

## 聚天冬氨酸对土壤镉有效性及其吸附解吸特性的影响

李艳梅, 王微, 林小兵, 刘长征, 刘士余, 徐振唐, 张崧, 胡奔流

### 引用本文:

李艳梅, 王微, 林小兵, 等. 聚天冬氨酸对土壤镉有效性及其吸附解吸特性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2026, 415(1): 94-104.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2025-0631>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 硅对不同pH水田土壤吸附-解吸镉的影响

刘鸣达, 李彩, 赵玉婷, 应博, 杨丹, 何娜, 王耀晶

农业环境科学学报. 2017, 36(4): 672-677 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-1548>

#### 耐镉促生根瘤菌的鉴定及其对镉的吸附特性

池耀威, 王晓雅, 初少华, 周培, 张丹

农业环境科学学报. 2021, 40(4): 791-800 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0975>

#### 长期不同耕作方式与秸秆还田对稻田镉生物有效性的影响

龙泽东, 孙梅, 罗尊长, 孙耿, 李超, 肖小平

农业环境科学学报. 2021, 40(9): 1888-1896 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0152>

#### 前期灌溉养殖废水和再生水对土壤吸附镉能力的影响

李宝贵, 刘源, 陶甄, 赵志娟, 樊涛, 李中阳

农业环境科学学报. 2021, 40(6): 1244-1255 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1519>

#### 施锰微肥对镉污染土壤中玉米生长及镉吸收分配的影响

胡艳美, 吕金朔, 孙维兵, 张兴, 陈璐, 郭大维, 党秀丽

农业环境科学学报. 2021, 40(8): 1635-1643 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0106>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

李艳梅, 王微, 林小兵, 等. 聚天冬氨酸对土壤镉有效性及其吸附解吸特性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2026, 45(1): 94–104.  
LI Y M, WANG W, LIN X B, et al. Effects of polyaspartic acid on cadmium availability and adsorption-desorption behavior in Cd-gradient soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2026, 45(1): 94–104.



开放科学 OSID

# 聚天冬氨酸对土壤镉有效性及其吸附解吸特性的影响

李艳梅<sup>1,2</sup>, 王微<sup>1</sup>, 林小兵<sup>3</sup>, 刘长征<sup>1</sup>, 刘士余<sup>1\*</sup>, 徐振唐<sup>2</sup>, 张焱<sup>1</sup>, 胡奔流<sup>2</sup>

(1. 江西农业大学国土资源与环境学院, 农业农村部鄱阳湖流域农业资源与生态重点实验室, 南昌 330045; 2. 江西省华赣环境技术研发有限公司, 南昌 330096; 3. 江西省红壤及种质资源研究所, 国家红壤改良工程技术研究中心, 南昌 331717)

**摘要:**为探究聚天冬氨酸(PASP)对镉污染土壤生物有效性的调控机制,明确其最佳作用条件及镉梯度差异响应规律,通过选取轻度( $0.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )和重度( $19.66 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )两种镉污染水平的耕地原土,研究了PASP对镉赋存形态、吸附-解吸行为及环境因子响应的影响。结果表明:分子量为4 000~5 000 Da、施用量为 $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的PASP可显著提升土壤有效态镉含量( $P < 0.05$ ),促进土壤中活性较低的镉形态向高生物有效性的弱酸提取态转化,但不会对土壤本底pH产生大的扰动; Freundlich模型证实PASP可降低土壤镉吸附能力,同步提高解吸率并降低滞后指数,即PASP通过抑制吸附-促进解吸双重途径促使土壤固相中的镉更多地释放进入土壤溶液,进而增强镉的生物有效性; Elovich模型表明吸附过程呈快速(0~1 h)、慢速(1~10 h)和平衡(>10 h)三阶段特征; PASP的最适作用条件是pH 6、温度15~25 °C,其效率受pH、温度及土壤吸附容量驱动,而受土壤本底镉含量影响有限。研究表明, PASP通过重塑镉形态分布、削弱吸附结合能及降低解吸能垒,显著活化了土壤镉,为发展以PASP为核心的整合诱导植物修复技术,精准治理镉污染土壤提供理论依据。

**关键词:**聚天冬氨酸; 镉生物有效性; 吸附-解吸; 土壤修复

中图分类号: X53 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2026)01-0094-11 doi:10.11654/jaes.2025-0631

## Effects of polyaspartic acid on cadmium availability and adsorption-desorption behavior in Cd-gradient soils

LI Yanmei<sup>1,2</sup>, WANG Wei<sup>1</sup>, LIN Xiaobing<sup>3</sup>, LIU Changzheng<sup>1</sup>, LIU Shiyu<sup>1\*</sup>, XU Zhentang<sup>2</sup>, ZHANG Qin<sup>1</sup>, HU Benliu<sup>2</sup>

(1. College of Land Resources and Environment, Key Laboratory of Agricultural Resources and Ecology in Poyang Lake Watershed of Ministry of Agriculture and Rural Affairs in China, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China; 2. Jiangxi Huagan Environmental Technology R&D Co., Ltd., Nanchang 330096, China; 3. National Red Soil Improvement Engineering Technology Research Center, Jiangxi Institute of Red Soil and Germplasm Resources, Nanchang 331717, China)

**Abstract:** To investigate the regulatory mechanism of polyaspartic acid (PASP) on cadmium bioavailability in contaminated soils, and to determine its optimal operational conditions and the response patterns under varying cadmium concentration gradients. In this study, two typical Cd-contaminated agricultural soils were investigated using BCR sequential extraction, batch adsorption-desorption experiments, and kinetic modeling to assess the effects of PASP (molecular weight: 4 000–5 000 Da) on Cd speciation and adsorption-desorption behavior. The results demonstrated that the addition of PASP at  $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  significantly increased the content of bioavailable Cd ( $P < 0.05$ ) by facilitating the transformation of less active Cd fractions into the acid-soluble form, without inducing significant changes in soil pH. Freundlich isotherm analysis revealed that PASP reduced the Cd adsorption capacity of the soil, increased the desorption rate, and lowered the hysteresis index, collectively indicating that PASP inhibits Cd adsorption and promotes its desorption. According to the Elovich model, Cd adsorption proceeded through three distinct phases: rapid (0–1 h), slow (1–10 h), and equilibrium (>10 h). The most effective Cd activation occurred at pH 6 and temperatures between 15–25 °C, with background Cd levels exerting minimal influence. This study offers theoretical insights essential for advancing PASP-enhanced phytoremediation strategies for Cd-contaminated soils.

**Keywords:** polyaspartic acid (PASP); cadmium bioavailability; adsorption and desorption; soil remediation

收稿日期: 2025-07-04 录用日期: 2025-10-26

作者简介: 李艳梅(1987—), 女, 安徽芜湖人, 博士研究生, 工程师, 从事土壤重金属污染的治理与修复研究。E-mail: lymyqu@126.com

\*通信作者: 刘士余 E-mail: 397013250@qq.com

基金项目: 严格管控类耕地重金属镉污染修复关键技术研究项目(9131210804); 江西省自然科学基金项目(20212BAB215028)

Project supported: Key Technology Research of Cadmium Pollution Remediation in Strictly Controlled Cultivated Land (9131210804); Natural Science Foundation of Jiangxi Province, China(20212BAB215028)

研究表明,镉(Cd)是一种植物生长非必需且具有强迁移性、高生物毒性和难生物降解性的重金属元素,已成为导致全球作物减产和品质下降的主要环境因子之一<sup>[1]</sup>。镉易通过食物链在动植物及人体内富集,其中作物镉超量累积进入食物链是人体摄入镉的主要途径<sup>[2]</sup>。根据《2024年中国生态环境质量简况》以及2025年9月生态环境部发布的《重点控制的土壤有毒有害物质名录(第一批)》,重金属镉在我国农用地重金属污染防治体系中,依然被置于最优先、最突出的位置进行管控。据统计,我国农田土壤镉污染涉及11个省25个地区<sup>[3]</sup>,其中由采矿冶炼<sup>[4]</sup>、大气沉降<sup>[5]</sup>、污水灌溉<sup>[6]</sup>以及化肥农药不合理施用等人为活动引发的土壤镉污染,因其生物有效性高且输入通量持续,对食物链安全构成显著威胁。因此,深入探究土壤中镉的生物有效性及其调控机制,对于制定有效的镉迁移转化控制策略、推进土壤镉污染修复治理具有至关重要的科学意义和实践价值。

