

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2019.02.003

水淹条件下秋华柳对 Cd 污染 土壤化学性质的影响^①

陈红纯¹, 曾成城², 李瑞¹, 王婷¹,
周翠¹, 吴科君¹, 马文超³, 魏虹¹

1. 三峡库区生态环境教育部重点实验室/重庆市三峡库区植物生态与资源重点实验室/
西南大学 生命科学学院, 重庆 400715;
2. 广西农业科学院 农业资源与环境研究所, 南宁 530007; 3. 攀枝花市旅游局, 四川 攀枝花 617000

摘要: 为探究秋华柳(*Salix variegata* Franch.)在消落带水淹环境中对 Cd 污染土壤化学性质的影响, 设置无镉处理组(Cd0)和镉浓度为 2 mg/kg 的镉处理组(Cd2), 水分设置为正常供水组及土壤表面以上 5 cm 水淹组, 所有处理组包括秋华柳种植组和无植物组。结果表明: 1) 秋华柳种植及水分处理均显著降低了土壤的 pH 值, 使土壤酸碱度趋向于中性。2) 所有处理及其交互作用未对土壤有机质质量分数表现出显著影响。3) 秋华柳种植、水分处理及其交互作用极显著影响了土壤全氮质量分数; 植物处理以及植物与 Cd 的交互作用显著影响土壤全磷质量分数; 土壤全钾质量分数受到 Cd 处理、植物与水分以及水分与 Cd 处理之间交互作用的影响显著。水淹条件下种植秋华柳后, 其土壤全氮质量分数为正常供水条件下裸地的 79%; 在 Cd 污染环境中, 种植秋华柳使土壤全磷质量分数降低了 15%, 水分与植物的联合处理使全钾质量分数降低 21%。4) 与裸地正常供水组相比, 水淹条件下秋华柳种植显著提高了土壤碱解氮质量分数; 土壤速效磷质量分数仅受到 Cd 处理的影响, 植物和水分处理未对土壤速效磷质量分数形成显著性影响; 在无 Cd 环境中, 与正常供水土壤相比, 水淹显著降低了土壤速效磷的质量分数。研究表明, 水淹条件下, 秋华柳的种植显著降低土壤 pH 值, 将对土壤中 Cd 离子形态产生明显影响, 有利于植物对 Cd 的吸收。土壤营养元素的潜在供应能力有所降低, 供应容量与供应强度随元素种类的变化以及外界环境的影响而表现出一定的差异性。因此, 建议在秋华柳修复消落带 Cd 污染土壤的过程中, 严格监控土壤中营养元素的质量分数, 在必要的时候可在每年退水期适当施肥以促进秋华柳的生长, 从而保证更好的植物修复效果。

关键词: 秋华柳; Cd 污染; 水淹; 土壤化学性质; 三峡库区消落带

中图分类号: S154.2; X53; X57

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2019)02-0023-10

三峡工程蓄水运行之后, 库区水位每年在 145~175 m 之间变化, 形成新的消落带^[1]。消落带特殊的水文变化使库区许多植物不适应新生境而难以生存, 原有植被逐渐消亡, 引起了严重的环境问题^[2], 对植被

① 收稿日期: 2018-04-26

基金项目: 国家国际科技合作专项(2015DFA90900); 三峡后续工作库区生态与生物多样性保护专项(5000002013BB5200002); 国家“十三五”重点研发计划项目(2017YFC0505305-003); 中央财政林业科技推广示范资金项目(20170183)。

作者简介: 陈红纯(1994-), 女, 硕士研究生, 主要从事应用生态学的研究。

通信作者: 魏虹, 教授。

的恢复和重建是消落带生态系统恢复和保护的重点, 植被重建对提高消落带生态系统适应能力也具有重要意义^[3]. 此外, 对三峡库区段的多目标地球化学调查结果显示, 镉(Cd, cadmium)是三峡库区表层土壤中污染最严重的重金属元素^[4], 无 Cd 污染区面积仅 52.12%, 存在区域性轻度污染(0.2~0.6 mg/kg)及点状中度(0.6~1 mg/kg)以上污染, 高 Cd 异常地区自然土壤中 Cd 质量分数达到 8.5 mg/kg^[5-6]. Cd 是一种毒性很强的非必需元素^[7], 由于其较高的风险评估值和潜在的不良生物学效应^[8], 三峡库区 Cd 污染状况逐渐引起研究者的重视^[9-10]. 植物修复技术是通过利用适应性好、抗逆性强的植物吸收、分解、转化或固定土壤中的重金属, 以此降低污染物的浓度, 提高土壤的安全性. 具有适用性广、经济美观的优点^[11-13]. 在对三峡库区消落带进行植被重建的同时, 联合重金属植物修复将达到事半功倍的效果. 前期研究结果发现, 秋华柳(*Salix variegata*)作为杨柳科(Salicaceae)柳属(*Salix* L.)的耐水淹植物在水淹条件下仍对重金属 Cd 具有较好的富集能力, 在消落带植被重建及 Cd 污染土壤的治理中具有较大的应用潜力^[14-15].

