

DOI: 10.20176/j.cnki.nxdz.20251211

化学淋洗法修复盐渍化Pb污染土壤

马进兰^{1,2}, 张玲^{1,2}, 陈星宇^{1,2}, 王莹^{1,2*}

(1. 宁夏大学 生态环境学院, 宁夏 银川 750021;

2. 宁夏大学 西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室, 宁夏 银川 750021)

摘要:以宁夏典型农灌区镇河村农田土壤为研究对象,采用批量实验,结合土柱实验方法,研究淋洗剂种类、浓度、用量及淋洗时间对模拟Pb污染土壤中Pb去除率的影响;采用土柱模拟实验方法,研究淋洗法修复不同Pb质量比和不同程度盐渍化Pb污染土壤。结果表明,乙二胺四乙酸二钠(EDTA-2Na)溶液对盐渍化土壤中Pb的去除率最高,且在1g土壤中EDTA-2Na溶液的用量为10mL、 $c(\text{EDTA-2Na})=0.40\text{ mol/L}$ 、淋洗6h条件下,土壤中Pb的去除率最高;EDTA-2Na溶液对Pb质量比高的盐渍化土壤表层中Pb的去除率(67.9%),明显高于Pb质量比低的土壤;经EDTA-2Na溶液淋洗后,相比初始土壤,低盐渍化土壤中盐的质量比增加,高盐渍化土壤中盐的质量比降低;增加淋洗次数虽提高了土壤中Pb的去除率(84.9%),但增加了土壤的盐渍化程度。在最佳条件下,使用EDTA-2Na溶液淋洗盐渍化Pb污染土壤,可有效去除土壤中的Pb,但要考虑对土壤盐渍化程度的影响。

关键词:化学淋洗法;盐渍化土壤;Pb污染;乙二胺四乙酸二钠(EDTA-2Na)溶液

分类号:(中图)X53;S156.4

文献标志码:A

土壤重金属污染已成为影响粮食产量和食品安全的重要环境问题。研究结果显示,重金属铅(Pb)是土壤中主要的重金属污染物之一^[1]。Pb在农田土壤中的赋存形态、迁移过程以及转化机理,是环境地球化学研究领域的热点问题^[2-3]。在我国主要类型土壤中,Pb的质量比($\rho(\text{Pb})$)为2~200mg/kg,其平均值为10mg/kg。然而在污染较严重的地区,农田土壤中 $\rho(\text{Pb})$ 高达2300mg/kg^[4]。陈世宝等^[5]的研究结果显示,我国耕地土壤的重金属污染点位超标率达19.4%、Pb含量超标率为1.5%。土壤盐渍化与重金属污染共存,是造成土壤质量严重下降的主要原因^[6-7]。目前,有关盐基离子对盐渍化Pb污染土壤修复的影响,仍然缺乏全面认识^[8-9]。因此,开展盐渍化Pb污染土壤的修复研究有重要意义。对于土壤中重金属修复研究,化学淋洗法表现出修复效果明显、修复时间短及能够保障污染场地安全性等优势,被广泛用于实际修复工

程^[10-11]。目前,常用的淋洗剂包括无机溶液、有机酸、人工螯合剂和表面活性剂等,且不同种类淋洗剂对Pb污染土壤的修复效果各有特色^[12-13]。武迎飞^[14]的研究结果显示,以乙二胺四乙酸(EDTA)溶液为淋洗剂,土壤中Pb的去除率(R),随着EDTA溶液浓度的增加而增加。曹斌^[15]通过“酸洗-碱回调”方法,淋洗修复某市铅蓄电池厂退役场地重金属污染土壤。结果显示,盐酸淋洗剂可有效洗脱土壤中的重金属Pb, R 高达90%。目前,采用化学淋洗法修复重金属污染土壤的相关研究,主要关注该方法的应用条件和重金属的去除效果,缺乏对土壤理化性质影响的相关研究。研究结果显示,在对盐渍化Pb污染土壤修复过程中,Pb离子与盐基离子结合,增加了Pb在土壤中的滞留量^[16],也增加了淋洗法去除Pb的难度。另外,淋洗液可能对土壤理化性质产生影响,即淋洗液在将结合态Pb离子转化为可交换态Pb并去除的同时,可能影响土壤的盐渍化

收稿日期:2024-11-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(42007300);宁夏自然科学基金资助项目(2022AAC03037);宁夏回族自治区重点研发计划(引才专项)项目(2024BEH04046);宁夏回族自治区农业资源环境监测与保护项目(2130135)

作者简介:马进兰(2002—),女,硕士研究生,主要从事区域金属污染修复研究,(电子信箱)430203594@qq.com。

*通信联系人:王莹(1990—),女,副教授,硕士研究生导师,博士,主要从事区域重金属污染防治研究,(电子信箱)wangying23424@163.com。

引用格式:马进兰,张玲,陈星宇,等.化学淋洗法修复盐渍化Pb污染土壤[J].宁夏大学学报(自然科学版中英文),2026,47(2):177-184.