聚天冬氨酸(Polyaspartic acid, PASP)是一种由天冬氨酸单体中的一NH<sub>2</sub>和—COOH缩水聚合而成的环保型大分子螯合剂,含有羧基与肽键等活性基团,常见 $\alpha$ 、 $\beta$ 两种构型(图1)。其羧基可与Cd<sup>2+</sup>配位形成稳定的水溶性络合物<sup>[7]</sup>,促进土壤固相镉释放进入液相,提升镉的生物有效性及植物吸收效率,因而在重金属污染土壤植物修复中潜力显著。作为肥料增效剂,PASP可提高植物生物量与氮素利用率<sup>[8]</sup>,间接增强对镉的富集能力。研究表明,PASP能促进黑麦草将镉由稳定态转化为弱酸可溶态与可还原态,提高提取效率<sup>[9]</sup>;相较于柠檬酸等低分子有机酸,PASP对玉米吸收镉的促进效果更优<sup>[10]</sup>。此外,PASP有助于将更多镉固定在细胞壁,缓解其对植物的毒害,并通过提高抗氧化酶活性增强植物对镉胁迫的抗逆性<sup>[11-12]</sup>。与难降解的乙二胺四乙酸(EDTA)等不同,PASP可被微生物降解为氨、二氧化碳与水,环境相容性良好。在兼顾修复效率与土壤健康的植物修复策略下<sup>[13]</sup>,

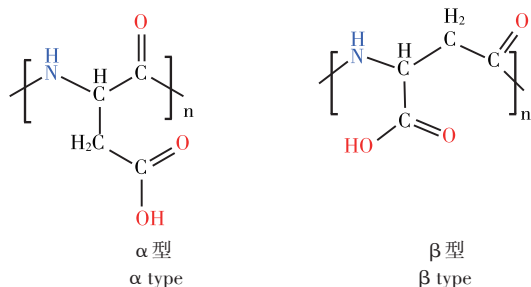


图1 聚天冬氨酸的分子结构<sup>[8]</sup>

Figure 1 Molecular structure of polyaspartic acid<sup>[8]</sup>

PASP等可降解螯合剂符合绿色修复理念,是螯合诱导植物提取修复技术未来发展的必然趋势。

土壤重金属的活化是调控金属在土壤-植物系统中迁移和提高植物修复效率的关键因素,而土壤中镉的环境行为及其生物有效性主要受其在固液界面吸附-解吸过程的调控<sup>[14]</sup>。然而,目前关于PASP对土壤镉生物有效性的影响,特别是其在固-液界面中的分配行为、作用机制及关键影响因素等方面,仍缺乏系统性的研究<sup>[15]</sup>。为此,本研究基于不同污染程度的镉污染土壤,系统探讨了在不同剂量、环境温度及pH条件下,PASP对土壤镉吸附行为和形态分布的影响,旨在阐明PASP作用下镉在土壤固相与液相之间的分配机制,从而为调控镉的生物有效性提供理论依据,这对科学评估PASP应用于螯合诱导植物提取修复镉污染土壤的潜力与可行性具有不可或缺的理论支撑作用,并可为进一步发展基于螯合剂的镉污染土壤精准修复技术提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

供试土壤选取未添加外源镉的轻度、重度两种镉污染水平的耕地原土,分别于2024年6月取自江西省新余市分宜县(28°01'26"N, 114°49'48"E)、萍乡市湘东区(27°39'32"N, 113°42'25"E)的耕地土壤表层(0~20 cm),采用梅花形布点法采集10个点后通过四分法缩分至2 kg,将土壤中石块、动植物残骸剔除后置于阴凉通风处,风干后过100目筛,保存至封口塑料袋中备用。两种土壤的具体理化性质见表1。PASP(分析纯,≥99%)购于合肥博美生物科技有限责任公司,分子量为4 000~5 000 Da。

### 1.2 试验设计

#### 1.2.1 不同剂量PASP对土壤镉生物有效性的影响

分别准确称取风干后过100目筛的重度、轻度两种镉污染土壤200.00 g置于一系列500 mL塑料碗中,在常温下放置一周后<sup>[16]</sup>,依次加入0(对照)、5、10、20 mg·kg<sup>-1</sup>的PASP(配制成溶液),充分混合均匀。随后置于25℃智能恒温培养箱(ZWYR-C2401,上海智城)中进行覆膜土壤培养试验,水分保持在田间持水量的70%。每隔3 d,采用称质量法向所有样品中补充去离子水至初始质量。在培养的第15天和第45天进行破坏性取样,样品自然风干后用于测定土壤有效态镉含量和pH值,并选取第15天的土样进行形态分析。每个处理设4次重复。

表1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of test soil

指标 Index	重度镉污染耕地 土壤(萍乡) High-Cd soil (Pingxiang City)	轻度镉污染耕地 土壤(新余) Low-Cd soil (Xinyu City)
pH	6.44±0.02	7.13±0.01
有效态镉含量/(mg·kg <sup>-1</sup> )	3.16±0.14	0.12±0.03
总镉含量/(mg·kg <sup>-1</sup> )	19.66±0.18	0.90±0.16
阳离子交换量/(cmol·kg <sup>-1</sup> )	10.40±0.12	11.21±0.19
有机质含量/(g·kg <sup>-1</sup> )	43.00±0.24	36.61±0.33
总有机碳含量/%	1.81±0.12	2.73±0.14
黏土含量/%	23.4±0.2	22.3±0.3
土壤质地	粉(砂)质壤黏土	粉(砂)质壤黏土

### 1.2.2 吸附等温线试验

依据《化学品 批平衡法检测 吸附/解吸附试验》(GB/T 21851—2008)方法,配制以 0.01 mol·L<sup>-1</sup> 硝酸钠溶液为背景溶液的硝酸镉溶液[Cd(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·4H<sub>2</sub>O, AR],其 Cd<sup>2+</sup> 浓度依次为 5、10、20、30、40、50、60 mg·L<sup>-1</sup> (溶液 pH 值调至土壤本身 pH 值)。准确称取两种不同镉污染水平土壤各 1.000 g,于经酸泡、去离子水洗净的 50 mL 塑料离心管中,再加入含有 PASP 的 20 mL 不同浓度 Cd<sup>2+</sup> 的系列溶液,使土壤中 PASP 含量统一为 10 mg·kg<sup>-1</sup>,封盖。每个处理重复 3 次,且每个 Cd<sup>2+</sup> 浓度组都需要做对照。将上述样品置于 25 °C 恒温振荡器中间歇振荡(200 r·min<sup>-1</sup>) 24 h,以 5 000 r·min<sup>-1</sup> 离心 30 min,上清液过 0.45 μm 滤膜后冷藏保存待测。按照公式(1)计算重金属镉的吸附量:

$$Q_e = (C_0 - C_e)V/m \quad (1)$$

式中:  $Q_e$  为吸附平衡时吸附 Cd<sup>2+</sup> 的量, mg·kg<sup>-1</sup>;  $C_0$  为溶液中 Cd<sup>2+</sup> 的初始浓度, mg·L<sup>-1</sup>;  $C_e$  为溶液中 Cd<sup>2+</sup> 的平衡浓度, mg·L<sup>-1</sup>;  $V$  为平衡溶液的体积, mL;  $m$  为土壤质量, g。

吸附试验数据采用 Freundlich 模型[公式(2)]和 Langmuir 模型[公式(3)]对吸附等温线进行拟合。

$$Q_e = K_F C_e^{1/n} \quad (2)$$

$$Q_e = (Q_m K_L C_e) / (1 + K_L C_e) \quad (3)$$

式中:  $Q_e$  为吸附平衡时吸附 Cd<sup>2+</sup> 的量, mg·kg<sup>-1</sup>;  $Q_m$  为最大吸附量, mg·kg<sup>-1</sup>;  $K_F$ 、 $K_L$ 、 $n$  为吸附常数。

解吸试验:上述吸附试验结束后,在离心后的土壤中加入 20 mL 含有 PASP 的 0.01 mol·L<sup>-1</sup> 硝酸钠溶液作为解吸剂,25 °C 恒温间歇振荡 24 h,离心过滤后取上清液保存待测。解吸试验进行 3 次,合并 3 次解吸液测得的镉含量即为解吸镉的量。