在三峡库区消落带水体—土壤—植被长期的相互作用过程中, 土壤物理和化学性质将不断发生变化, 尤其是土壤的 pH 值、有机质和营养元素的变化将直接影响着秋华柳的生长发育状况, 并进而影响到对 Cd 污染土壤的修复效率^[16-17]. 土壤 pH 值会强烈地影响着土壤中的金属尤其是土壤溶液中金属的溶解和形态的形成, 在决定金属形态、矿物表面溶解度、迁移和重金属生物利用度中起着重要作用^[18-19]. 土壤有机质是土壤与植物养分循环的中心, 同时, 在以可交换态形式固定重金属等方面起着主要作用^[20]. 氮、磷和钾是植物生长必需的营养元素, 土壤对植物养分的供应直接影响着植物的生长, 继而影响植物对 Cd 污染土壤的修复效率^[21-23]. 在植物修复工程中, 尤其在水淹环境下, 为了提高秋华柳对土壤 Cd 的清除效果, 防止枯枝落叶的腐烂对水体和土壤造成二次污染, 有学者建议在每年水淹前对其地上部分进行收割^[15]. 但在通过收获秋华柳地上部分去除土壤中 Cd 的同时, 土壤中经植物吸收的养分也会被带走. 同时, 水淹也将对土壤中氮、磷、钾元素的赋存造成影响, 因此, 在水淹环境中, 利用秋华柳修复 Cd 污染土壤时必须关注土壤营养元素变化的问题.

目前, 有关秋华柳在水淹条件下修复 Cd 污染土壤的研究主要集中于秋华柳富集 Cd 能力、吸收转运、富集机理及其应用潜力方面^[14-15, 24], 但水淹条件下, 秋华柳的种植会使土壤 pH 值、有机质和营养元素质量分数发生怎样的变化, 是否会对秋华柳的生长及修复效率产生负面影响尚不清楚. 本研究通过模拟水淹及 Cd 污染环境, 探究种植秋华柳后土壤化学性质的变化及其影响, 以期对消落带 Cd 污染土壤修复效率的提高提供理论参考依据.

1 材料与方法

1.1 实验材料

本实验选择秋华柳扦插苗作为研究对象, 2016 年 10 月从重庆市嘉陵江同兴街河岸(29°41'2" N, 106°26'56" E)采集当年生且未萌发的秋华柳枝条(约 15 cm)在育苗袋中进行预培养. 培养 6 个月 after 选取生长基本一致的幼苗进行移栽(实验土壤为紫色壤土, 每盆 2 kg, 盆中央内径 18 cm, 高 15 cm, 土壤基本理化性质见表 1). 实验材料培养在西南大学生态实验园中进行.

表 1 供试土壤基本化学性质

pH 值	有机质/ (g · kg ⁻¹)	全氮/ (g · kg ⁻¹)	全磷/ (g · kg ⁻¹)	全钾/ (g · kg ⁻¹)	碱解氮/ (mg · kg ⁻¹)	有效磷/ (mg · kg ⁻¹)	速效钾/ (mg · kg ⁻¹)	总镉/ (mg · kg ⁻¹)
7.83	15.23	0.99	0.78	12.21	81.27	11.83	186.27	0.53

1.2 实验设计

土壤 Cd 浓度和水淹深度根据三峡库区土壤 Cd 污染状况和秋华柳在三峡库区所处海拔水淹情况进行设置^[25-26]. 污染土壤外源添加 Cd 浓度为 2 mg/kg, 以 CdCl₂ · 2.5H₂O 溶液形式加入^[26], 无污染土壤外

源添加 Cd 浓度为 0 mg/kg(以下称为 Cd0); 水分处理组保持土壤表面以上 5 cm 积水(将花盆放入水桶进行水淹处理), 正常供水组保持田间持水量的 60%~63%^[27]. 所有处理组包括秋华柳种植组和无植物组, 各处理设 5 个重复. 处理 2 个月后对各处理组土壤进行取样, 实验设计见表 2.

表 2 实验设计

Cd 浓度处理	植物与水分处理			
	裸地正常供水组	裸地水淹组	有植物正常供水组	有植物水淹组
	CK	FL	PCK	PFL
Cd0(0 mg · kg ⁻¹)	CK1	FL1	PCK1	PFL1
Cd2(2 mg · kg ⁻¹)	CK2	FL2	PCK2	PFL2

1.3 测试指标及方法

实验处理进行 2 个月后, 去除土壤中植物根系和其他杂物, 将土壤进行充分混匀, 风干后研磨过筛. 采用电位计法, 使用 pH 计(Mettler Toledo FE28)测定土壤的 pH 值; 采用重铬酸钾容量法(外加热法)测量土壤有机质质量分数; 土壤全氮质量分数测定采用全自动凯氏定氮仪(Distillation Unit B-324 瑞士)测定; 碱解-扩散法测定土壤碱解氮质量分数; 土壤磷质量分数采用钼锑抗比色法; 土壤钾质量分数采用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES 美国)测定^[28].

1.4 数据分析

利用重复度量方差分析(Repeated measures ANOVA)揭示不同水分、秋华柳种植以及 Cd 处理对土壤 pH 值和养分质量分数的影响, 运用 Tukey HSD 检验法检验各个指标在相应处理下的差异显著性($\alpha=0.05$). 本研究采用 SPSS 22.0 软件进行数据分析, 用 Origin8.5 软件制图, Microsoft world 软件制表.

2 研究结果

2.1 土壤 pH 与有机质的变化

表 3 为秋华柳种植、水分及 Cd 处理对土壤 pH 和有机质质量分数影响的方差分析结果. 由表 3 可知, 植物处理、水分处理及其交互作用极显著影响了土壤的 pH 值($p<0.01$). 在植物处理、水分处理及二者共同的作用下土壤 pH 值显著降低, 使土壤酸碱度趋向于中性(图 1). 所有处理及其交互作用对土壤有机质质量分数的影响均未表现出显著性($p>0.05$).