程度^[17]。因此,当土壤中存在大量盐基离子时,使用化学淋洗法去除盐渍化土壤中的Pb,对土壤性质产生的影响还有待进一步研究^[18-19]。文中通过批量实验,结合土柱实验方法,分别以柠檬酸、盐酸、乙二胺四乙酸二钠(EDTA-2Na)溶液和茶皂素溶液为淋洗剂,探究化学淋洗法对盐渍化Pb污染土壤的修复效果及盐渍化的影响,以期为建立盐渍化Pb污染土壤的防治方法,提供理论依据和技术支撑。

1 实验部分

1.1 研究区概况

宁夏位于青藏高原高寒区、西北干旱区和东部季风区三大气候过渡带,属于我国干旱半干旱气候区。宁夏灌区西靠贺兰山,东依黄河,北至石嘴山市,南抵中卫市,地处黄河冲积平原,地势平坦,海拔为1 000~1 200 m。宁夏灌区涵盖银川市、石嘴山市、吴忠市及中卫市的大部分地区,总面积约

1万km²,是宁夏主要的农业生产区域。文中以典型农灌区镇河村农田土壤为研究对象。

1.2 样品采集与试剂

1)样品采集:采用对角线采样方法,在宁夏典型农灌区镇河村农田取样,得到不同盐渍化程度土壤样品。去除土壤样品中的碎石等杂质,将土壤放入烘箱(35℃)中烘干,研磨并过40目筛。使用化学分析和仪器检测方法,分析土壤样品的理化性质,包括pH值、含水量($w(\text{H}_2\text{O})$)及土壤中Pb的本底值,检测土壤中主要盐基离子(Ca^{2+} 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 K^+ 、 CO_3^{2-} 、 HCO_3^-)的质量比和形态。不同盐渍化程度土壤样品的理化性质见表1。

2)试剂。国药集团化学试剂有限公司生产的柠檬酸、盐酸、乙二胺四乙酸二钠、茶皂素和硝酸铅。所有溶液均使用超纯水配制。

1.3 实验设计

实验设计见表2。

表1 供试土壤的理化性质

Tab. 1 Physicochemical properties of the test soils

样品	pH值	$w(\text{H}_2\text{O})/\%$	$\rho(\text{Pb}^{2+})/(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	$\rho(\text{Ca}^{2+})/(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$	$\rho(\text{Mg}^{2+})/(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$	$\rho(\text{Cl}^-)/(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$
1号土壤	7.7	1.6	7.5	0.66	0.10	1.40
2号土壤	9.8	4.1	5.7	0.21	0.14	1.80
样品	$\rho(\text{Na}^+)/(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$	$\rho(\text{Cu}^{2+})/(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	$\rho(\text{K}^+)/(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$	$\rho(\text{HCO}_3^{2-})/(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$	$\rho(\text{HCO}_3^-)/(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$	$\rho(\text{SO}_4^{2-})/(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$
1号土壤	0.31	9.5	0.60	—	3.66	1.19
2号土壤	0.93	16.5	0.08	0.15	2.61	0.40

表2 实验设计

Tab. 2 Experimental design

实验类型	实验步骤	变量设置	测量指标
批量实验(淋洗条件的确定)	1. 模拟Pb污染盐渍化土壤的制备	1. 淋洗剂种类:柠檬酸、盐酸、乙二胺四乙酸二钠、茶皂素	溶液中Pb的质量比、Pb的去除率
	2. 淋洗剂种类的确定	2. 淋洗剂浓度:0、0.10、0.20、0.30、0.40、0.50、0.60 mol/L	
	3. 淋洗剂浓度的确定	3. 淋洗时间:2、6、8、10、24、48 h	
	4. 淋洗时间的确定	4. 淋洗剂用量:3、5、8、10、15 mL/g (以1.0 g土壤的用量计算)	
	5. 淋洗剂用量的确定		
土柱实验(盐渍化Pb污染土壤的淋洗修复)	1. 模拟不同Pb质量比盐渍化土壤的制备	1. Pb初始质量比为20、60、80 mg/kg的1号盐渍化土壤	土壤pH值、土壤中Pb和盐的质量比
	2. 模拟不同程度盐渍化Pb污染土壤的制备	2. D:低盐渍化程度土壤;E:高盐渍化程度土壤	

1.4 实验方法

1.4.1 采用批量实验方法确定淋洗条件

1)模拟盐渍化Pb污染土壤的制备。取500 g土壤(使用1号盐渍化土壤制备 $\rho(\text{Pb})=40 \text{ mg/kg}$ 的土壤)置于烧杯中,加入 $c=0.10 \text{ mol/L}$ 的Pb标准溶液

10 mL,用玻璃棒搅拌,使土壤充分吸附Pb。混合均匀后,放入烘箱(35℃)中烘干,磨碎过40目筛备用。

2)淋洗剂种类的确定。取 $\rho(\text{Pb})=40 \text{ mg/kg}$ 模拟盐渍化土壤(5.00 ± 0.01) g置于100 mL的玻璃顶空瓶中。分别配制 $c=0.10 \text{ mol/L}$ 的柠檬酸、盐

酸、EDTA-2Na 和茶皂素溶液,将它们作为淋洗剂。按 1.0 g 土壤中分别加入 10 mL 淋洗剂的用量加入玻璃顶空瓶,体系总体积为 50 mL,设置 3 组平行实验。在 25℃、200 r/min 下振荡 8 h,再于 3 000 r/min 下离心分离 20 min。取上层清液,用 0.45 μm 滤膜针管过滤器过滤,将滤液保存于 2 mL 离心试管。使用电感耦合等离子体质谱仪(inductively coupled plasma-mass spectrometer, ICP-MS)测定溶液中 Pb 的质量比,然后计算 Pb 的去除率,进而确定盐渍化 Pb 污染土壤中 Pb 去除的最佳淋洗剂。

3) 淋洗剂浓度的确定。配置 $c=0, 0.10, 0.20, 0.30, 0.40, 0.50, 0.60$ mol/L 的淋洗剂溶液。取 (5.00 ± 0.01) g 盐渍化 Pb 污染土壤置于 100 mL 的玻璃顶空瓶,按 1.0 g 土壤中分别加入 10 mL 淋洗剂的用量加入顶空瓶。体系总体积为 50 mL,设置 3 组平行实验。操作同上,确定淋洗剂的最佳浓度。