### 1.2.3 吸附动力学试验

配制 30 mg·L<sup>-1</sup> Cd<sup>2+</sup> 溶液,以 0.01 mol·L<sup>-1</sup> 硝酸钠溶液为背景溶液。准确称取两种不同镉污染水平的试验土壤各 5.000 g,置于一系列 250 mL 锥形瓶中,向每个瓶中加入用 30 mg·L<sup>-1</sup> 硝酸镉溶液配制的 PASP 溶液,使土壤中 PASP 含量统一为 10 mg·kg<sup>-1</sup>。将上述锥形瓶置于 25 °C 恒温振荡器中,以 200 r·min<sup>-1</sup> 连续振荡,分别在 10、30、60、120、240、360、600、1 440、2 880 min 时间点取 10 mL。样品以 5 000 r·min<sup>-1</sup> 离心 30 min,并将上清液通过 0.45 μm 滤膜过滤。同时进行不含 PASP 的对照试验。采用准一级动力学模型[公式(4)]、准二级动力学模型[公式(5)]、Elovich 模型[公式(6)]、内扩散模型[公式(7)]和双常数模型[公式(8)]拟合吸附过程。

$$\ln(1 - Q_t/Q_m) = A - Bt \quad (4)$$

$$Q_t = t/(At + B) \quad (5)$$

$$Q_t = A + B \ln t \quad (6)$$

$$Q_t/Q_m = A + B\sqrt{t} \quad (7)$$

$$\ln Q_t = A + B \ln t \quad (8)$$

式中:  $t$  表示时间, min;  $Q_t$  为  $t$  时刻吸附 Cd<sup>2+</sup> 的量, mg·kg<sup>-1</sup>;  $Q_m$  为最大吸附量, mg·kg<sup>-1</sup>;  $A$ 、 $B$  为模型参数。

### 1.2.4 不同 pH 的影响

配制以 0.01 mol·L<sup>-1</sup> 硝酸钠溶液为背景溶液的 PASP 溶液。用 0.1 mol·L<sup>-1</sup> HNO<sub>3</sub> 和 0.1 mol·L<sup>-1</sup> NaOH 溶液将溶液 pH 值分别调节至 3、4、5、6、7、8、9 (各 ± 0.01) (Cd 在高 pH 值下易发生水解,影响结果)。准确称取两种不同镉污染水平的试验土壤各 1.000 g 放入 50 mL 离心管中,分别向离心管中加入上述 PASP 溶液各 20 mL,对应土壤中 PASP 含量统一为 10 mg·kg<sup>-1</sup>,封盖。将样品置于 25 °C 恒温振荡器中间歇振荡(200 r·min<sup>-1</sup>) 24 h,以 5 000 r·min<sup>-1</sup> 离心 30 min,上清液过 0.45 μm 滤膜后测定滤液中的镉含量。

### 1.2.5 不同温度的影响

配制以 0.01 mol·L<sup>-1</sup> 硝酸钠溶液为背景溶液的 PASP 溶液。准确称取重度、轻度两种镉污染水平的试验土壤各 1.000 g 放入 50 mL 离心管中,分别向离心管中加入上述 PASP 溶液各 20 mL,对应土壤中 PASP 含量统一为 10 mg·kg<sup>-1</sup>,封盖。将样品分别置于 15、25、35、45 °C 的恒温振荡器中间歇振荡(200 r·min<sup>-1</sup>) 24 h,以 5 000 r·min<sup>-1</sup> 离心 30 min,上清液过 0.45 μm 滤膜后保存待测。

### 1.3 测定指标和方法

土壤中有效态镉含量的测定依据《土壤 8 种有

有效态元素的测定 二乙烯三胺五乙酸浸提-电感耦合等离子体发射光谱法》(HJ 804—2016),采用DTPA-CaCl<sub>2</sub>-TEA浸提法处理后,利用ICP-OES[iCAP PRO,赛默飞世尔科技(中国)有限公司]进行测定。

土壤各形态镉采用改进的BCR连续浸提法<sup>[17]</sup>处理,之后使用石墨炉原子吸收光谱仪(PinAAcle 900T,新加坡PerkinElmer公司)进行测定。

在吸附解吸试验中,上清液中的镉含量采用原子吸收光谱仪(SP-3530AA,上海光谱仪器有限公司)进行测定。

土壤pH值使用pH计(913,瑞士万通Metrohm),参照《土壤pH值的测定 电位法》(HJ 962—2018)进行测定。

#### 1.4 数据处理

试验数据采用SPSS 29.0.1.0软件中的单因素ANOVA检验模块进行方差分析和显著性检验,采用事后Duncan多重比较,显著性水平为 $\alpha=0.05$ 。Freundlich、Langmuir、Elovich、内扩散和双常数模型均采用OriginPro 2024软件进行运算和参数模拟。

## 2 结果与分析

### 2.1 PASP处理对土壤有效态镉含量的影响

表2呈现了不同剂量PASP处理下高、低镉污染土壤在第15天、第45天时有有效态镉含量的动态变化情况。在第15天,相较于对照组,PASP的添加显著提高了两种污染水平土壤中的有效态镉含量( $P<0.05$ )。高镉污染土壤中,当PASP施用量为5、10 mg·

表2 不同剂量PASP处理对两种镉污染水平土壤有效态镉含量的影响(mg·kg<sup>-1</sup>)

Table 2 Effects of different concentrations of PASP on available Cd content in the two Cd-gradient soils(mg·kg<sup>-1</sup>)

时间 Time	PASP添加量 Amount of PASP (mg·kg <sup>-1</sup> )	有效态镉含量DTPA-Cd	
		高镉土壤 High-Cd soil	低镉土壤 Low-Cd soil
第15天 Day 15	0	3.156±0.091c	0.121±0.004c
	5	3.378±0.055b	0.128±0.002b
	10	5.298±0.120a	0.185±0.011a
第45天 Day 45	0	3.293±0.065b	0.124±0.003a
	5	3.327±0.113b	0.122±0.004a
	10	3.949±0.047a	0.136±0.012a
	20	3.214±0.066b	0.122±0.004a

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著 $P<0.05$ 。

Note: Different lowercase letters in a column indicate significant differences among treatments at  $P<0.05$ .

kg<sup>-1</sup>和20 mg·kg<sup>-1</sup>时,有效态镉含量较对照组分别显著增加了7.03%、67.87%和6.84%;低镉污染土壤中,相应处理组的增幅则分别为5.79%、52.89%和11.57%。至第45天时,高镉污染土壤中仅10 mg·kg<sup>-1</sup> PASP处理组的有效态镉含量仍显著高于对照组(增幅约20%, $P<0.05$ ),而低镉污染土壤中各处理组与对照组间均无显著差异( $P>0.05$ )。基于有效态镉含量的最大化提升效果,本研究将10 mg·kg<sup>-1</sup>确定为PASP活化土壤镉的最优施用量阈值。

### 2.2 PASP处理对土壤镉形态分布和pH的影响

采用改进的BCR连续提取法分析了在第15天两种镉污染水平土壤中镉的形态分布。结果(图2)表明,在未处理(CK)的高、低镉污染土壤中,弱酸提取态(F<sub>1</sub>)与可还原态(F<sub>2</sub>)镉为主要赋存形态。施加10 mg·kg<sup>-1</sup> PASP后,F<sub>1</sub>占比显著增加。其中,高镉土壤和低镉土壤中F<sub>1</sub>占比分别较CK组增加了29.38个百分点和18.06个百分点;F<sub>2</sub>和残渣态(F<sub>4</sub>)占比显著降低。高镉污染土壤中,F<sub>2</sub>占比下降了22.39个百分点,F<sub>4</sub>占比大幅降至CK的14.29%;低镉污染土壤中,F<sub>2</sub>占比下降了14.38个百分点,F<sub>4</sub>占比同样约降至CK的14.29%。可氧化态(F<sub>3</sub>)占比在低镉土壤中呈小幅下降趋势。

图3呈现了在第15天和第45天时,CK组与10 mg·kg<sup>-1</sup>剂量的PASP处理下高、低镉污染土壤pH的动态变化。可见在高镉污染土壤中,PASP处理组在整个45 d内的pH值与CK组相比无显著差异( $P>0.05$ )。在低镉污染土壤中,PASP处理组的pH值显著低于CK组,但差异幅度小于0.2,这种差异可能与PASP溶液本身pH呈弱酸性(pH 6~7)有关。

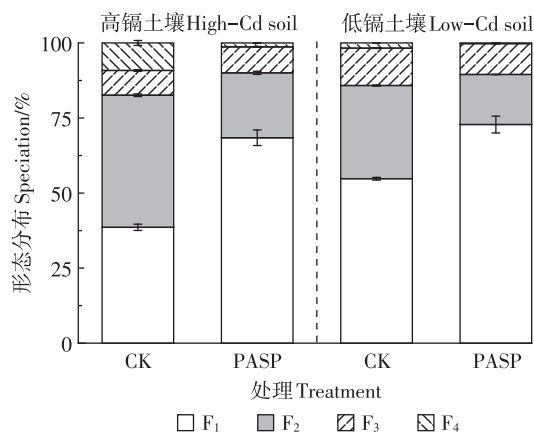


图2 PASP处理对两种镉污染水平土壤镉形态分布的影响  
Figure 2 Effects of PASP on the distribution of cadmium speciation in the two Cd-gradient soils