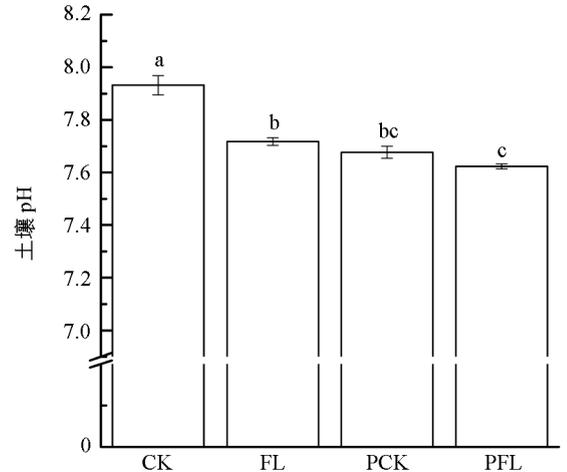
表 3 植物、水分以及 Cd 处理对土壤 pH 及有机质的影响

指标	植物处理	水分处理	Cd 浓度	植物 * 水分	植物 * Cd	水分 * Cd	植物 * 水分 * Cd
pH	**	**	ns	**	ns	ns	ns
有机质	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

注: * 表示 $p<0.05$, ** 表示 $p<0.01$, 差异有统计学意义; ns 表示 $p>0.05$, 差异无统计学意义.

2.2 土壤营养元素全量的变化

表 4 为实验各处理对土壤全氮、全磷和全钾的方差分析结果. 由表 4 可知, 秋华柳种植、水分处理及其交互作用极显著影响了土壤全氮质量分数($p<0.01$). 与对照相比, 单一水淹或植物处理并未对土壤全氮



CK 为裸地正常供水组; FL 为裸地水淹组; PCK 为有植物正常供水组; PFL 为有植物水淹组; 不同小写字母表示各处理之间差异有统计学意义($\alpha=0.05$).

图 1 不同处理土壤中 pH 值

质量分数形成显著影响。水淹条件下种植秋华柳(PFL)后,其土壤全氮质量分数则显著降低,分别是裸地正常供水组(CK)、裸地水淹组(FL)和有植物正常供水组(PCK)的 79%,83%和 80%(图 2a)。

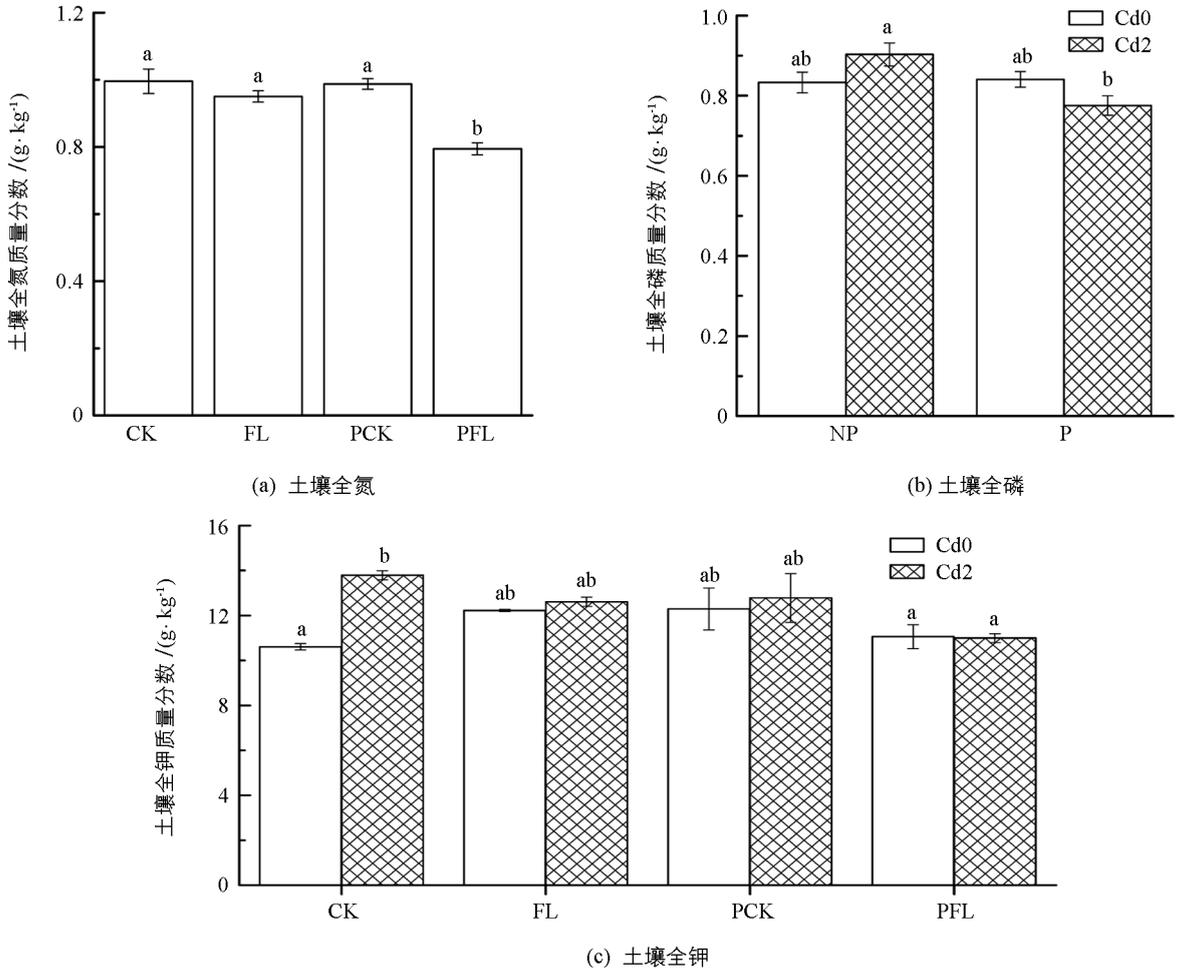
植物处理以及植物与 Cd 的交互作用显著影响土壤全磷质量分数($p < 0.05$),水分和 Cd 处理对土壤全磷质量分数影响差异无统计学意义($p > 0.05$)(表 4)。在 2 mg/kg 的 Cd 污染环境中,秋华柳的种植显著降低了 15%的土壤全磷质量分数(图 2b)。

