3 mg/L(0.3 Cd)，1.0 mg/L(1.0 Cd)和 5.0 mg/L(5.0 Cd)。

1.2.3 木—草组合及试验处理

设 3 种木—草植物组合：香樟—肾蕨(CN)、香樟—麦冬(CO)、香樟—头花蓼(CP)，对照(CK)为香樟。每组合处理 4 株(木、草各 2 株，对照木共 4 株)，重复 5 次。

水培容器为方口塑料瓶，长 9 cm、宽 7.5 cm、高 10 cm，容量为 600 mL，用报纸和黑色不透光地膜包装瓶身，保障水培容器瓶身不透光。胁迫处理前幼苗先在去离子水中培养 3 d，然后在营养液中预培养 3 周，待长出白色新根后开始进行 Cd 胁迫处理。胁迫期间，不换培养液，每天 2 次人工翻根换气 40 min，每天用去离子水补充液面，保持液面高度 5.8 cm，体积 350 mL，并对幼苗同时进行光照培养。光源为红蓝光 LED 灯，光照强度为 5000 lx(12 h/d)，昼夜温度为 25/18℃，胁迫处理 4 周后进行生物量和 Cd 质量浓度测定。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 香樟生物量(干质量)

将香樟幼苗地上部分与根部分离，根部在 20 mmol/L EDTA- Na_2 中螯合 20 min，去除表面 Cd^{2+} ，用去离子水冲洗 3 遍。将各部分于烘箱 105℃杀青 30 min，然后 80℃烘至恒质量，用万分之一电子天平测质量。

1.3.2 香樟 Cd 质量比的测定

将干燥香樟幼苗用植物微样粉碎机粉碎，过 1 mm 尼龙筛，经 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ 混合消化后定容^[11]，用日立 Z-5000 原子吸收分光光度计测地上部和根的 Cd 质量比。

1.3.3 水溶液 Cd 质量浓度的测定

用日立 Z-5000 原子吸收分光光度计测定试验起始和结束时水溶液的 Cd 质量浓度。

1.4 数据处理与分析

试验数据利用 Microsoft Excel 2016 统计平均数，用 SPSS 25.0 软件对不同处理间的差异进行 Duncan’s 多重比较，用 Origin 2018 作图。

转移系数(translocation factor, TF)的计算公式为^[12]：

$$k_{\text{TF}} = \frac{\text{植物地上部重金属质量比}}{\text{植物根中对应重金属质量比}}$$

Cd 富集量(M , $\mu\text{g}/\text{株}$)的计算式为：

$$M = C \times m$$

式中： C 为香樟对应部位的 Cd 质量比($\mu\text{g}/\text{g}$)； m 为香樟对应部位的生物量(g)。

重金属 Cd 去除率(修复率)的计算公式为：

$$\text{Cd 去除率} = \frac{(\text{种植前水溶液 Cd 质量比} - \text{收获后水溶液 Cd 质量比})}{\text{种植前水溶液 Cd 质量比}} \times 100\%$$

2 结果与分析

2.1 地被植物对香樟幼苗生物量的影响

香樟幼苗不同部位的生物量因组合模式和 Cd 质量浓度不同而存在较大差异(表 1)。CN 和 CO 组合在所有质量浓度下香樟地上、根部和全株的生物量均显著大于 CK($p < 0.05$)。当 Cd 质量浓度为 5.0 mg/L 时，CN 和 CO 组合全株生物量分别为 0.273 g/株和 0.265 g/株，比 CK 提高了 46.77%和 42.47%($p < 0.05$)。结果表明，香樟与肾蕨或麦冬配植显著促进了香樟生物量的积累。