上述形态转化和pH动态监测结果表明,PASP处理( $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )显著促进了土壤中活性较低的镉形态,特别是 $F_2$ 和 $F_4$ 向高生物有效性的 $F_1$ 转化,但同时不会对土壤本底pH产生大的扰动。这一形态分布的变化与2.1节中有效态镉含量显著增加的结果高度一致,共同揭示了PASP活化土壤镉的关键机制。

### 2.3 PASP处理对土壤镉等温吸附特征的影响

PASP处理对高、低镉污染水平土壤镉吸附行为的影响见图4。首先,两种污染土壤的镉吸附量均随平衡溶液中镉浓度的升高而增加,并逐渐趋于吸附饱和和状态;其次,在相同外源镉浓度条件下,高镉污染土壤的吸附量增幅略低于低镉污染土壤;第三,在所有测试的外源镉浓度水平下,相较于CK组,PASP处理均降低了高、低镉污染水平土壤的镉吸附量,表明PASP可有效抑制土壤固相对镉的吸附作用,最大降幅分别达11.1%、17.0%。

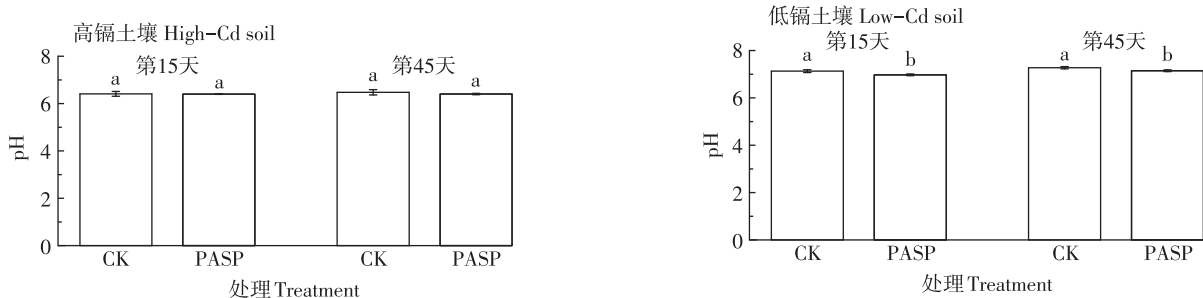
为深入剖析PASP对土壤镉吸附特征的影响机制,本研究采用Freundlich和Langmuir模型对吸附数据进行了拟合。拟合结果(表3)表明,两种模型均能有效表征吸附过程( $R^2 > 0.9$ )。相较而言, Freundlich

模型展现出更小的残差均方(MSE)和更高的拟合优度( $R^2$ ),表明其更适用于表征PASP-土壤-镉三元体系的多层吸附特征。基于Freundlich模型拟合参数的分析发现:PASP处理同时降低了高、低镉土壤固相对镉的吸附容量( $K_f$ ),证实PASP能够促进土壤固相镉更多向土壤溶液相的释放迁移。

### 2.4 PASP处理对土壤镉解吸特征及滞后效应的影响

图5为PASP处理下高、低镉污染水平土壤的镉解吸等温线。两种土壤的等温线均呈现显著滞后环(Hysteresis loop),直观表明了吸附-解吸过程存在不可逆特性,符合Freundlich模型的典型特征。结果表明:随吸附量增加,两种污染土壤的镉解吸量均呈上升趋势,但解吸量显著低于吸附水平。在PASP作用下,高、低镉污染土壤对镉的解吸量均呈增加趋势,表明土壤中的非专性吸附态镉比例有所提升。

为定量评估滞后程度,引入滞后指数(Hysteresis index, HI)进行分析。结果(表4)表明:随液相镉浓度升高,两种土壤HI值均呈浓度依赖性上升趋势,表明解吸量低于吸附量,两种土壤中镉的吸附过程具有一定的不可逆性。且在不同初始镉浓度下,低镉土壤的



不同小写字母表示处理间差异显著( $P < 0.05$ )。 Different lowercase letters indicate significant differences among treatments at  $P < 0.05$ .

图3 PASP处理对两种镉污染水平土壤pH值的影响

Figure 3 Effects of PASP on the pH value in the two Cd-gradient soils

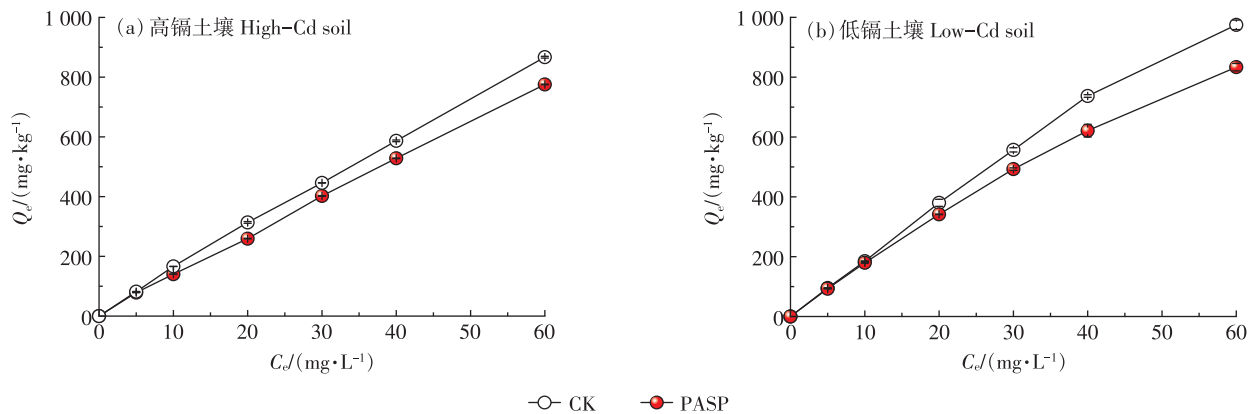


图4 PASP处理对两种镉污染水平土壤镉等温吸附线的影响

Figure 4 Effects of PASP on Cd adsorption isothermal curves in the two Cd-gradient soils

表3 两种土壤镉等温吸附模型的拟合参数

Table 3 Adsorption isotherm parameters of Cd in the two Cd-gradient soils

土壤类型 Soil type	处理 Treatment	Freundlich				Langmuir			
		$R^2$	$K_F/(mg^{1-1/n} \cdot L^{1/n} \cdot kg^{-1})$	$1/n$	$MSE$	$R^2$	$Q_m/(mg \cdot kg^{-1})$	$K_L/(L \cdot mg^{-1})$	$MSE$
高镉土壤 High-Cd soil	CK	0.998 4	20.538 1	0.995 1	53.35	0.994 9	4 664.76	0.003 8	1 121.0
	PASP	0.999 2	17.254 9	0.891 2	28.76	0.997 5	3 196.30	0.002 8	346.2
低镉土壤 Low-Cd soil	CK	0.997 6	31.014 9	0.833 3	59.60	0.993 5	5 445.78	0.006 0	95.3
	PASP	0.999 7	29.402 8	0.750 3	38.90	0.993 2	3 895.18	0.004 2	238.0

注: $R^2$ 表示拟合优度, $K_F$ 、 $K_L$ 、 $n$ 为吸附常数, $MSE$ 表示残差均方。

Note: $R^2$  represents the goodness of fit,  $K_F$ ,  $K_L$ , and  $n$  are adsorption constants, and  $MSE$  represents the residual mean square.