土壤全钾质量分数受到 Cd 处理、植物与水分以及植物与 Cd 处理之间交互作用的影响有统计学意义($p < 0.05$)(表 4)。在 Cd 污染环境下,水分与植物的联合处理显著降低了土壤全钾质量分数,为裸地正常供水组(CK)的 79%(图 2c)。

表 4 植物、水分以及 Cd 处理对土壤全氮、全磷及全钾的影响

指标	植物处理	水分处理	Cd 浓度	植物 * 水分	植物 * Cd	水分 * Cd	植物 * 水分 * Cd
全氮	**	**	ns	**	ns	ns	ns
全磷	*	ns	ns	ns	*	ns	ns
全钾	ns	ns	*	*	ns	*	ns

注: * 表示 $p < 0.05$, ** 表示 $p < 0.01$, 差异有统计学意义; ns 表示 $p > 0.05$, 差异无统计学意义。



CK 为裸地正常供水组, FL 为裸地水淹组, PCK 为有植物正常供水组, PFL 为有植物水淹组; NP 为无植物处理组, P 为植物处理组; 小写字母不同表示各处理之间差异有统计学意义($\alpha = 0.05$)。

图 2 不同处理土壤中营养元素全量的质量分数

2.3 土壤速效营养元素的变化

3 因素方差分析结果显示,土壤碱解氮质量分数受到秋华柳种植的影响显著($p < 0.05$),受到水分处理

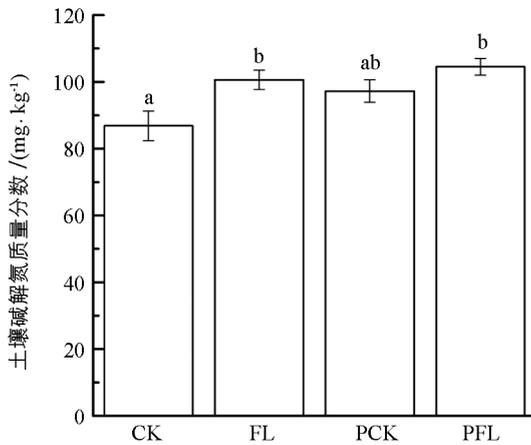
的影响极显著($p < 0.01$) (表 5)。水淹处理以及水淹条件下进行秋华柳栽种土壤碱解氮质量分数较对照组显著提高了 16% 和 20% (图 3a)。

土壤速效磷质量分数仅受到 Cd 处理的影响($p < 0.05$)，植物和水分处理对土壤速效磷质量分数影响无统计学意义($p > 0.05$) (表 5)。Cd 处理组较无 Cd 处理组土壤速效磷质量分数显著提高了 12% (图 3b)。

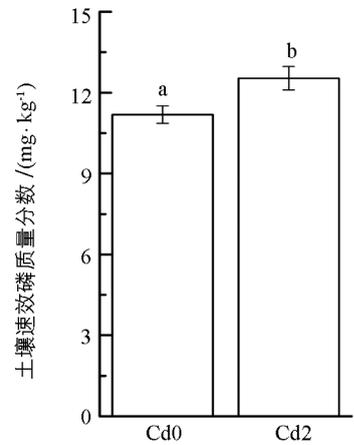
水分处理、水分与 Cd 处理的交互作用以及水分、植物和 Cd 处理三者的交互作用显著影响土壤速效钾的质量分数($p < 0.05$) (表 5)。在无 Cd 环境中，与正常供水土壤相比，水淹使土壤速效磷质量分数显著降低 9%，但在 Cd 污染环境中，水淹与正常供水组土壤速效磷质量分数差异无统计学意义 (图 3c)。

表 5 植物、水分以及 Cd 处理对土壤碱解氮、有效磷及速效钾的影响

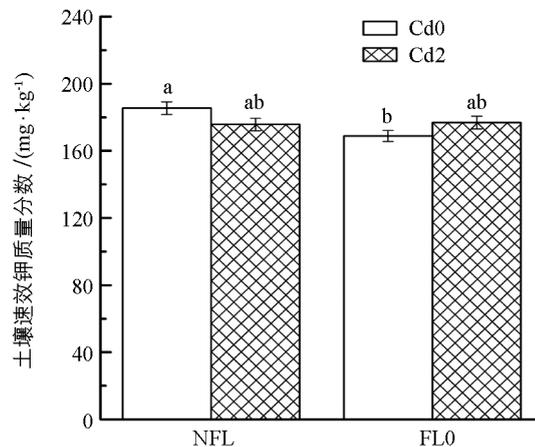
指标	植物处理	水分处理	Cd 处理	植物 * 水分	植物 * Cd	水分 * Cd	植物 * 水分 * Cd
碱解氮	*	**	ns	ns	ns	ns	ns
速效磷	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns
速效钾	ns	*	ns	ns	ns	*	*