4) 淋洗时间的确定。取 (5.00 ± 0.01) g 盐渍化 Pb 污染土壤置于 100 mL 的玻璃顶空瓶,按 1.0 g 土壤中分别加入 10 mL 淋洗剂的用量加入顶空瓶。体系总体积为 50 mL,设置 3 组平行实验。室温下振荡 2、6、8、10、24、48 h,离心分离后,取上层清液过滤。然后,测定溶液中 Pb 的质量比,计算 Pb 的去除率,从而确定最佳的淋洗时间。

5) 淋洗剂使用量的确定。取 (5.00 ± 0.01) g 盐渍化 Pb 污染土壤置于 100 mL 的玻璃顶空瓶,按 1.0 g 土壤中分别加入 3、5、8、10、15 mL 淋洗剂的用量加入顶空瓶。体系总体积分别为 15、25、40、50、75 mL,设置 3 组平行实验。室温下振荡 6 h,离心分离后过滤。然后,测定溶液中 Pb 的质量比,计算 Pb 的去除率,从而确定最佳的淋洗剂使用量。

1.4.2 采用土柱实验对模拟盐渍化 Pb 污染土壤进行淋洗修复 采用亚克力透明柱,柱高为 45 cm、内径为 2.5 cm。分别将 150 g 不同 Pb 质量比、不同程度盐渍化土壤装入柱中,填装土柱时,根据野外实际土壤的密度及初始含水量进行分次装填,每次装填所需要土壤总质量(m_t)的计算式为

$$m_t = V_e \times d \times (1 + w_0) \quad (1)$$

式中: V_e 为土柱的体积; w_0 为土壤初始含水量; d 为土柱的直径。

装填土柱的最终高度为 40 cm,填装时保证土柱中土壤颗粒分布均匀。在土柱上下两端,均填装 1.5 cm 厚石英砂,并将其作为反滤层,以减少淋洗时的土壤损失量,并保证淋洗剂流通顺畅。实验装置见图 1。

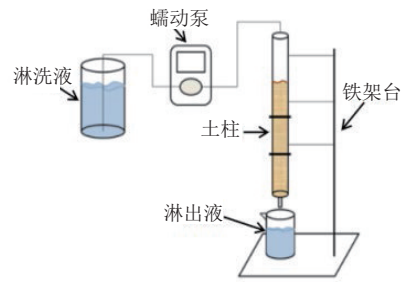


图 1 土壤实验装置

Fig. 1 Soil experimental setup

装填完成后,将土柱的底部开口浸入去离子水中,使去离子水从下到上地充分润湿土壤。室温下放置 1 d,待土柱内环境相对稳定后进行实验,不同条件下设置 2 组平行实验。实验过程中,用蠕动泵以 4 mL/min 的体积流量从柱子顶端通入淋洗剂。6 h 后,将柱中土壤按照表层土壤(0~20 cm)、深层土壤(>20~40 cm)的顺序取出,置于烘箱(35℃)烘干。将烘干土壤研磨、过筛,分析土壤的理化性质、土壤中 Pb 和盐基离子的质量比。

1) 模拟不同 Pb 质量比盐渍化土壤的柱淋洗实验。选取 1 号盐渍化土壤制备模拟不同 Pb 质量比盐渍化土壤,设置土壤中 Pb 的初始质量比(ρ_0)分别为 20, 60, 80 mg/kg。

2) 模拟不同程度盐渍化 Pb 污染土壤的柱淋洗实验。选取 1, 2 号土壤制备不同程度盐渍化 Pb 污染土壤。土壤中 $\rho(\text{Pb})$ 控制在 70 mg/kg 左右。土壤盐渍化是指土壤中可溶性盐分过多积累导致的土壤退化现象。土壤中盐的质量比 $\rho(s)$ 体现了土壤中盐分的积累水平。当 $\rho(s) > 6.0$ g/kg 时,土壤表现出盐渍化特征。土壤中的 $\rho(s)$ /(g/kg) 计算式为

$$\rho(s) = \rho(\text{CO}_3^{2-}) + \rho(\text{HCO}_3^-) + \rho(\text{SO}_4^{2-}) + \rho(\text{Cl}^-) + \rho(\text{Mg}^{2+}) + \rho(\text{Ca}^{2+}) + \rho(\text{Na}^+) + \rho(\text{K}^+) \quad (2)$$

式中: ρ 为各离子的质量比(g/kg)。

实验中,1, 2 号土壤均为盐渍化土壤,其 $\rho(s)$ 分别为 7.91、6.32 g/kg, 1 号土壤的盐渍化程度较严重。

1.5 分析方法

各淋洗剂的 Pb 去除率(R)计算式为:

$$R = (\rho_1 - \rho_2) / \rho_1 \times 100\% \quad (3)$$

式中: ρ_1 、 ρ_2 分别为淋洗前后土壤中 Pb 的质量比(mg/kg)。

淋洗后土壤的 pH 值、土壤中 $\rho(\text{Pb})$ 和 $\rho(s)$ 均为表层土壤与深层土壤的平均值。

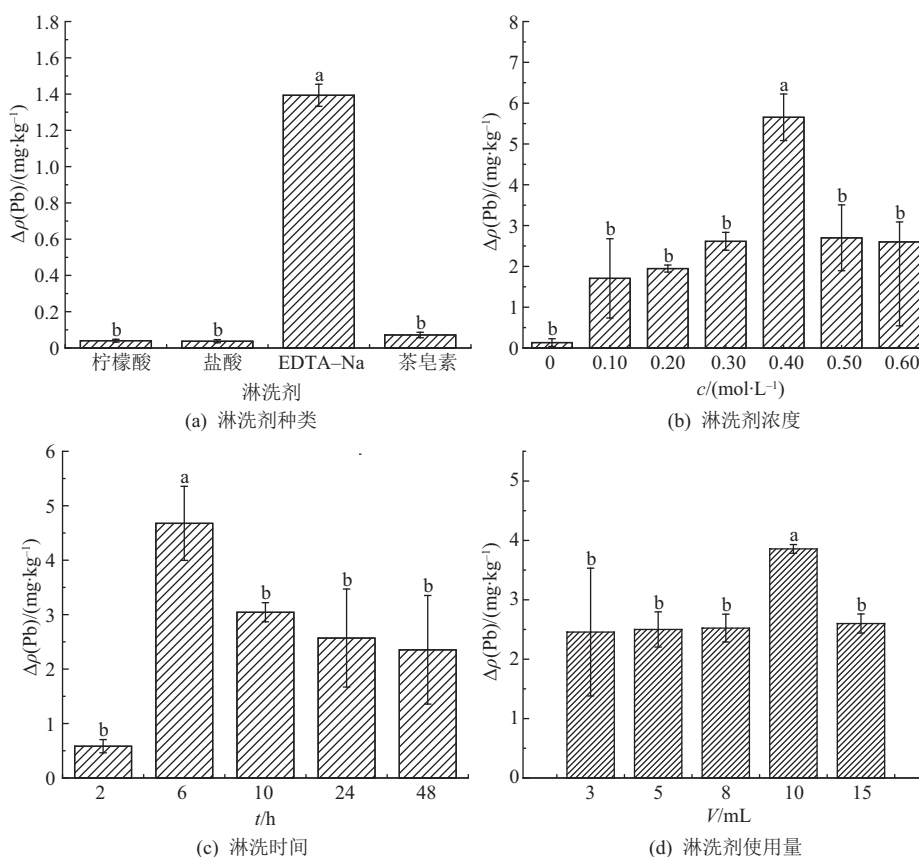
1.6 数据处理

使用 Excel 2020 软件对淋洗前后土壤中 $\rho(\text{Pb})$ 、 $\rho(s)$ 数据进行统计分析,使用 Origin 2022 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 化学淋洗法修复模拟盐渍化 Pb 污染土壤的淋洗条件

从淋洗剂种类、浓度、用量及淋洗时间 4 个方



注:图中不同字母表示处理间存在统计学显著差异。

图 2 淋洗条件的确定

Fig. 2 Determination of leaching conditions

通过 4 组批量实验,确定最佳的淋洗条件。在以 $c(\text{EDTA-2Na})=0.40 \text{ mol/L}$ 为淋洗剂,室温下淋洗 6 h, 1.0 g 土壤中加入 10 mL 淋洗剂的条件下,盐渍化土壤中 Pb 的去除效果最好。这也是后续土柱实验淋洗修复模拟盐渍化 Pb 污染土壤研究的最佳淋洗条件。

2.2 土柱实验淋洗修复模拟盐渍化 Pb 污染土壤

通过土柱实验,研究化学淋洗法对不同 Pb 质量比和不同程度盐渍化 Pb 污染土壤的修复。对比淋洗前后土壤的 pH 值、理化性质和土壤中 $\rho(\text{Pb})$ 、 $\rho(s)$ 的变化,分析化学淋洗法对盐渍化 Pb 污染土壤中 Pb 的去除效果、土壤理化性质和盐渍化程度的影响。

面,研究化学淋洗法对盐渍化土壤中 Pb 的去除效果(图 2,图中 $\Delta\rho(\text{Pb})$ 为 Pb 的去除量,即 $\rho_1-\rho_2$)。结果显示,EDTA-2Na 溶液的 $\Delta\rho$ 最高,且 $\Delta\rho$ 随着 EDTA-2Na 溶液浓度的升高呈现先升高后降低的趋势,最佳 $c(\text{EDTA-2Na})=0.40 \text{ mol/L}$ 。 $\Delta\rho$ 随着淋洗时间(t)的增加先增加后降低,且在 $t=6 \text{ h}$ 时 $\Delta\rho$ 最高, R 达 95%。淋洗剂使用量的研究结果显示, $\Delta\rho$ 随着淋洗剂使用量的增加呈现先增加后减少的趋势,当 1.0 g 土壤中加入 10 mL 淋洗剂时, $\Delta\rho$ 最佳。

2.2.1 土柱实验淋洗修复模拟不同 Pb 质量比盐渍化土壤 取 1 号土壤制备模拟不同 Pb 质量比盐渍化土壤,设置土壤中初始 $\rho(\text{Pb})$ 分别为 20、60、80 mg/kg。老化后土壤样品的理化性质见图 3。土壤中初始 $\rho(\text{Pb})$ 对化学淋洗法的 R 有显著影响。室温下 6 h 的淋洗实验结果显示,不同深度土壤的 pH 值均有所增加(图 3)。在初始 $\rho(\text{Pb})$ 较高的表层土壤中,淋洗后的 R 高达 69.7%。在初始 $\rho(\text{Pb})=60 \text{ mg/kg}$ 的深层($>20\sim40 \text{ cm}$)土壤中, $\rho(\text{Pb})$ 降低。但在初始 $\rho(\text{Pb})=20、80 \text{ mg/kg}$ 的深层土壤中,相比于初始土壤, $\rho(\text{Pb})$ 没有明显变化。另外,相较于初始土壤,淋洗后表层、深层土壤的 $\rho(s)$ 均升高,其中,表