$HI$ 值高于对应的高镉土壤,说明低镉土壤镉吸附的不可逆性更强。在PASP处理下,高、低镉土壤的 $HI$ 值均低于CK,但最大降幅仅出现在镉初始浓度为 $50 mg \cdot L^{-1}$ 时,降幅分别仅为8.3%、11.3%。这表明PASP能够降低解吸能垒,使土壤对镉的解吸变得更容易,从而增强吸附-解吸过程的可逆性。

进一步分析解吸率(表5)表明,随初始镉浓度升高,两种土壤的解吸率均缓慢增加,且高镉污染土壤的镉解吸率(3.59%~32.88%)显著高于低镉污染土壤(0.05%~5.52%),反映出高镉土壤中镉的易解吸性更强,活化潜力更高;PASP处理同时提高了两种土壤的镉解吸率。综上,PASP通过降低 $HI$ 和提高镉解吸率,来提升土壤中非专性吸附态镉的比例,进而提升土壤镉的生物有效性。

## 2.5 PASP处理对土壤镉吸附动力学特征的影响

为探究PASP对土壤镉吸附动力学过程的影响,本研究运用准一级、准二级、Elovich、颗粒内扩散及双常数动力学模型对试验数据进行拟合分析。模型拟合优度以相关系数( $r$ )、决定系数( $R^2$ )和残差均方( $MSE$ )作为评价指标进行综合评估, $r$ 和 $R^2$ 越大、 $MSE$ 越小,拟合效果越好。拟合结果(表6)表明:对于高

表4 不同镉溶液浓度下镉吸附-解吸的滞后指数

Table 4 Hysteretic index of Cd adsorption-desorption at various equilibrium concentrations in two soils

初始镉浓度/ Initial Cd concentration/ ( $mg \cdot L^{-1}$ )	高镉土壤 High-Cd soil		低镉土壤 Low-Cd soil	
	CK	PASP	CK	PASP
5	0.872 3	0.766 7	1.213 5	1.199 5
10	1.090 1	1.002 5	1.362 4	1.317 3
20	1.107 1	1.068 1	1.368 9	1.393 6
30	1.152 5	1.124 7	1.474 2	1.425 9
40	1.379 0	1.269 3	1.512 6	1.432 6
50	1.414 4	1.296 6	2.189 1	1.942 6
60	1.690 3	1.655 7	2.432 8	2.290 1

镉土壤和低镉土壤,Elovich模型均表现出最优的拟合效果( $R^2$ 最高, $MSE$ 最小)。模型拟合度优先排序如下:高镉土壤中为Elovich>准二级>准一级>颗粒内扩散>双常数;低镉土壤中为Elovich>颗粒内扩散>准二级>双常数>准一级。综上,Elovich模型可最有效地表征PASP作用下土壤镉的吸附动力学特征,即该吸附过程主要受非均相扩散控制机制主导。

图6为PASP处理下两种土壤的典型镉吸附动力学曲线。吸附过程呈现明显的三阶段特征:快速吸附

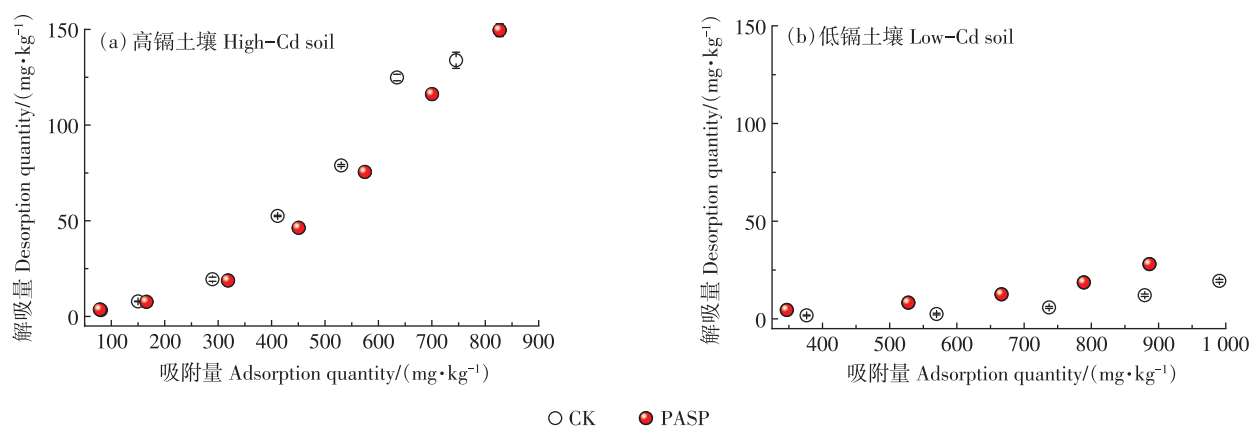


图5 两种镉污染水平土壤镉吸附量与解吸量之间的关系

Figure 5 Relationship between Cd adsorption amount and desorption amount in the two Cd-gradient soils

阶段(0~1 h),吸附量在初始1 h内急剧增加。此阶段,高镉污染土壤和低镉污染土壤的吸附量分别达到其最大吸附量的37.1%和54.2%,表明低镉污染土壤的初始吸附速率高于高镉污染土壤;慢速吸附阶段(1~10 h),吸附速率降低,吸附量随时间缓慢增加;最终趋于吸附平衡阶段(>10 h)。

综上所述,吸附动力学研究表明,在PASP存在条件下,土壤对镉的吸附行为符合Elovich模型,表明该过程主要由非均相扩散机制主导,并显著受固-液相界面过程调控。其吸附动态呈现快速吸附、缓慢扩散及最终平衡的三阶段特征。

## 2.6 pH对PASP调控土壤镉吸附的影响

图7为不同pH条件下PASP处理对高、低镉污染水平土壤镉吸附量的影响,可见pH变化对高镉污染土壤镉吸附量的影响显著强于对低镉污染土壤。在高镉污染土壤中,于酸性条件(pH 3~5)下,镉吸附量

随pH升高而增加,最大吸附量出现在pH 6。在中性至碱性范围(pH 7~9)下,镉吸附量高于酸性范围,但显著低于其在pH 6时的峰值。在低镉污染土壤中,pH变化对镉吸附量的影响趋势较为平缓,最大吸附量亦出现于pH 6时。值得注意的是,当pH为7时,高、低镉污染土壤的镉吸附量均出现显著下降。综上所述表明,PASP在pH为6时对两种镉污染水平土壤均表现出最优的镉吸附效果,且高镉土壤对pH变化更为敏感。

## 2.7 温度对PASP调控土壤镉吸附的影响

图8为不同温度条件下PASP处理对土壤镉吸附量的影响。结果表明:温度变化对低镉污染土壤镉吸附量的影响大于高镉污染土壤。对于高、低镉污染土壤,15~25℃温度范围均表现出最高的镉吸附量,表明此温度区间是PASP作用的最适温度范围。当温度升至35~45℃时,两种土壤的镉吸附量

表5 两种土壤镉的吸附量和解吸率

Table 5 Adsorption amount and desorption ratio of Cd in two soils

初始镉浓度 Initial Cd concentration/ (mg·L <sup>-1</sup> )	高镉土壤 High-Cd soil				低镉土壤 Low-Cd soil			
	CK		PASP		CK		PASP	
	吸附量 Adsorption quantity/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	解吸率 Desorption ratio/%	吸附量 Adsorption quantity/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	解吸率 Desorption ratio/%	吸附量 Adsorption quantity/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	解吸率 Desorption ratio/%	吸附量 Adsorption quantity/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	解吸率 Desorption ratio/%
5	81.85	3.59	78.72	4.70	100.01	0.05	97.84	0.08
10	166.27	4.97	140.33	5.45	200.86	0.08	197.40	0.16
20	313.60	6.18	295.27	6.65	380.00	1.15	341.40	1.75
30	445.87	7.56	402.20	7.93	557.00	1.22	512.80	1.86
40	586.80	14.27	528.23	15.55	737.20	1.56	592.17	2.32
50	730.41	27.65	654.84	29.23	855.00	2.00	697.20	2.37
60	866.93	29.60	775.42	32.88	975.00	2.14	833.50	5.52

表6 镉污染土壤吸附动力学模型拟合结果

Table 6 Kinetics parameters of cadmium adsorption in high- and low-Cd soils

土壤类型 Soil type	参数 Parameter	准一级模型 Pseudo-first-order	准二级模型 Pseudo-second-order	Elovich模型 Elovich model	颗粒内扩散模型 Intraparticle diffusion	双常数模型 Two-constant
高镉土壤 High-Cd soil	A	16.885 9	17.735 1	0.428 4	1.165 0	0.170 5
	B	0.009 9	0.000 8	0.312 5	0.567 0	0.358 9
	r	0.964 3	0.976 3	0.988 6	0.956 1	0.940 5
	R <sup>2</sup>	0.957 2	0.971 6	0.986 3	0.941 5	0.928 6
	MSE	527.8	350.1	107.2	133.6	0.215 1
低镉土壤 Low-Cd soil	A	16.793 0	17.928 3	0.699 3	2.953 7	0.986 8
	B	0.007 6	0.000 6	0.347 4	0.598 1	0.251 9
	r	0.941 4	0.971 8	0.993 8	0.976 6	0.970 2
	R <sup>2</sup>	0.929 6	0.966 1	0.992 5	0.968 7	0.964 2
	MSE	181.0	87.1	19.2	61.8	0.051 5

注:表中A、B为模型参数,r表示相关系数,R<sup>2</sup>表示拟合优度,MSE表示残差均方。

Note:A, B are model parameters, r represents the correlation coefficient, R<sup>2</sup> represents the goodness of fit, and MSE represents the residual mean square.