(a) 土壤碱解氮



(b) 土壤速效磷



(c) 土壤速效钾

CK 为裸地正常供水组, FL 为裸地水淹组, PCK 为有植物正常供水组, PFL 为有植物水淹组; Cd0 为 0 mg/kg Cd (无镉处理组), Cd2 为 2 mg/kg Cd (镉处理浓度为 2 mg/kg); NFL 为无水淹处理组, FL0 为水淹处理组; 小写字母不同表示各处理之间差异有统计学意义($\alpha = 0.05$)。

图 3 不同处理土壤中有有效态营养元素的质量分数

3 讨 论

本研究中,对土壤进行 Cd 处理、水分处理以及秋华柳的栽种打破了土壤中各组分原有的平衡,建立了土壤—植被新的物质与能量循环. 研究结果显示,水淹、秋华柳种植以及 Cd 处理通过影响土壤湿度、氧化还原电位、通气条件、微生物及土壤酶数量和活性等而影响土壤养分及土壤化学过程^[29].

土壤酸碱度是土壤的基本性质之一,它与土壤微生物的活动、有机质的合成和分解、各类营养元素的转化与释放及有效性、土壤保持养分的能力等密切相关^[30-32];此外,在 Cd 污染土壤中,土壤 pH 还对重金属元素的赋存形态具有重要意义^[33]. 在前人的研究中发现,经过水淹,酸性土壤 pH 值升高,碱性土壤 pH 值降低,最终都趋于中性,与本研究中土壤酸碱度变化情况相吻合^[34, 35]. 水淹与正常供水条件下,秋华柳的种植均显著降低了土壤 pH 值,极有可能是由于秋华柳对土壤胶体界面阴阳离子的吸收不平衡所致^[36],秋华柳在生长过程中会从土壤中吸收大量的矿物质阳离子,如 Fe^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} 等^[37],从而导致了土壤胶体界面阳离子吸收量大于阴离子吸收量,有较多的 H^+ 从根表面进入土壤溶液,使得土壤 pH 值降低^[36];同时,秋华柳根系分泌的有机酸等酸性物质也会进一步降低土壤 pH 值^[38, 39]. 土壤 pH 值在金属离子的吸附解吸中具有重要意义,将直接影响植物对重金属的吸收^[40, 41]. 许多研究已经证明,土壤 pH 值在一定范围内与重金属迁移率和植物对重金属的吸收有效性之间存在负相关关系,例如,随着土壤 pH 值的降低,土壤中 Cd, Pb, Zn 在土壤溶液中的解吸和溶解显著增加^[42]. 因此,水淹条件下,土壤体系 pH 值降低,土壤中的粘土矿物、水合氧化物和有机质表面的负电荷减少,对 Cd^{2+} 的吸附力下降^[43],将有利于秋华柳对 Cd 的吸收富集^[14].

土壤有机质是土壤中营养元素的重要来源,其为水体及土壤中的生物活动提供了能源和物质,在维持生物多样性方面起着至关重要的作用^[44]. 前人的研究表明,植物的种植和淹水处理将增加土壤中有机质的积累,因为凋落叶的归还及土壤处于淹水状态下时,由于氧化还原电位低而形成大量还原性物质,都有利于有机质的积累^[45-46]. 在本研究中,所有处理均未对土壤有机质质量分数产生显著影响,可能与处理时间较短有关,有待进一步观察研究.

氮、磷、钾是植物生长发育所必需的大量营养元素,在土壤中以速效养分的形式被植物吸收,土壤速效养分可以反映出土壤近期速效营养对植物生长的供应状况^[28],土壤全量养分则反映出土壤营养成分的潜在供给能力,同时受到植物体养分循环过程的影响^[47]. 本研究中,水淹条件下种植秋华柳后,土壤全氮质量分数显著降低,为裸地正常供水组(CK)的 79%. 与之相反,土壤碱解氮质量分数则有显著增加,较对照组提高了 20%. 表明水淹条件下种植秋华柳后促进了氮素向速效营养的转化,土壤氮素的供应容量得到提高,但土壤中氮素的潜在供给能力有所下降. 磷素和钾素也表现出相似的变化,在 Cd 污染土壤中,种植秋华柳使土壤全磷质量分数降低了 15%,水淹与植物的联合处理使全钾质量分数降低了 21%. 而速效磷和速效钾的变化存在较大差异,在 Cd 污染环境中,土壤速效磷质量分数显著增加;Cd 污染土壤中速效钾质量分数在水淹条件下没有显著变化,而清洁土壤水淹后其速效钾质量分数显著降低. 本研究结果表明,在水淹条件下秋华柳的栽种降低了土壤营养元素的潜在供给能力. 在植物修复工程中,随着秋华柳地上部分的收割剥离系统,土壤中的营养元素无法得到有效归还,有可能对秋华柳的持续生长造成负面影响,进而影响到对土壤中 Cd 元素的吸收和积累. 土壤速效养分质量分数表现出不同的变化特征,表明土壤营养元素供应容量与供应强度随元素种类的变化以及外界环境的影响而表现出一定的差异性^[48]. 土壤中速效养分的变化可能与土壤微生物数量及种类增加有关,同时,也可能与植物根系和微生物释放有机酸等物质影响了土壤 Eh 值和 pH 值,从而改变了速效养分的转化有关^[49-50].