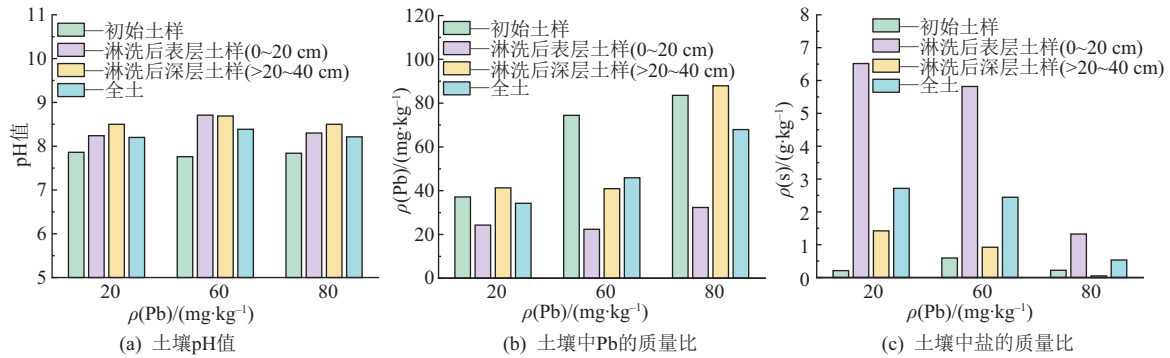


图 3 淋洗前后土样的 pH 值、Pb 及盐的质量比变化

Fig. 3 Changes in pH value, Pb content, and salt content of soil samples with different Pb concentrations before and after leaching

层土壤的 $\rho(s)$ 增加较明显。淋洗后,土壤的 pH 值均增加,初始 $\rho(Pb)$ 越高,土壤的 R 越高(高达 57.2%)。

2.2.2 土柱实验淋洗修复模拟不同程度盐渍化 Pb 污染土壤 取两种不同程度盐渍化土壤制备所需的含 Pb 土壤 D, E, 然后对其理化性质、 $\rho(Pb)$ 、 $\rho(s)$ 进行测定(表 3)。

相比于初始土壤样品,淋洗后 D 土壤的 pH 值无明显变化, E 土壤表层、深层的 pH 值均上升(图 4)。两种土壤样品中的 $\rho(Pb)$ 均下降,其中, D 土壤深层中 R 高于表层土壤,达 45.5%,表明经过淋洗,表层土壤中仍滞留一定质量的 Pb,但 $\rho(Pb)$ 已经明显低于初始

表 3 土壤样品的理化性质、Pb 及盐的质量比

Tab. 3 Physicochemical properties, mass content of Pb and salt in soil samples

样品	pH 值	$w(H_2O)/$ ($g \cdot kg^{-1}$)	$\rho(Pb) /$ ($g \cdot kg^{-1}$)	$\rho(s) /$ ($g \cdot kg^{-1}$)
D	10.40	63.7	69.77	6.18
E	7.59	1.6	72.72	18.25

土壤。相反, E 土壤表层中 R 高于深层土壤,这可能是由于 Pb 与土壤中的盐基离子结合形成可交换形态,增加了 Pb 的迁移性,导致土壤表层中 Pb 向深层迁移并滞留在深层,最终使土壤深层中 $\rho(Pb)$ 增加。

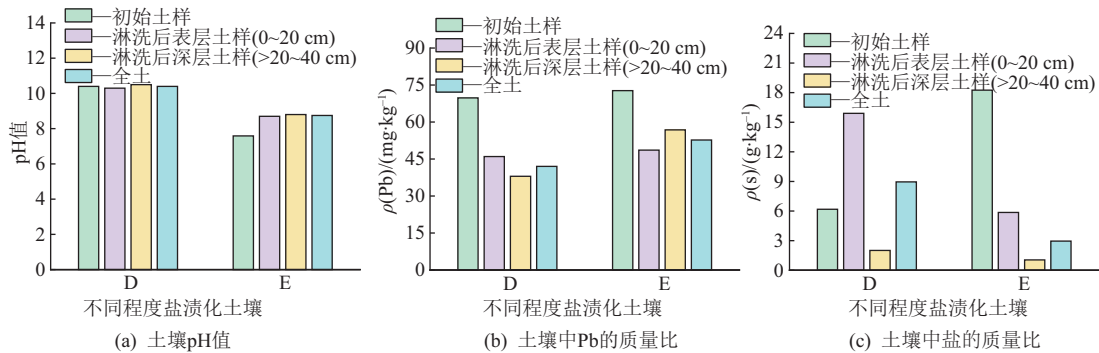


图 4 淋洗前后不同程度盐渍化土样的 pH 值、Pb 及盐的质量比变化

Fig. 4 Changes in pH value, Pb content, and salt content of soil samples with different degrees of salinization before and after leaching

淋洗前后,土壤中 $\rho(s)$ 相比于初始土壤发生一定变化:淋洗后, D 土壤表层中 $\rho(s)$ 明显增加,土壤中 $\rho(s)$ 升高;而 E 土壤表层、深层中 $\rho(s)$ 降低,土壤盐渍化程度减轻。对比淋洗前后不同程度盐渍化 Pb 污染土壤的性质变化,发现在相同时间的淋洗过程中, EDTA-2Na 溶液可减小高盐渍化土壤中的 $\rho(s)$, 但会增加低盐渍化土壤中的 $\rho(s)$ 。

淋洗后 D 土壤的 pH 值没有变化,而 E 土壤的

pH 值有所增加。对于 R , 盐渍化程度低的土壤中 Pb 的去除效果较好, R 达 38.52%。相较于初始土壤,淋洗后 E 土壤的盐渍化程度降低,但 D 土壤的盐渍化程度加剧。

2.2.3 淋洗次数(N)对土壤中 R 的影响 取 1 号土壤制备初始土样,土样的 pH 值为 8.05, $w=7.5 g/kg$, $\rho(Pb)=49.01 mg/kg$, $\rho(s)=3.66 g/kg$ 。为探究 N 对盐渍化土壤中 R 的影响,分别淋洗 1, 3, 6 次,每次淋洗 6 h。实验结果显示, $N=1$ 次时,土壤