2.2 地被植物对香樟幼苗 Cd 质量比的影响

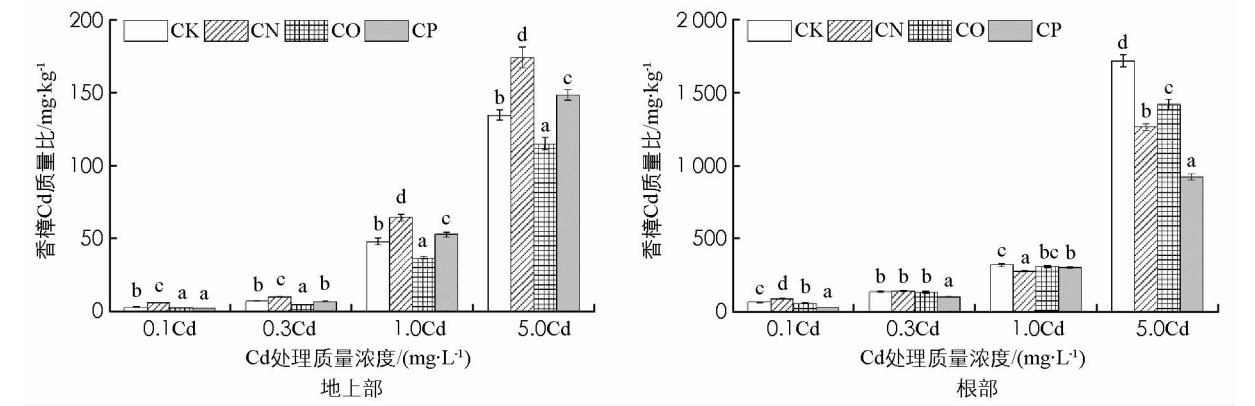
不同组合模式下香樟不同部位的 Cd 质量比有差异，同一组合模式香樟各部位 Cd 质量比随 Cd 质量浓

度的升高而升高, Cd 质量浓度为 5.0 mg/L 时达到最大值(图 1). CN 组合香樟地上部 Cd 质量比在各质量浓度下均显著高于 CK($p<0.05$), 表明与肾蕨组合培养可提高香樟地上部 Cd 质量比. CO 组合恰好相反($p<0.05$), 提示与麦冬配植将减少香樟地上部 Cd 积累. 当 Cd 质量浓度为 5.0 mg/L 时, CK 根部 Cd 质量比高于所有组合, 分别比 CN 组合、CO 组合和 CP 组合提高了 35.83%, 21.09%, 和 86.07% ($p<0.05$), 提示高质量浓度 Cd 环境下, 草本植物根部也大量吸收 Cd, 降低了溶液中的 Cd 质量比, 对香樟起了一定的协同保护作用.

表 1 不同组合香樟幼苗的生物量

Cd 质量浓度 /(mg·L ⁻¹)	组合模式	地上部/(g·株 ⁻¹)	根部/(g·株 ⁻¹)	全株/(g·株 ⁻¹)
0.1	CK	0.233±0.013Aa	0.055±0.004ABa	0.288±0.017Aa
	CN	0.274±0.018ABb	0.067±0.006Bb	0.341±0.024Ab
	CO	0.307±0.013Bc	0.082±0.006Cc	0.389±0.008Bc
	CP	0.245±0.020Aab	0.048±0.006Aa	0.293±0.024Aa
0.3	CK	0.212±0.011ABa	0.042±0.002ABa	0.254±0.010Aa
	CN	0.259±0.007Cb	0.056±0.005Bb	0.315±0.006Bc
	CO	0.238±0.017BCb	0.053±0.007Bb	0.291±0.017Bb
	CP	0.198±0.007Aa	0.039±0.006Aa	0.236±0.005Aa
1.0	CK	0.229±0.026Aa	0.044±0.004Aa	0.273±0.025Aa
	CN	0.305±0.022Bb	0.062±0.005BCc	0.367±0.026Bb
	CO	0.316±0.027Bb	0.063±0.005Cc	0.379±0.030Bb
	CP	0.193±0.011Aa	0.051±0.002ABb	0.244±0.012Aa
5.0	CK	0.151±0.008Aa	0.035±0.002Aa	0.186±0.010Aa
	CN	0.222±0.002Bb	0.051±0.002Bc	0.273±0.001Bb
	CO	0.224±0.035Bb	0.041±0.003Ab	0.265±0.036Bb
	CP	0.159±0.027Aa	0.034±0.005Aa	0.193±0.027Aa

注: 表中数值为平均值±标准差; A,B,C 表示数值在 $p<0.01$ 水平上差异极具有统计学意义, a,b,c 表示数值在 $p<0.05$ 水平上差异具有统计学意义; 每 5 组平行试验的香樟生物量经独立样本 t 检验, $p>0.05$.



a,b,c 表示数值在 $p<0.05$ 水平上差异具有统计学意义; 每 5 组平行试验经独立样本 t 检验, $p>0.05$.

图 1 不同组合香樟幼苗地上部和根部的 Cd 质量比

2.3 地被植物对香樟幼苗 Cd 富集量的影响

由表 2 可知, CN 组合在所有质量浓度下香樟地上部和全株 Cd 富集量均极显著大于 CK($p<0.01$). 当 Cd 质量浓度为 0.1 mg/L 时, 地上部和全株的 Cd 富集量分别比 CK 提高了 137.88% 和 77.86% ($p<0.01$). 其余质量浓度地上部和全株的 Cd 质量比也显著高于其他组合, 说明 CN 组合能有效促进香樟对 Cd 的吸收和转运, 而其他组合的促进作用不明显.