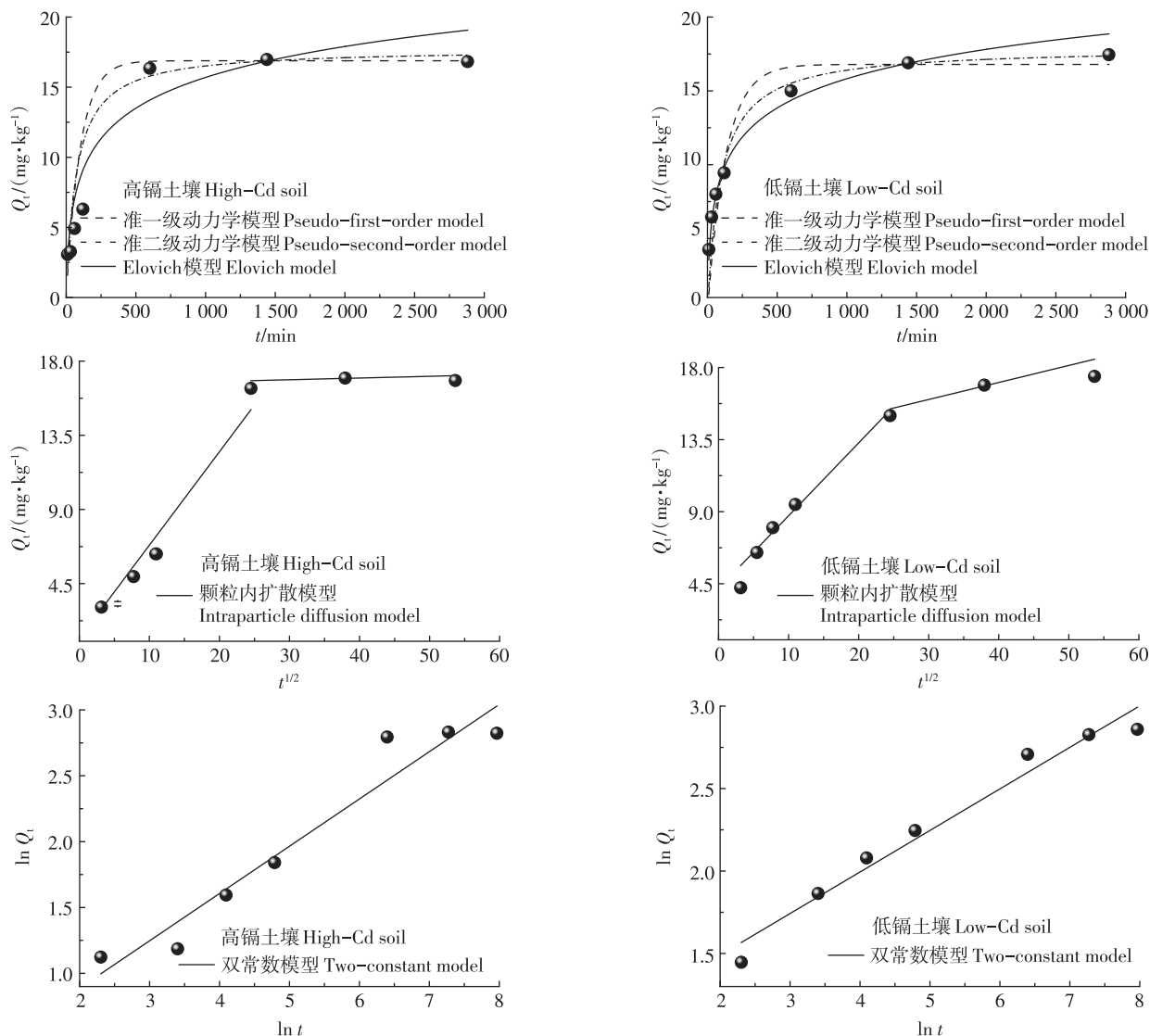


图6 两种镉污染水平土壤镉的吸附动力学曲线

Figure 6 Adsorption kinetic curves of Cd in the two Cd-gradient soils

极低。在 25~35 °C 范围内, 镉吸附量呈现下降趋势, 且该下降趋势在低镉土壤中更为明显。由此可见, PASP 作用的最适宜温度范围在 15~25 °C 区间, 温度 >25 °C 显著削弱了 PASP 的作用效果, 且低镉污染土壤对高温更为敏感。

### 3 讨论

#### 3.1 PASP 对土壤镉生物有效性的影响

土壤重金属的活化是调控其在土壤-植物系统中迁移并提升植物修复效率的核心环节, 其中镉的赋存形态与迁移转化过程直接决定了其生物有效性<sup>[18]</sup>。PASP 作为一种水溶性螯合物<sup>[19]</sup>, 其对土壤镉的活化效应主要源于其对镉赋存形态的重分布作用: 作为生物有效态的弱酸提取态镉的占比升高, 而作为稳定态

的可还原态和残渣态镉的占比降低。该现象表明在 PASP 作用下, 土壤固相固定的镉向土壤液相释放转移, 显著提升了土壤中镉的生物有效性, 从而易于植物吸收。本研究与 He 等<sup>[20]</sup>、Wang 等<sup>[9]</sup>的研究结论基本一致, 认为 PASP 具有促使土壤中稳定态镉向生物可利用态镉转化的潜力。然而 Wu 等<sup>[21]</sup>报道 PASP 对土壤有效态镉含量略有增加, 但未达显著性水平, 这可能源于 PASP 的分子量<sup>[8]</sup>、施用剂量<sup>[21]</sup>及土壤性质的差异<sup>[22-23]</sup>。值得注意的是, 与常见的低分子有机酸类活化剂不同, PASP 不会显著扰动土壤本底 pH, 这凸显出其作为环境友好型螯合剂的核心优势——在不显著扰动土壤固有酸碱平衡的前提下实现土壤中重金属的有效活化。

本研究中, 在第 15 天时, 10 mg·kg<sup>-1</sup> (分子量 4 000~

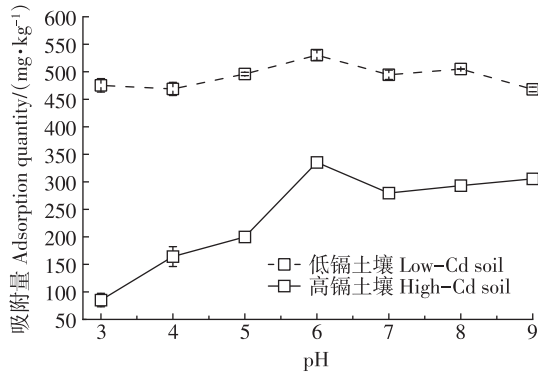


图7 不同pH下PASP对两种镉污染水平土壤吸附镉的影响  
Figure 7 Effects of PASP on the adsorption of Cd in the two Cd-gradient soils under different pH values

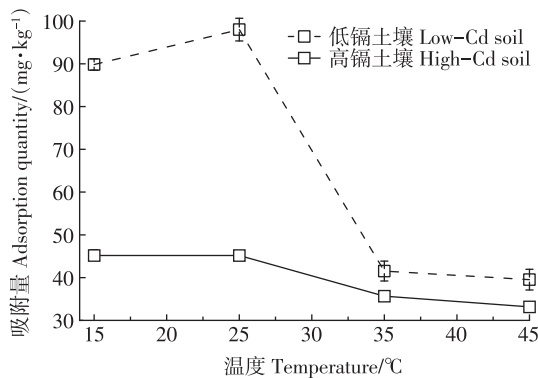


图8 不同温度下PASP对两种镉污染水平土壤吸附镉的影响  
Figure 8 Effects of PASP on the adsorption of Cd in the two Cd-gradient soils under different temperatures