的 pH 值变化不明显。而 $N=3, 6$ 次时, 表层土壤的 pH 值无明显变化, 但深层土壤的 pH 值升高。对比 $N=1$ 次淋洗前后土壤中 $\rho(\text{Pb})$ 的变化, 发现土壤表层的 $\rho(\text{Pb})$ 下降, R 达 50%, 而土壤深层的 R 明显低于土壤表层(图 5)。 $N=3$ 次时, 土壤表层、深层的 R 分别为 82%、75.6%。 $N=6$ 次与 $N=3$ 次的 R 相近, 对于土壤表层、深层, R 分别为 84.9%、75.8%。说明 N 从 1 次增加到 3 次, 可以增加 R , 但是 N 从 3 次增加到 6 次, R 增加但并不明显。

淋洗前后土壤中 $\rho(\text{s})$ 见图 5。结果显示, 相比于初始土壤, $N=1$ 次时, 土壤表层的盐渍化程度明显增加, 而土壤深层的盐渍化程度, 相较于表层, 没

有明显变化, 说明淋洗剂中的 Na^+ 主要积累在土壤表层。当 $N=3$ 次时, 表层土壤的盐渍化程度相较于 $N=1$ 次时有所降低, 但仍然高于初始土样, 这表明 N 增加后, 土壤中 Na^+ 随着淋洗液逐渐流出, 但是仍然有部分 Na^+ 滞留在土壤中。当 $N=6$ 次时, 土壤盐渍化程度, 对比 $N=3$ 次的没有明显变化, 说明 N 增加并没有增加 Na^+ 的迁移性。

淋洗后, 土壤的 pH 值均增加, 其中, 淋洗 $N=3, 6$ 次后, 土壤的 pH 值增量基本一样(图 5)。淋洗后土壤中的 R , 随着 N 增加而增加, 当 $N=3, 6$ 次时, R 最高达 79.9%。对于土壤中的 $\rho(\text{s})$, 淋洗后土壤中的 $\rho(\text{s})$ 均升高。

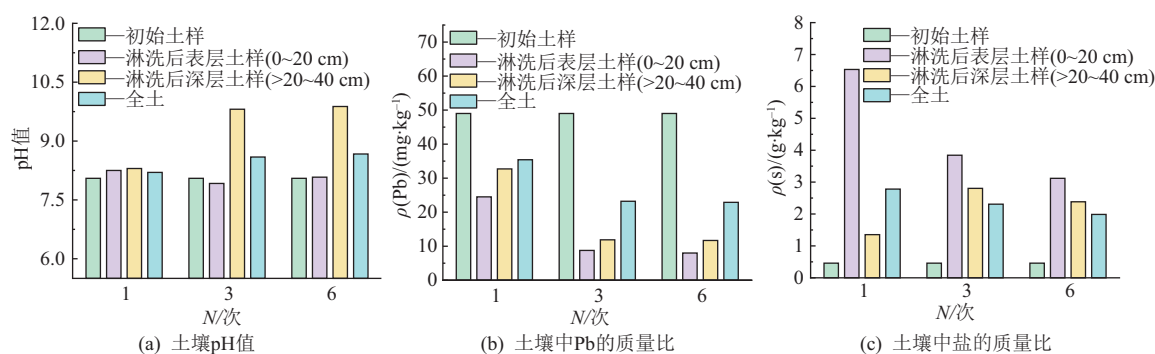


图 5 淋洗前后土样的 pH 值、Pb 及盐的质量比变化

Fig. 5 Changes in pH value, Pb content, and salt content of soil samples before and after leaching

3 讨论

EDTA-2Na 淋洗剂具有较强的螯合能力, 在较宽泛的 pH 值范围内, 可与多数金属发生络合反应生成稳定的络合物, 且通过淋洗可将这些络合物排入土壤。所以, 相比于其他几种淋洗剂, EDTA-2Na 淋洗剂对土壤中 Pb 的去除效果更佳^[20-21], 这与姚振楠等^[22]通过化学淋洗法修复 Cd, Pb, As 污染土壤的研究结果一致。在使用 EDTA-2Na 淋洗剂去除土壤中 Pb 的过程中, 由于 EDTA-2Na 淋洗剂中含有大量钠盐, Na^+ 通过离子交换滞留在土壤中。另外, 土壤中高浓度的盐基离子可与 EDTA-2Na 形成配合物, 增加了盐基离子的迁移性, 导致土壤中盐基离子含量降低。在土壤表层, Pb 可与土壤中矿物质和有机质结合, 进而降低 Pb 的去除率。这可能是由于 Pb^{2+} 与土壤中盐基离子结合形成可交换态, 增加了 Pb^{2+} 的迁移性, 使土壤表层的 Pb 向深层迁移并滞留在土壤深层, 导致土壤深层 $\rho(\text{Pb})$ 增加。增加淋洗次数 (N) 可以提高 Pb 的去除率 (R), 可能的原因: 一是多次淋洗增加了 Pb 与 EDTA-2Na 的接触时间, 使两者之间的相互作用更充分; 二是增

加 N , 加速了土壤中的 Pb^{2+} 溶出^[23-24], 这与胡造时等^[25]的研究结果类似。

经 EDTA-2Na 溶液淋洗后, 土壤的 pH 值升高, 原因可能是 EDTA-2Na 能够与土壤或其他介质中的金属阳离子 (如 Fe^{3+} , Al^{3+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} , Pb^{2+} , Cd^{2+} 等) 发生络合反应。在络合过程中, 原本与金属离子结合的羟基或水合质子发生去质子化, 消耗溶液中的 H^+ , 导致土壤的 pH 值升高。