2.4 地被植物对香樟幼苗 Cd 转移系数的影响

各 Cd 质量浓度下, 所有组合香樟的 Cd 转移系数均小于 1, 说明香樟不属于 Cd 超富集植物(图 2), 但

CN 组合和 CP 组合各质量浓度下香樟 Cd 转移系数均显著大于 CK($p<0.05$). Cd 质量浓度 1.0 mg/L 时, CN 组合香樟 Cd 转移系数最大, 达 0.234; Cd 质量浓度为 5.0 mg/L 时, CN 和 CP 组合香樟 Cd 转移系数分别为 0.161 和 0.138, 比 CK 分别提高 76.92% 和 106.41%($p<0.05$), 提示香樟与肾蕨和头花蓼配植能够促进 Cd 向香樟地上部转移.

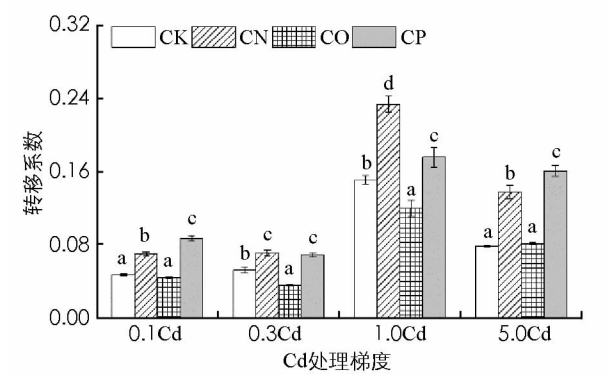
表 2 不同组合香樟幼苗的 Cd 富集量

Cd 质量浓度 /mg · L ⁻¹	组合模式	地上部/(μg · 株 ⁻¹)	根部/(μg · 株 ⁻¹)	全株/(μg · 株 ⁻¹)
0.1	CK	0.689±0.048Aab	3.444±0.343Bb	4.133±0.391Bb
	CN	1.639±0.133Bc	5.712±0.443Dd	7.351±0.575Cc
	CO	0.750±0.034Ab	4.551±0.533Cc	5.301±0.499Bb
	CP	0.575±0.051Aa	1.283±0.128Aa	1.858±0.171Aa
0.3	CK	1.481±0.073Bb	5.697±0.438ABb	7.178±0.390Bb
	CN	2.559±0.110Cc	7.798±0.963Cbc	10.357±0.919Cc
	CO	1.132±0.078Aa	6.978±0.751Cc	8.110±0.725Bb
	CP	1.341±0.032ABb	3.813±0.499Aa	5.154±0.468Aa
1.0	CK	10.939±1.542Aa	13.898±1.273Aa	24.837±2.358Aa
	CN	19.646±2.091Bb	16.944±1.391ABbc	36.590±3.472Cc
	CO	11.593±0.598Aa	19.329±1.790Cc	30.922±2.383ABb
	CP	10.108±0.697Aa	15.327±0.806Bab	25.435±1.503Aa
5.0	CK	20.305±0.784Aa	60.226±2.464Bbc	80.530±3.232Bb
	CN	38.622±1.346Cc	64.874±1.767Bc	103.596±2.805Cc
	CO	25.697±2.032Bb	58.087±2.510Bb	83.784±4.563Bb
	CP	23.557±1.422ABb	31.343±3.824Aa	54.901±5.157Aa

注: 表中数值为平均值±标准差; A,B,C 表示数值在 $p<0.01$ 水平上差异极具有统计学意义, a,b,c 表示数值在 $p<0.05$ 水平上差异具有统计学意义; 每 5 组平行试验的香樟生物量经独立样本 t 检验, $p>0.05$.

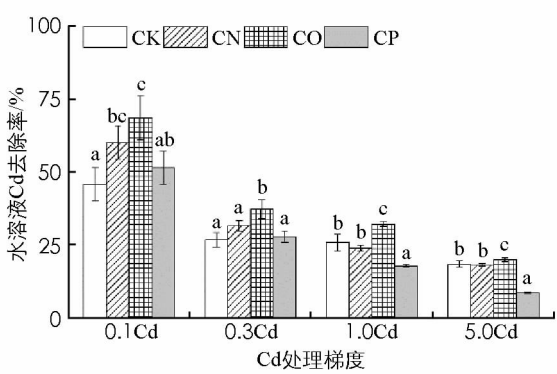
2.5 不同木一草组合对培养溶液 Cd 去除率的影响

不同 Cd 质量浓度下, 不同木一草组合对培养液的 Cd 去除率不同. 胁迫浓度越高, Cd 去除率越低(图 3). 但在所有胁迫质量浓度下, CO 组合的 Cd 去除率均显著高于其他组合. 当 Cd 质量浓度为 0.1 mg/L 时, Cd 去除率达 68.67%, 比 CK 提高 50.01%. 研究表明, CO 组合能够比其余组合更有效地去除环境中的 Cd.



a,b,c 表示数值在 $p<0.05$ 水平上差异具有统计学意义;
每 5 组平行试验经独立样本 t 检验, $p>0.05$.