5 000 Da)的PASP处理显著提升了高镉(19.66 mg·kg<sup>-1</sup>)与低镉(0.90 mg·kg<sup>-1</sup>)耕地原土的有效态镉含量,较对照组分别提高了67.87%和52.89%( $P < 0.05$ ),而其他剂量(5、20 mg·kg<sup>-1</sup>)对高、低镉污染水平土壤中有效态含量的影响均不显著。究其原因,低剂量(5 mg·kg<sup>-1</sup>)下,PASP分子提供的羧基官能团数量有限,这些有限的螯合位点可能首先被土壤中更活跃、含量更高的竞争性阳离子(如Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、Fe<sup>2+</sup>、Fe<sup>3+</sup>等)所占据,这些阳离子的含量通常远高于Cd<sup>2+</sup>(即使在高镉土壤中),且活性较高,更容易与螯合剂结合,从而占据了有限的螯合位点<sup>[24]</sup>,导致低剂量的PASP无法提供足够多的“空闲”位点去有效竞争并螯合被土壤颗粒牢牢吸附的Cd<sup>2+</sup>,因此活化效果不显著。而在高剂量(20 mg·kg<sup>-1</sup>)下,过量的PASP长分子链可以通过其官能团同时吸附在多个土壤胶体颗粒上,形成较大的团聚体,可能引发镉的再固定,反而抵消了其活化效果<sup>[25]</sup>。这表明,PASP对镉的活化作用存在一个最优剂量窗口,该剂量下PASP可提供足量官能团有

效螯合镉,形成稳定的可溶络合物。如Kameda等<sup>[26]</sup>探索使用EDTA从土壤中提取铅,发现铅的提取率随着EDTA/铅摩尔比的增加而上升,直至达到一个平稳状态。值得注意的是,PASP对高镉土壤的镉活化效果略优于低镉土壤,这可能与低镉土壤具有更高的镉吸附能力( $K_F$ ,表3)和更高的阳离子交换量(表1)有关,一定程度上增加了PASP对低镉土壤的活化难度<sup>[27-28]</sup>。

### 3.2 PASP对土壤镉吸附解吸的影响

土壤中镉的环境行为与生物有效性主要受其在固液界面吸附-解吸过程的控制<sup>[29]</sup>。土壤对镉的吸附机制主要分为专性吸附和非专性吸附,二者共同影响镉在土壤中的环境行为和潜在生态风险。专性吸附是指土壤液相中的镉离子发生化学反应而吸附在固相表面,多发生在土壤胶体双电层的内层中,吸附作用比较强;而非专性吸附一般由静电引力对镉离子产生吸附反应,多发生在扩散层,吸附作用比较弱,与土壤中镉的生物有效性密切相关。

本研究认为,相较于Langmuir模型,Freundlich模型展现出更小的残差和更高的拟合优度,表明其更适用于表征PASP-土壤-镉三元体系的多层吸附特征。Freundlich模型中, $K_F$ 值表征土壤的吸附容量, $K_F$ 越小,吸附能力越弱。基于Freundlich模型拟合参数的分析表明,PASP处理显著降低了高、低镉污染土壤的 $K_F$ ,这一现象从热力学角度证实,PASP能有效降低土壤胶体表面与Cd<sup>2+</sup>之间的结合能级<sup>[26]</sup>,从而抑制土壤固相对镉的固定作用。然而,该抑制作用在高镉、低镉污染土壤中的最大降幅均未超过20%,相较于EDTA、DTPA等传统螯合剂,其抑制能力较弱<sup>[30]</sup>。值得注意的是,通过比较高镉、低镉两种土壤的 $K_F$ 发现,高镉污染土壤CK组与PASP处理组的 $K_F$ 均低于低镉污染土壤。这表明低镉污染土壤可能拥有更多的吸附位点,其结合镉的能力更强,从而有效降低了镉在土壤液相中的浓度,同时降低了镉的溶解度和生物可利用性<sup>[31]</sup>。然而,这并不意味着活化效果一定差,因为活化是一个复杂的过程,需要根据具体的环境条件(有机质<sup>[32]</sup>、黏粒含量<sup>[33]</sup>、pH<sup>[34]</sup>)和修复目标来判断<sup>[35]</sup>。相较于准一级、准二级、颗粒内扩散和双常数动力学模型,Elovich模型在两种镉污染水平土壤中更能有效地描述PASP存在下土壤镉的吸附动力学特征,这与王金贵<sup>[36]</sup>、Wang等<sup>[37]</sup>的研究结论一致,表明该吸附过程涉及非均质表面的化学吸附主导机制。

从镉解吸动力学角度分析,土壤对镉解吸作为吸

附的逆过程,主要涉及非专性吸附态镉,其强度与土壤中镉的生物有效性密切相关<sup>[38]</sup>。两种不同污染土壤的镉解吸量均随吸附量增加而升高,但解吸量显著低于对应的吸附水平,在低镉污染土壤中尤为明显,这表明体系存在典型的吸附-解吸不可逆性。滞后指数可以用来评估重金属在土壤中的吸附和解吸过程的可逆性,PASP干预后,两种镉污染水平土壤的滞后指数均呈现小幅下降(表4),这表明PASP通过缓慢降低解吸能垒以增强解吸的可逆性,并同步提高解吸率(表5)。该机制促使土壤中镉的非专性吸附比例增加,进而增强了镉的生物有效性,协同解释了PASP提升有效态镉含量的热力学机制<sup>[39]</sup>。但滞后指数降幅(<20%)、解吸率增幅未达到显著水平,这表明PASP促解吸能力总体较弱。

相较于高镉污染土壤,PASP处理下低镉污染土壤活化效果略弱,这可能归因于低镉污染土壤本身的一些特性<sup>[40]</sup>,比如具有更高的吸附能力(表3)、更高的滞后指数(表4)<sup>[41]</sup>和更低的解吸率(表5)。此外,pH、温度等环境因子对PASP调控土壤镉吸附的影响较大(图7和图8)<sup>[16,42]</sup>,而受土壤本底镉含量的影响相对有限。

## 4 结论

(1) 分子量为4 000~5 000 Da的PASP(10 mg·kg<sup>-1</sup>)显著促进了土壤中活性较低的镉形态,特别是可还原态和残渣态向高生物有效性的弱酸提取态的转化,从而提高了土壤镉的生物有效性,但不会对土壤本底pH产生大的扰动。

(2) Freundlich模型证实PASP可降低土壤对镉的吸附容量( $K_F$ ),增加非专性吸附态镉占比,表明PASP具有增强土壤镉生物有效性的潜力。

(3) Elovich模型为最优吸附动力学模型,揭示PASP作用下土壤镉的吸附是以非均相表面化学吸附主导。PASP对土壤镉吸附-解吸的调控效率主要受pH、温度及土壤自身的一些特性影响(如土壤吸附容量等),而土壤本底镉含量影响有限。其最佳作用条件为:pH 6、温度15~25℃。

### 参考文献:

- [1] ASLAM M M, OKAL E J, WASEEM M. Cadmium toxicity impacts plant growth and plant remediation strategies[J]. *Plant Growth Regulation*, 2022, 99(3):397-412.
- [2] 孙丽娟, 秦秦, 宋科, 等. 镉污染农田土壤修复技术及安全利用方法研究进展[J]. *生态环境学报*, 2018, 27(7):1377-1386. SUN L J, QIN Q, SONG K, et al. The remediation and safety utilization techniques for Cd contaminated farmland soil: a review[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2018, 27(7):1377-1386
- [3] 黄卫, 庄荣浩, 刘辉, 等. 农田土壤镉污染现状与治理方法研究进展[J]. *湖南师范大学自然科学学报*, 2022, 45(1):49-56. HUANG W, ZHUANG R H, LIU H, et al. Recent advances of the current situation and remediation methods of cadmium contamination in paddy soil[J]. *Journal of Natural Science of Hunan Normal University*, 2022, 45(1):49-56.
- [4] SUBAŠIĆ M, ŠAMEC D, SELOVIĆ A, et al. Phytoremediation of cadmium polluted soils: current status and approaches for enhancing [J]. *Soil Systems*, 2022, 6(1):3.
- [5] 刘进, 潘月鹏, 师华定. 华北地区农田土壤镉来源及大气沉降的贡献[J]. *农业环境科学学报*, 2022, 41(8):1698-1708. LIU J, PAN Y P, SHI H D. Atmospheric deposition as a dominant source of cadmium in agricultural soils of north China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(8):1698-1708.
- [6] 陈涛, 常庆瑞, 刘京. 长期污灌农田土壤Cd赋存形态及其有效性的空间变异研究[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(7):1322-1327. CHEN T, CHANG Q R, LIU J. Fractions and bioavailability spatial distribution of soil Cd under long-term sewage irrigation[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(7):1322-1327.
- [7] LIU T, CHEN H, TAN X, et al. Efficient removal of Hg<sup>2+</sup>, Cu<sup>2+</sup> and Cd<sup>2+</sup> from aqueous solutions with polyaspartic acid: influencing factors and mechanism analysis[J]. *Chemical Engineering Science*, 2024, 287:119726.
- [8] LIU T, YANG J H, WANG H Y, et al. Effects of molecular weight of polyaspartic acid on nitrogen use efficiency and crop yield[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2022, 102(15):7343-7352
- [9] WANG W W, XUE J C, ZHANG L P, et al. Extraction of heavy metals from copper tailings by ryegrass (*Lolium perenne* L.) with the assistance of degradable chelating agents[J]. *Scientific Reports*, 2024, 14:7663.
- [10] TAO R H, HU J Y, CAO C, et al. Effect of LMWOAs on maize remediation of cadmium and plumbum pollution in farmland[J]. *Sustainability*, 2022, 14(21):14580.
- [11] YAO S, ZHOU B, DUAN M, et al. Synergistic effects of *Trichoderma harzianum* and polyaspartic acid enhance cadmium phytoremediation via core microbiota and network stability in *Brassica juncea*[J]. *Environmental Chemistry and Ecotoxicology*, 2025, 7, 1227-1241.
- [12] WANG Y Y, LI S F, WANG X S, et al. Biochelator assisted phytoremediation for cadmium (Cd) pollution in paddy field[J]. *Sustainability*, 2021, 13(21):12170.
- [13] 周润惠. 不同修复方式对镉污染土壤氮、磷转化及土壤健康的影响[D]. 杭州:浙江大学, 2024. ZHOU R H. Effects of different remediation methods on nitrogen and phosphorus transformation and soil health of Cd contaminated soil[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2024.
- [14] MO X X, SIEBECKER M G, GOU W X, et al. A review of cadmium sorption mechanisms on soil mineral surfaces revealed from synchrotron-based X-ray absorption fine structure spectroscopy: implications for soil remediation[J]. *Pedosphere*, 2021, 31(1):11-27.
- [15] WANG H, ZHAO B Y, WANG L. Adsorption/desorption performance of Pb<sup>2+</sup> and Cd<sup>2+</sup> with super adsorption capacity of PASP/CMS hydrogel