当 $c(\text{EDTA-2Na}) < 0.40 \text{ mol/L}$ 时, R 随着 $c(\text{EDTA-2Na})$ 增加显著增加, 这是因为单位质量污染土壤接触到的淋洗剂平均用量增加, 使进入淋洗剂参与络合反应的盐基离子增加, 从而提升了淋洗剂对 Pb 污染土壤中 Pb 的洗脱能力。当 $c(\text{EDTA-2Na}) > 0.40 \text{ mol/L}$ 时, R 反而降低, 这是由于此时土壤中的 Pb 以专性吸附为主, 土壤中可与螯合剂形成稳定螯合物的 Pb 基本被络合, 再提高螯合剂浓度, 很难使 Pb 从土壤中解吸^[26]。

淋洗初期 ($t=0\sim 6 \text{ h}$), R 显著上升, 继续增加 t , R 增幅缓慢并逐渐降低, 这可能是在淋洗初期, EDTA-2Na 与土壤中大量弱结合态 Pb^{2+} 迅速发生络合反应, 破坏了 Pb^{2+} 在固-液界面的吸附平衡, 促

进其快速解吸和迁移。因此,淋洗初期 R 增幅相对较大且增长迅速。淋洗后期($t=6\sim 48\text{ h}$), R 趋于平缓并逐渐下降,这可能是由于EDTA-2Na与共存二价阳离子发生竞争络合反应,导致EDTA-2Na与 Pb^{2+} 的螯合能力逐渐降低;另一方面,也可能是由于土壤中易解吸态Pb的逐渐耗尽,限制了Pb的持续释放^[27]。

4 结论

1)采用批量实验对模拟盐渍化Pb污染土壤进行化学淋洗修复研究,筛选出最佳的化学淋洗条件:以 $c(\text{EDTA-2Na})=0.40\text{ mol/L}$ 为淋洗剂,淋洗时间为6 h,淋洗剂的用量为1.0 g土壤中加入10 mL淋洗剂。

2)以EDTA-2Na溶液为淋洗剂,对模拟不同Pb质量比盐渍化土壤进行淋洗修复研究。结果显示,EDTA-2Na溶液对Pb质量比高的土壤表层中的 R 较高(69.7%)。

3)采用EDTA-2Na溶液淋洗修复模拟不同程度盐渍化Pb污染土壤,发现淋洗降低了高盐渍化土壤中的 $\rho(\text{s})$,但增加了低盐渍化土壤中 $\rho(\text{s})$ 。

4)以EDTA-2Na溶液为淋洗剂,增加 N 可增加 R , R 最高达84.9%,但这样会增加土壤的盐渍化程度。

参考文献:

- [1] 郭洁芸,许馨丹,万馨媛,等. 大面积农田土壤中重金属污染的空间分布及生态风险定量快速初步评价[J]. 宁夏大学学报(自然科学版), 2026, 47(1): 90-96.
- [2] XU Chao, XIANG Qian, ZHU Qihong, et al. Effect of controlled-release urea on heavy metal mobility in a multimetal-contaminated soil [J]. *Pedosphere*, 2020, 30(2): 263-271.
- [3] WANG Xu, GAO Ping, LI Daping, et al. Risk assessment for and microbial community changes in farmland soil contaminated with heavy metals and metalloids[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, 185: 109685. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2019.109685.
- [4] 张广庆. 滨海重盐渍化地区重金属污染土壤钝化修复效果及评价[D]. 天津:天津大学, 2020.
- [5] 陈世宝,王萌,李彬彬,等. 中国农田土壤重金属污染防治现状与问题思考[J]. 地学前缘, 2019, 26(6): 35-41.
- [6] 张祎曼. 浅析中国西北地区土壤盐渍化现状及修复对策[J]. 当代化工研究, 2018(2): 26-27.
- [7] ZHANG Yufei, LI Yongping, SUN Jianlin, et al. Optimizing water resources allocation and soil salinity control for supporting agricultural and environmental sustainable development in Central Asia[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 704: 135281. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.135281.
- [8] PENG Min, ZHAO Chuangdong, MA Honghong, et al. Heavy metal and Pb isotopic compositions of soil and maize from a major agricultural area in Northeast China: contamination assessment and source apportionment [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2020, 208: 106403. DOI: 10.1016/j.gexplo.2019.106403.
- [9] 冯保清,崔静,吴迪,等. 浅谈西北灌区耕地盐渍化成因及对策[J]. 农村水利水电, 2019(9): 43-46.
- [10] 郭军康,李艳萍,李永涛,等. 采用草酸和乙二胺四乙酸去除农田土壤中砷和镉污染[J]. 环境工程, 2019, 37(5): 70-75.
- [11] 黄川,李柳,黄珊,等. 重金属污染土壤的草酸和乙二胺四乙酸混合淋洗研究[J]. 环境工程学报, 2014, 8(8): 3480-3486.
- [12] 王亚男,刘冬勤,杨伟卫,等. 重金属污染土壤修复淋洗剂研究进展[J]. 四川环境, 2023, 42(1): 315-320.
- [13] WEI Hei, NIU Yaolan, ZHU Hui, et al. Remediation of zinc-contaminated soils by using the two-step washing with citric acid and water-soluble chitosan [J]. *Chemosphere*, 2021, 282: 131092. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.131092.
- [14] 武迎飞. 乙二胺四乙酸淋洗修复Pb、Cd重金属污染土壤[J]. 商丘师范学院学报, 2018, 34(12): 64-66.
- [15] 曹斌. 淋洗法修复某铅蓄电池厂退役场地重金属污染土壤工程实施探讨[J]. 科技创新与应用, 2018(8): 75-77.
- [16] LIU Hongwei, KHAN M Y, CARVALHAIS L C, et al. Soil amendments with ethylene precursor alleviate negative impacts of salinity on soil microbial properties and productivity [J]. *Scientific Reports*, 2019, 9: 6892. DOI: 10.1038/s41598-019-43305-4.
- [17] ZHAO Yonggan, WANG Shujuan, Li Yan, et al. Effects of straw layer and flue gas desulfurization gypsum treatments on soil salinity and sodicity in relation to sunflower yield [J]. *Geoderma*, 2019, 352: 13-21.
- [18] 郭伟,张焕祯,王明超,等. 淋洗法修复重金属污染土壤研究进展[C]//《环境工程》编委会,工业建筑杂志社有限公司.《环境工程》2018年全国学术年会论文集(下册). 北京, 2018.
- [19] 孙玉焕,宋淑敏,张亮. 复合淋洗剂柱淋洗法修复工业废弃地铬污染土壤[J]. 环境污染与防治, 2017, 39(2): 191-201.
- [20] 张玲,马进兰,李晓楠,等. 天然水体中共存离子对重金属 Pb^{2+} 在 Al_2O_3 上吸附行为的影响[J]. 宁夏大学学报(自然科学版中英文), 2025, 46(2): 197-203.
- [21] 周坤,冯冬,常星竹,等. 化学淋洗法修复重金属锌污染土壤效果研究[J]. 当代化工研究, 2023(17): 72-74.
- [22] 姚振楠,钮恺之,李明,等. 化学淋洗法修复土壤中Cd、Pb、As的工程研究[J]. 广东化工, 2021, 48(12): 154-156.
- [23] 刘磊,胡少平,陈英旭,等. 淋洗法修复化工厂遗留地重金属污染的可行性[J]. 应用生态学报, 2010, 21(6): 1537-1541.