在植物修复过程中, 工程植物具有充足的营养供应是重金属污染土壤植物修复效率的保证, 应结合工程植物对各元素的需求以及土壤中营养元素的供应潜力对工程植物进行土肥管理. 陈同斌等^[51]的研究发现在对砷污染土壤的修复过程中, 蜈蚣草对营养元素的吸收表现出差异, 使土壤中全氮质量分数显著下降, 而磷和钾变化则不显著. 王林等^[52]在通过施加氮肥和钾肥提高龙葵对 Cd 污染土壤修复效率的研究中发现, 氮肥的施加可有效提高龙葵地上部分干质量, 而钾肥的施加则对龙葵地上部分的生长有抑制作用. 因此, 在秋华柳修复消落带 Cd 污染土壤的过程中, 严格监控土壤中营养元素的质量分数具有重要意义.

4 结 论

综上所述, 水淹条件下, 秋华柳的种植显著降低土壤的 pH 值, 有利于提高土壤中 Cd 离子的生物有效性, 有利于植物对 Cd 的吸收和清除. 在水淹条件下种植秋华柳后土壤全氮、全磷、全钾质量分数降低, 土壤营养元素的潜在供应能力有所降低. 土壤速效养分质量分数对植物、水淹和 Cd 处理随种类变化表现出不同响应, 表明土壤营养元素供应容量与供应强度随元素种类的变化以及外界环境的影响而表现出一定的差异性. 建议在秋华柳修复消落带 Cd 污染土壤的过程中, 严格监控土壤中营养元素的质量分数, 在必要的时候可在每年退水期适当施肥以促进秋华柳的生长, 从而保证对 Cd 污染土壤的植物修复效果.

参考文献:

- [1] 苏维词. 三峡库区消落带的生态环境问题及其调控 [J]. 长江科学院院报, 2004, 21(2): 32—34, 41.
- [2] SINGH S, EAPEN S, D'SOUZA S F. Cadmium Accumulation and Its Influence on Lipid Peroxidation and Antioxidative System in an Aquatic Plant, *Bacopa monnieri* L [J]. Chemosphere, 2006, 62(2): 233—246.
- [3] 鲍玉海, 贺秀斌, 钟荣华, 等. 三峡水库消落带植被重建途径及其固土护岸效应 [J]. 水土保持研究, 2014, 21(6): 171—174, 180.
- [4] 刘意章, 肖唐付, 宁增平, 等. 三峡库区巫山建坪地区土壤镉等重金属分布特征及来源研究 [J]. 环境科学, 2013, 34(6): 2390—2398.
- [5] 唐 将, 王世杰, 付绍红, 等. 三峡库区土壤环境质量评价 [J]. 土壤学报, 2008, 45(4): 601—607.
- [6] 王业春, 雷 波, 杨三明, 等. 三峡库区消落带不同水位高程土壤重金属含量及污染评价 [J]. 环境科学, 2012, 33(2): 612—617.
- [7] HE Y, RUI H Y, CHEN C, et al. The Role of Roots in the Accumulation and Removal of Cadmium by the Aquatic Plant *Hydrilla verticillata* [J]. Environmental Science & Pollution Research, 2016, 23(13): 13308—13316.
- [8] SINGH A, KUMAR C S, AGARWAL A. Effect of Lead and Cadmium on Aquatic Plant *Hydrilla verticillata* [J]. Journal of Environmental Biology, 2013, 34(6): 1027—1031.
- [9] PIOTROWSKA A, BAJGUZ A, GODLEWSKA-ZYŹKIEWICZ B, et al. Changes in Growth, Biochemical Components, and Antioxidant Activity in Aquatic Plant *Wolffia arrhiza* (Lemnaceae) Exposed to Cadmium and Lead [J]. Archives of Environmental Contamination & Toxicology, 2010, 58(3): 594—604.
- [10] WANG T J, JIN P, LIU X. Characterization of Heavy Metal Contamination in the Soil and Sediment of the Three Gorges Reservoir, China [J]. Environmental Letters, 2017, 52(3): 201—209.
- [11] ISLAM M S, SAITO T, KURASAKI M. Phytoremediation of Arsenic and Cadmium by Using an Aquatic Plant, *Micranthemum umbrosum*: Phytotoxicity, Uptake Kinetics, and mechanism [J]. Ecotoxicology & Environmental Safety, 2015, 112: 193—200.
- [12] KOVÁČIK J, BABULA P, HEDBAVNY J. Comparison of Vascular and Non-Vascular Aquatic Plant as Indicators of