图 2 不同组合香樟幼苗的转移系数



a,b,c 表示数值在 $p<0.05$ 水平上差异具有统计学意义;
每 5 组平行试验经独立样本 t 检验, $p>0.05$.

图 3 不同组合培养液的 Cd 去除率

3 结果与讨论

试验结果表明, 香樟与肾蕨、麦冬和头花蓼配植对其生长和富集 Cd 有促进作用. 其中, 香樟与肾蕨配

植积极影响最全面, 与麦冬配植 Cd 去除率最高。

3 种草本地被植物对香樟生物量有不同程度的影响, 麦冬和肾蕨促进生长的作用较明显, 可能是根系分泌物对香樟的生长产生了积极影响; 也可能是麦冬和肾蕨也同样大量吸收了环境中的 Cd, 缓解了 Cd 对香樟的抑制和毒害, 有利于香樟的生长。

研究表明, 草本植物(肾蕨)与香樟配植促进了香樟对 Cd 的吸收和转运, 此类现象在其他作物中也曾被发现。蒋成爱等^[13]研究发现, 东南景天与玉米和大豆的混作显著提高了其地上部分对 Zn 的吸收, 显著降低了玉米和黑麦草对 Cd 和 Zn 的吸收; 赵颖等^[14]指出, 不同间作作物对玉米吸收重金属的效果不同。原因可能是因为植物根系的分泌物能影响重金属的活性或存在状态, 从而影响植物对重金属的吸收^[15]。由于植物种类不同, 根系分泌物的种类和含量存在差异^[16], 所以不同植物组合栽培时, 根系环境会随之改变^[17], 可能进而改变了香樟对重金属的吸收和转运。有研究认为, Cd 在液泡中的区室化是阻止 Cd 长距离运输的有效途径^[18], 有可能肾蕨和头花蓼减弱了香樟根部对 Cd 的区室化作用, 促进 Cd 向地上部运输。本试验表明, 肾蕨和头花蓼能显著促进 Cd 向香樟地上部的转运, 可以有效提高香樟对 Cd 的提取效率, 此研究结果具有很大的应用价值。

本试验结果还表明, 麦冬与香樟配植提高了水溶液 Cd 的去除率, 且此组合 Cd 去除率均高于其余组合。麦冬对香樟吸收 Cd 的促进作用不明显, 可能是麦冬本身的 Cd 吸收富集能力很强, 吸收了水溶液中大量的 Cd, 使得 CO 组合的 Cd 去除率最高。实际应用中可利用麦冬 Cd 吸收量大的优势, 采用定期收获再播种的方式, 加快修复进程。

参考文献:

[1] 周建军, 周 桔, 冯仁国. 我国土壤重金属污染现状及治理战略 [J]. 中国科学院院刊, 2014, 29(3): 315-320, 350, 272.

[2] 环境保护部, 国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报 [J]. 国土资源通讯, 2014(8): 26-29.

[3] 房 辉, 曹 敏. 云南会泽废弃铅锌矿重金属污染评价 [J]. 生态学杂志, 2009, 28(7): 1277-1283.

[4] 徐剑锋, 王 雷, 熊 瑛, 等. 土壤重金属污染强化植物修复技术研究进展 [J]. 环境工程技术学报, 2017, 7(3): 366-373.

[5] 陈岩松, 吴若菁, 庄 捷, 等. 木本植物重金属毒害及抗性机理 [J]. 福建林业科技, 2007, 34(1): 50-55.

[6] 张思悦, 张 晴, 李 凌. 黄葛树对土壤铅、镉污染耐受性的研究 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2019, 44(1): 79-83.

[7] 鲁 艳, 谌 月, 李 凌. 香樟、君迁子实生苗对土壤 Cd²⁺ 污染的修复潜力研究 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2017, 42(11): 44-51.

[8] 潘志明. 砷汞铅镉复合污染土壤的肾蕨植物修复技术研究 [D]. 成都: 成都理工大学, 2006: 51-55.

[9] 蒋翠文. 麦 冬、鱼腥草、蛇莓中镉的积累分布情况及影响的研究 [D]. 南宁: 广西大学, 2015: 16-28.

[10] 杨 艳, 吴宗萍, 张 敏, 等. 头花蓼对重金属 Cd 的吸收特性与累积规律初探 [J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(11): 2094-2099.

[11] 杨剑虹, 王成林, 代亨林. 土壤农化分析与环境监测[M]. 北京: 中国大地出版社, 2008: 281-301.

[12] 马文超, 刘 媛, 孙晓灿, 等. 镉在土壤-香根草系统中的迁移及转化特征 [J]. 生态学报, 2016, 36(11): 3411-3418.

[13] 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.

[14] 赵 颖, 刘利军, 党晋华, 等. 不同植物与玉米间作对玉米吸收多环芳烃和重金属的影响 [J]. 环境工程, 2014, 32(7): 138-141.

[15] 余 游, 肖 伟, 谢阳东. 黑麦草野地瓜套种对重金属镉吸收的研究 [J]. 农学学报, 2017, 7(8): 39-42.

[16] HINSINGER P, PLASSARD C, JAILLARD B. Rhizosphere: a New Frontier for Soil Biogeochemistry [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2006, 88(1-3): 210-213.

[17] 林 海, 张海丽, 董颖博, 等. 重金属复合污染下草本植物两两组合水培的富集特性 [J]. 环境科学研究, 2016, 29(8): 1154-1162.

[18] HART J J, WELCH R M, NORVELL W A, et al. Characterization of Cadmium Binding, Uptake, and Translocation in

Intact Seedlings of Bread and Durum Wheat Cultivars [J]. Plant Physiology, 1998, 116(4): 1413-1420.

Cinnamomum Camphora and Ground Cover Planting to Promote its Growth and Enrichment of Cd

FENG Li-han, LI Xiao-xiao, LI Ling

School of Horticulture and Landscape Architecture, Southwest University, Chongqing 400716, China

Abstract: The seedlings of ground cover plants *Nephrolepis auriculata*, *Ophiopogon japonicus* and *Polygonum capitatum* were used as materials, and were planted with *Cinnamomum camphora* seedlings respectively in solution Cd stress (0.1, 0.3, 1, 5 mg/L) (CK: *Cinnamomum camphora* monoculture) for 4 weeks. The biomass and the Cd content of *Cinnamomum camphora* seedlings and Cd content of solution were determined, and the effects on growth and Cd enrichment of *Cinnamomum camphora* with three ground cover plants were studied. The results show that the combination of *Cinnamomum camphora*-*Nephrolepis auriculata* and *Cinnamomum camphora*-*Ophiopogon japonicus* significantly increased the biomass of *Cinnamomum camphora*. When Cd was 5 mg/L, the total biomass of *Cinnamomum camphora* increased by 46.77% and 42.47% compared with CK, respectively. The combination of *Cinnamomum camphora*-*Nephrolepis auriculata* could significantly increase the Cd enrichment of *Cinnamomum camphora*. When Cd was 0.1 mg/L, the aboveground and whole plant enrichment of *Cinnamomum camphora* were 1.639 μg/plant and 7.351 μg/plant, which was increased by 137.88% and 77.86% compared with CK, respectively. The combination of *Cinnamomum camphora*-*Nephrolepis auriculata* and *Cinnamomum camphora*-*P. capitatum* significantly increased the transport capacity of *Cinnamomum camphora* to Cd. When Cd was 5 mg/L, the transfer coefficients were 0.161 and 0.138, respectively, which were 76.92% and 106.41% higher than CK. The *Cinnamomum camphora*-*Ophiopogon japonicus* combination could significantly increase the Cd removal rate of the culture solution. When Cd was 0.1 mg/L, the removal rate of Cd of *Cinnamomum camphora* was 68.67%, which was 50.01% higher than that of CK. It was proved that the combination of *Cinnamomum camphora* and three ground cover plants played a positive role in *Cinnamomum camphora*'s growth and absorption and transport of Cd, among them, the combination of *Nephrolepis auriculata* and *Cinnamomum camphora* had the most comprehensive positive effects on *Cinnamomum camphora*, the combination of *Ophiopogon japonicus* and *Cinnamomum camphora* had the highest removal rate of Cd.

Key words: *Cinnamomum camphora*; *Nephrolepis auriculata*; *Ophiopogon japonicas*; *Polygonum capitatum*; plant arrangement; Cd

责任编辑 潘春燕