- [24] 刘霞,王建涛,张萌,等. 整合剂和生物表面活性剂对 Cu、Pb 污染壤土的淋洗修复[J]. 环境科学, 2013, 34(4):1590-1597.
- [25] 胡造时,莫创荣,覃利梅,等. 无患子皂苷对土壤重金属 Cr 的淋洗修复[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2016, 41(5):1683-1688.
- [26] 韩廿. 整合剂对植物修复镉砷复合污染农田的影响[D]. 北京:中国农业科学院, 2020.
- [27] 吴刚. 可降解整合剂淋洗修复受重金属污染土壤的研究[D]. 扬州:扬州大学, 2022.

Remediation of Lead Pollution in Salinized Soil Using Chemical Leaching

MA Jinlan^{1,2}, ZHANG Ling^{1,2}, CHEN Xingyu^{1,2}, WANG Ying^{1,2*}

(1. School of Ecology and Environment, Ningxia University, Yinchuan 750021, China;

2. Key Laboratory of Restoration and Reconstruction of Degraded Ecosystems in Northwestern China of Ministry of Education, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: This study focuses on the farmland soil of Zhenhe Village, a typical agricultural irrigation area in Ningxia. Using a combination of batch experiments and soil column experiments, it investigates the effects of the type, concentration, dosage, and leaching duration of leaching agents on the removal rate of Pb in simulated Pb-contaminated soil. Soil column simulation experiments were conducted to study the remediation of Pb-contaminated soils with different Pb contents and salinization levels using the leaching method. The results show that disodium ethylenediaminetetraacetate (EDTA-2Na) solution achieves the highest Pb removal rate in saline soils. For 1 g of soil, under the conditions of 10 mL of EDTA-2Na solution with a concentration of 0.4 mol/L leached for 6 hours, the Pb removal rate in the soil is maximized. The removal rate of Pb using EDTA-2Na solution is significantly higher in high-Pb saline soils (67.9%) compared to soils with low Pb content. After EDTA-2Na leaching, the total salt content in low-salinity soils increases compared to the initial soil, whereas in high-salinity soils, the total salt content decreases. Although increasing the number of leaching treatments improves the Pb removal rate in soil (84.9%), it also increases soil salinization. Under optimal conditions, leaching saline Pb-contaminated soil with EDTA-2Na solution can effectively remove Pb from the soil; however, the impact on soil salinization must be taken into account.

Keywords: chemical leaching method; salinized soil; lead pollution; disodium ethylenediaminetetraacetic acid solution

(责任编辑 高继红)

(上接第 167 页)

Formation Mechanism, Biological Function and Research Prospect of Migrasomes

HU Haijing^{1,2,3}, LIU Jiasheng^{1,2,3}, ZHONG Jian^{1,2,3}, ZHANG Cui Fang^{1,2,3*}

(1. Xiamen Cardiovascular Hospital, Xiamen University, Xiamen 361004, China;

2. School of Medicine, Xiamen University, Xiamen 361102, China;

3. Fujian Branch, National Clinical Research Center for Cardiovascular Diseases, Xiamen 361009, China))

Abstract: Migrasomes are membranous organelles discovered in recent years, produced by migrating cells. Their formation depends on cytoskeletal reorganization and changes in membrane tension triggered by integrins and extracellular matrix during cell migration, and they are mainly distributed at the ends or branching points of retraction fibers. The migrasome is a vesicular structure with a diameter of approximately 0.5-3.0 μm, containing numerous small vesicles and a variety of biologically active molecules. Migrasomes play critical roles in diverse physiological and pathological contexts, including embryonic development, substance transport, mitochondrial quality control, and coagulation regulation. In this review, we summarize the molecular mechanisms of migrasomes formation, their biological functions and roles in diseases, and discuss possible future research directions in this field.

Key words: migrasome; retraction fiber; cell migration; biological function

(责任编辑 张 娣)