- Cadmium Toxicity [J]. *Chemosphere*, 2017, 180: 86–92.
- [13] MARQUES A P G C, RANGEL A O S S, CASTRO P M L. Remediation of Heavy Metal Contaminated Soils: Phytoremediation as a Potentially Promising Clean-up Technology [J]. *Critical Reviews in Environmental Science & Technology*, 2009, 39(8): 622–654.
- [14] 曾成城, 陈锦平, 马文超, 等. 水淹生境下秋华柳对镉污染土壤研究修复能力 [J]. *生态学报*, 2016, 36(13): 3978–3986.
- [15] 陈锦平, 曾成城, 马文超, 等. 水淹和非水淹条件下秋华柳扦插苗镉积累特征比较 [J]. *林业科学*, 2017, 53(4): 166–174.
- [16] 程瑞梅, 王晓荣, 肖文发, 等. 三峡库区消落带水淹初期土壤物理性质及金属含量初探 [J]. *水土保持学报*, 2009, 23(5): 156–161.
- [17] 杨予静, 李昌晓, 马 朋. 三峡水库城区消落带人工草本植被土壤养分含量研究 [J]. *草业学报*, 2015, 24(4): 1–11.
- [18] MUEHLBACHOVA G, SIMON T, PECHOVA M. The Availability of Cd, Pb and Zn and Their Relationships with Soil pH and Microbial Biomass in Soils Amended by Natural Clinoptilolite [J]. *Plant Soil & Environment*, 2005, 51(1): 26–33.
- [19] ZHAO K L, LIU X M, XU J M, et al. Heavy Metal Contaminations in a Soil-Rice System: Identification of Spatial Dependence in Relation to Soil Properties of Paddy Fields [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 181(1–3): 778–787.
- [20] BAKEN S, DEGRYSE F, VERHEYEN L, et al. Metal Complexation Properties of Freshwater Dissolved Organic Matter Are Explained by Its Aromaticity and by Anthropogenic Ligands [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(7): 2584–2590.
- [21] 吴 巍, 赵 军. 植物对氮素吸收利用的研究进展 [J]. *中国农学通报*, 2010, 26(13): 75–78.
- [22] 曹翠玲, 李生秀, 苗芳. 氮素对植物某些生理生化过程影响的研究进展 [J]. *西北农业大学学报*, 1999, 27(4): 96–101.
- [23] 郑炳松, 程晓建, 蒋德安, 等. 钾元素对植物光合速率、Rubisco 和 RCA 的影响 [J]. *浙江农林大学学报*, 2002, 19(1): 104–108.
- [24] 曾成城, 陈锦平, 魏 虹, 等. 水淹生境下秋华柳对 Cd 污染土壤微生物数量及酶活性的影响 [J]. *生态学报*, 2017, 37(13): 4327–4334.
- [25] ANDRESEN E, KAPPEL S, STÄRK H, et al. Cadmium Toxicity Investigated at the Physiological and Biophysical Levels Under Environmentally Relevant Conditions Using the Aquatic Model Plant *Ceratophyllum Demersum* [J]. *New Phytologist*, 2016, 210(4): 1244–1258.
- [26] 罗 毅, 敖 亮, 罗财红, 等. 三峡库区消落带土壤环境风险研究 [J]. *环境科学与管理*, 2014, 39(5): 180–183.
- [27] 李昌晓, 钟章成, 刘 芸. 模拟三峡库区消落带土壤水分变化对落羽杉幼苗光合特性的影响 [J]. *生态学报*, 2005, 25(8): 1953–1959.
- [28] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 10–25.
- [29] 任庆水, 马 朋, 李昌晓, 等. 三峡库区消落带落羽杉(*Taxodium distichum*)与柳树(*Salix matsudana*)人工植被对土壤营养元素含量的影响 [J]. *生态学报*, 2016, 36(20): 6431–6444.
- [30] STOUT L M, DODOVA E N, TYSON J F, et al. Phytoprotective Influence of Bacteria on Growth and Cadmium Accumulation in the Aquatic Plant *Lemna minor* [J]. *Water Research*, 2010, 44(17): 4970–4979.
- [31] 孙儒泳. 基础生态学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2002: 90–121.
- [32] 李俊莉, 宋华明. 土壤理化性质对重金属行为的影响分析 [J]. *环境科学动态*, 2003(1): 24–26.
- [33] 苏 静, 王智慧, 李仕伟, 等. pH 对酸性紫色土中硝化作用与硝化微生物的影响 [J]. *西南大学学报(自然科学版)*,