- [15] [J]. *Water Science and Technology*, 2021, 84(1):43-54.
- [16] 朱园辰. 畜禽粪便堆肥衍生的溶解性有机质对黑土中重金属稳定性的影响及作用机制[D]. 哈尔滨:东北农业大学, 2023. ZHU Y C. Effect and mechanism of dissolved organic matter derived from livestock manure compost on heavy metal immobilization in black soil [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2023.
- [17] 胡德新, 武素茹, 刘跃勇, 等. 改进BCR法-电感耦合等离子体发射光谱法测定矿产品堆场土壤中镉砷铅的化学形态[J]. 岩矿测试, 2014, 33(3):369-373. HU D X, WU S R, LIU Y Y, et al. Determination of chemical species of cadmium, arsenic and lead in mineral yard soil by modified BCR and ICP-AES method[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2014, 33(3):369-373.
- [18] 官迪, 吴家梅, 谢运河, 等. 铁基硅盐对土壤环境镉砷赋存形态及转化影响[J]. 中国环境科学, 2022, 42(4):1803-1811. GUAN D, WU J M, XIE Y H, et al. Effects of iron-based silicon salts on fractions and transformation of cadmium and arsenic in soil environment[J]. *China Environmental Science*, 2022, 42(4):1803-1811.
- [19] ADELNIA H, SIROUS F, BLAKEY I, et al. Metal ion chelation of poly (aspartic acid) : from scale inhibition to therapeutic potentials[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 229: 974-993.
- [20] HE X M, ZHANG J, REN Y N, et al. Polyaspartate and liquid amino acid fertilizer are appropriate alternatives for promoting the phytoextraction of cadmium and lead in *Solanum nigrum* L. [J]. *Chemosphere*, 2019, 237:124483.
- [21] WU X W, TIAN H, LI L, et al. Polyaspartic acid alleviates cadmium toxicity in rapeseed leaves by affecting cadmium translocation and cell wall fixation of cadmium[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, 224:112685.
- [22] LIU Y W, ZHOU J J, SUN D L, et al. Polyaspartic acid assisted-phytoremediation of cadmium-contaminated farmland: phytoextraction efficiency, soil quality, and rhizosphere microbial community[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 862:160736.
- [23] LIU T, WEI J, YANG J H, et al. Polyaspartic acid facilitated rice production by reshaping soil microbiome[J]. *Applied Soil Ecology*, 2023, 191:105056.
- [24] CHEN H B, SHU F F, YANG S, et al. Competitive inhibitory effect of calcium polypeptides on Cd enrichment of *Brassica campestris* L. [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16(22):4472.
- [25] HE J J, MI R D, HE Z L, et al. Optimization of the removal efficiency of three biodegradable chelating agents for soil cadmium[J]. *Heliyon*, 2024, 10(18):e37736.
- [26] KAMEDA T, SUTO R, TAMZID RAHMAN M, et al. Extraction and enrichment of lead from contaminated soil using chelation reactions [J]. *Results in Chemistry*, 2024, 7:101473.
- [27] WANG F E, WANG F X, YANG H R, et al. Ecological risk assessment based on soil adsorption capacity for heavy metals in Taihu basin, China[J]. *Environmental Pollution*, 2023, 316:120608.
- [28] ELBANA T A, MAGDI SELIM H, AKRAMI N, et al. Freundlich sorption parameters for cadmium, copper, nickel, lead, and zinc for different soils: influence of kinetics[J]. *Geoderma*, 2018, 324:80-88.
- [29] CHANG S, HAN L, CHEN R, et al. Vulnerability assessment of soil cadmium with adsorption-desorption coupling model[J]. *Ecological Indicators*, 2023, 146:109904.
- [30] 魏世强, 木志坚, 青长乐. 几种有机物对紫色土镉的溶出效应与吸附-解吸行为影响的研究[J]. 土壤学报, 2003, 40(1):110-117. WEI S Q, MU Z J, QING C L. Effects of several organic substances on the solubility and adsorption-desorption behaviors of cadmium in purple soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(1):110-117.
- [31] LU W, LIU Y, YE H, et al. Adsorption and desorption characteristics of cadmium on different contaminated paddy soil types: kinetics, isotherms, and the effects of soil properties[J]. *Sustainability*, 2021, 13(13), 7052.
- [32] ZHANG S W, HAN B, SUN Y H, et al. Microplastics influence the adsorption and desorption characteristics of Cd in an agricultural soil [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 388:121775.
- [33] XU W, LIU C, ZHU J M, et al. Adsorption of cadmium on clay-organic associations in different pH solutions: the effect of amphoteric organic matter[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2022, 236, 113509.
- [34] HOSSEINI M, ADHAMI E, OWLIAIE H R. Changes of available cadmium over time and its relationship with soil properties in highly calcareous soils[J]. *Journal of Water and Soil Science*, 2018, 22(1):127-142.
- [35] LI X, TIAN L Y, LI B Q, et al. Polyaspartic acid enhances the Cd phytoextraction efficiency of *Bidens pilosa* by remodeling the rhizospheric environment and reprogramming plant metabolism[J]. *Chemosphere*, 2022, 307:136068.
- [36] 王金贵. 我国典型农田土壤中重金属镉的吸附-解吸特征研究 [D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2012. WANG J G. Adsorption-desorption characteristics of cadmium in typical agricultural soils in China[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2012.
- [37] WANG P C, PENG H, LIU J L, et al. Effects of exogenous dissolved organic matter on the adsorption-desorption behaviors and bioavailabilities of Cd and Hg in a plant-soil system[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 728:138252.
- [38] ARIAS M, PÉREZ-NOVO C, OSORIO F, et al. Adsorption and desorption of copper and zinc in the surface layer of acid soils[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2005, 288(1):21-29.
- [39] YAN F L, TULLER M, DE JONGE L W, et al. Specific surface area of soils with different clay mineralogy can be estimated from a single hygroscopic water content[J]. *Geoderma*, 2023, 438:116614.
- [40] YU H J, LI C C, YAN J, et al. A review on adsorption characteristics and influencing mechanism of heavy metals in farmland soil[J]. *RSC Advances*, 2023, 13(6):3505-3519.
- [41] COULOMBE A, PELLETIER É, LAJEUNESSE A, et al. Adsorption, hysteresis, and trapping of heavy metals with environmental relevance onto different quick clays and montmorillonite[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2023, 234(8):489.
- [42] WANG Y B, ZHANG X Q. Effect of pH and temperature on absorption-desorption of Cu<sup>2+</sup> in soil nearby a copper tailings yard[C]// 2010 4th International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering. Chengdu, IEEE, 2010:1-3.

(责任编辑:潘淑君)