- 2017, 39(3): 142-148.
- [34] 张金洋, 王定勇, 石孝洪. 三峡水库消落区淹水后土壤性质变化的模拟研究 [J]. 水土保持学报, 2004, 18(6): 120-123.
- [35] 唐罗忠, 生原喜久雄, 户田浩人, 等. 湿地林土壤的 Fe^{2+} , Eh 及 pH 值的变化 [J]. 生态学报, 2005, 25(1): 103-107.
- [36] 王宝山. 植物生理学 [M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2007: 87-91.
- [37] 刘 媛, 马文超, 张 雯, 等. 镉胁迫对秋华柳根系活力及其 Ca、Mg、Mn、Zn、Fe 积累的影响 [J]. 应用生态学报, 2016, 27(4): 1109-1115.
- [38] TARAFDAR J C, CLAASSEN N. Organic Phosphorus Compounds as a Phosphorus Source for Higher Plants Through the Activity of Phosphatases Produced by Plant Roots and Microorganisms [J]. Biology & Fertility of Soils, 1988, 5(4): 308-312.
- [39] 赵 宽, 周葆华, 马万征, 等. 不同环境胁迫对根系分泌有机酸的影响研究进展 [J]. 土壤, 2016, 48(2): 235-240.
- [40] WANG A S, ANGLE J S, CHANEY R L, et al. Soil pH Effects on Uptake of Cd and Zn by *Thlaspi caerulescens* [J]. Plant & Soil, 2006, 281(1): 325-337.
- [41] BADAWEY S H, HELAL M I, CHAUDRI A M, et al. Soil Solid-Phase Controls Lead Activity in Soil Solution [J]. Journal of Environmental Quality, 2002, 31(1): 162-167.
- [42] SUKREEYAPONGSE O, HOLM P E, STROBEL B W, et al. pH-Dependent Release of Cadmium, Copper, and Lead from Natural and Sludge-Amended Soils [J]. Journal of Environmental Quality, 2002, 31(6): 1901-1909.
- [43] 杜彩艳, 祖艳群, 李 元. pH 和有机质对土壤中镉和锌生物有效性影响研究 [J]. 云南农业大学学报, 2005, 20(4): 539-543.
- [44] BILEN S, ÇELİK A, ALTÍKAT S. Effects of Strip and Full-Width Tillage on Soil Carbon IV Oxide-Carbon ($\text{CO}_2\text{-C}$) Fluxes and on Bacterial and Fungal Populations in Sunflower [J]. African Journal of Biotechnology, 2010, 9(38): 6312-6319.
- [45] SAHRAWAT K L. Organic Matter Accumulation in Submerged Soils [J]. Advances in Agronomy, 2003, 81(3): 169-201.
- [46] 毛文韬, 李堂中, 辜夕容, 等. 三峡库区消落带不同高程柳树林地养分特征 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2016, 38(3): 119-125.
- [47] 赵 平, 孙谷畴, 彭少麟. 植物氮素营养的生理生态学研究 [J]. 生态科学, 1998(2): 37-42.
- [48] FÖRSTNER U, WITTMANN G T W. Metal Pollution in the Aquatic Environment [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1979: 45-48.
- [49] KRALOVA M, MASSCHELEYN P H, JR W H P. Redox Potential as an Indicator of Electron Availability for Microbial Activity and Nitrogen Transformations in Aerobic Soil [J]. Zentralblatt Fuer Mikrobiologie, 1992, 147(6): 388-399.
- [50] KEMMITT S J, WRIGHT D, GOULDING K W T, et al. pH Regulation of Carbon and Nitrogen Dynamics in Two Agricultural Soils [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2006, 38(5): 898-911.
- [51] 陈同斌, 李海翔, 雷 梅, 等. 植物修复过程中蜈蚣草对土壤养分的吸收动态: 5 年田间定位试验 [J]. 环境科学学报, 2010(2): 402-408.
- [52] 王 林, 周启星, 孙约兵. 氮肥和钾肥强化龙葵修复镉污染土壤 [J]. 中国环境科学, 2008, 28(10): 915-920.

Effect of *Salix variegata* on the Chemical Properties of Cd-Contaminated Soils Under Flooding

CHEN Hong-chun¹, ZENG Cheng-cheng², LI Rui¹,
WANG Ting¹, ZHOU Cui¹, WU Ke-jun¹,
MA Wen-chao³, WEI Hong¹

1. Key Laboratory of Eco-Environments in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education / Chongqing Key Laboratory of Plant Ecology and Resources Research in Three Gorges Reservoir Region / School of Life Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China;
2. Agricultural Resources and Environment Research Institute, Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning 530007, China;
3. Panzhihua Tourism Bureau, Panzhihua, Sichuan 617000, China

Abstract: To explore the effects of *Salix variegata* on the pH, organic matter and nutrient contents of Cd-contaminated soils under flooding, multifactor experimental treatments were applied under two planting levels, and two moisture and two Cd concentration treatments. The two moisture treatments were control (well-watered condition) and flooding (flooding 5 cm above soil surface). Two levels of Cd addition were implemented: control (Cd0, 0 mg/kg) and Cd (Cd2, 2 mg/kg). Each treatment involved a planting group and a non-planting group of *S. variegata*. Soil pH significantly decreased under the condition of *S. variegata* planting and flooding, which tended to be neutral. All the three treatment factors and their interaction showed no significant influence on the organic matter content in the soil. *S. variegata* planting, flooding and their interaction significantly affected soil total N content. *S. variegata* planting, Cd and their interaction significantly influenced soil total P content. *S. variegata* planting, Cd and flooding and the interaction between planting and Cd significantly affected soil total K content. Soil TN content under the planting and flooding condition was 79% of the treatment of non-planting with well-watered condition. Under the condition of Cd contamination, *S. variegata* planting reduced the TP content of the soil by 15%, and the combination of *S. variegata* planting and flooding reduced TK content of the soil by 21%. Compared with the treatment of no *S. variegata* planting with well-watered condition, *S. variegata* planting significantly increased the content of soil alkali hydrolysable under flooding. Soil available P content was influenced by Cd stress and not significantly affected by *S. variegata* planting and flooding. Compared with the well-watered condition, flooding significantly reduced soil AP content in a Cd-free environment. The results indicated that the pH value of soil was significantly decreased under the conditions of *S. variegata* planting and flooding, which would have a significant effect on the Cd bioactivity in the soil, which was beneficial to plant Cd uptake. The potential supply capacity of soil nutrient elements was decreased, and the supply capacity and supply intensity showed some differences with the change of element types and the influence of external environment. Therefore, it is suggested that the contents of nutrient elements in the soil should be strictly monitored in the process of the phytoremediation for Cd-contaminated soil, and fertilizers should be applied properly in the de-submergence period to promote the growth of *S. variegata*, thus ensuring a better effect for phytoremediation of the Cd-contaminated soil.

Key words: *Salix variegata*; cadmium stress; flooding; chemical property of the soil; hydro-fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir