

环境科学、安全科学

# 南方酸性红壤区5种典型土地利用土壤 Pb、Cu 的吸附解吸特征

李灵<sup>1</sup> 唐辉<sup>2</sup> 张玉<sup>3</sup> 陈达英<sup>1</sup> 王涛<sup>1</sup> 邱炎坤<sup>1</sup>

(福建省生态产业绿色技术重点实验室,武夷学院生态与资源工程学院<sup>1</sup>,武夷山 354300;  
陕西理工大学外国语学院<sup>2</sup>,汉中 723003;武夷学院土木工程与建筑学院<sup>3</sup>,武夷山 354300)

**摘要** 研究了南方酸性红壤5种典型土地(马尾松、杉木、竹林、茶园、稻田)利用的土壤对 Cu、Pb 的吸附-解吸特性。结果表明,①在  $Pb^{2+}$ 、 $Cu^{2+}$  最大初始浓度( $100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )条件下,Pb、Cu 的吸附量表现为稻田( $2\ 254.35$ 、 $1\ 254.63\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) > 杉木林( $2\ 237.33$ 、 $732.81\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) > 马尾松林( $2\ 010.66$ 、 $581.94\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) > 竹林( $1\ 730.47$ 、 $470.56\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) > 茶园( $1\ 574.01$ 、 $322.69\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ),这与土壤有机质和阳离子交换量(Cation exchange copaeifg,CEC)大小顺序一致。②Cu 和 Pb 的吸附等温线用 Langmuir 和 Freundlich 方程拟合的相关性达到显著水平( $P < 0.05$ )。土壤对 Pb 的吸附强度( $1/n$ )表现为稻田( $0.711\ 7$ ) > 杉木林( $0.695\ 3$ ) > 马尾松林( $0.647\ 9$ ) > 竹林( $0.533\ 4$ ) > 茶园( $0.462\ 5$ ),对 Cu 的吸附强度( $1/n$ )表现为稻田( $1.061\ 7$ ) > 马尾松林( $0.839\ 6$ ) > 杉木林( $0.537$ ) > 竹林( $0.517\ 7$ ) > 茶园( $0.421\ 7$ )。③在实验最大吸附量条件下,马尾松、杉木、竹林、茶园、稻田土壤 Pb 的解吸率分别为 4.85%、2.72%、6.07%、5.47%、1.45%,Cu 的解吸率分别为 27.31%、25.95%、35.09%、52.82%、14.89%,Cu 的解吸率远大于 Pb 的。④当  $Pb^{2+}$ 、 $Cu^{2+}$  共存时,Pb 的竞争能力大于 Cu 的,不同土壤 Pb 和 Cu 的竞争作用表现为稻田 > 杉木林 > 马尾松林 > 竹林 > 茶园。茶园土壤 Cu 的解吸率较大,外源 Cu 易被茶树吸收,影响岩茶品质;且研究区内降雨量大且集中, $Cu^{2+}$  随径流向区域内水体流失的风险较大。

**关键词** 吸附 解吸 铜 铅 土地利用 酸性红壤  
**中图分类号** X131.3 S152.4; **文献标志码** B

重金属是土壤环境中具较大潜在危害的污染物,通常其对生物和人类的危害随土壤中重金属积累量增加而增加<sup>[1,2]</sup>。Pb 和 Cu 属于毒性较强且容易被生物吸收的重金属,通过植物的吸收从土壤中迁移到植物体内,影响农作物的产量和质量<sup>[3]</sup>,经过食物链的传递和富集而危害人体健康<sup>[4]</sup>。过量的铅对人体的神经、造血、消化、心血管、内分泌、免疫、骨骼等多种系统均有毒害作用<sup>[5]</sup>,过量的铜可损害人体的肝脏等。土壤中重金属的吸附-解吸直接影响重金属在土壤中的形态转化、迁移和归趋、对地下水和土壤溶液及人类的生存环境的潜在影响<sup>[6,7]</sup>。国内外关于土壤

Pb 和 Cu 吸附-解吸已有大量的研究,如胡小娜等<sup>[8]</sup>研究了干旱区绿洲灌漠土 Cu、Zn 和 Pb 的吸附解吸特征,发现灰漠土对 Cu、Zn 和 Pb 吸附能力由强到弱的顺序为:Pb > Cu > Zn。符娟林等<sup>[1]</sup>报道了长三角和珠三角农业土壤对 Pb、Cu、Cd 的吸附解吸特性,表明 Pb、Cu、Cd 共存时3种重金属的竞争能力依次减弱。李玉萍<sup>[9]</sup>在研究徐州和苏州土壤中铅铜锌镉的吸附解吸特性时发现,它们对重金属元素的吸附率顺序是 Cd > Pb > Cu > Zn。但有关土地利用土壤对 Pb 和 Cu 吸附-解吸影响的报道较少,姜强等<sup>[10]</sup>研究了林地、旱地和茶园3种不同土地利用方式全土及土壤微团聚体对  $Pb^{2+}$  的吸附解吸特性,房莉等<sup>[11]</sup>对农田、林地、草地3种土地利用方式土壤中 Cu、Cd 的吸附解吸过程进行了比较研究。本文以南方酸性红壤区5种典型的土地利用土壤为研究对象,探讨不同土地利用土壤对 Pb、Cu 吸附解吸的影响,对区域土地利用管理、生态环境保护、土壤质量提高、生态环境改善及污染土壤的修复等提供科学依据。

2016年8月13日收到 南平市科技局项目(N2009Z10-3)、武夷学院对接南平产业发展专项(2011DJ08)和武夷山风景名胜区管理委员会项目(2008-03)资助  
第一作者简介:李灵(1973—),博士,副教授。研究方向:土壤污染及生态修复。E-mail:haodou\_025@126.com。

引用格式:李灵,唐辉,张玉,等.南方酸性红壤区5种典型土地利用土壤 Pb、Cu 的吸附解吸特征[J].科学技术与工程,2017,17(5):126—131

Li Ling, Tang Hui, Zhang Yu, et al. Pb and Cu adsorption-desorption characteristics of five typical land use soils in acid red soil zone of south China [J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(5): 126—131

## 1 研究方法

### 1.1 土壤样品采集

供试土壤为武夷山( $117^{\circ}37'22'' \sim 118^{\circ}19'44''\text{E}$ ,

27°27'31"~28°04'49"N) 市 5 种典型不同土地利用的土壤,分别为马尾松、杉木、竹林、茶园和稻田土壤,采样深度为 0~20 cm,用环刀取原状土。土样在拣去石砾、植物根系和大于 2 mm 的碎屑后,自然风干,过 1 mm 筛后储藏备用。土壤 pH-电极法,有机质(SOM)-重铬酸钾氧化法,阳离子交换量(CEC)- $\text{NH}_4\text{OAc}$  交换法,土壤容重(BD)-环刀法测定。供试土壤的主要理化性质见表 1。

表 1 供试土壤的主要理化性质

Table 1 Physical and chemical characteristics of the soils

土地利用类型	容重/( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	pH	有机质/%	阳离子交换量/( $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ )
马尾松林	1.24	4.75	2.56	19.37
杉木林	1.34	4.32	3.30	20.85
竹林	1.13	5.13	2.22	15.17
茶园	1.44	4.37	2.14	15.06
稻田	1.17	4.99	5.66	30.33

## 1.2 吸附与解吸试验

吸附试验:称取风干土样 1.00 g 于 50 mL 聚丙烯离心管中,分别加入一定量 100 mg/L 的  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$  溶液(介质为 0.01 mol/L  $\text{NaNO}_3$  溶液),使土壤中  $\text{Cu}^{2+}$  加入量分别为 0、50、100、200、400、1 000、1 500 和 2 500 mg/kg,再加入 0.01 mol/L 的 pH 为 5.0 的  $\text{NaNO}_3$  溶液,使溶液的总体积为 25 mL。恒温(25 °C)振荡(200 r/min)24 h,离心(2 500 r/min)15 min,用定量滤纸过滤离心管中的上清液,用原子吸收分光光度计测定滤液中  $\text{Cu}^{2+}$  浓度。Pb 吸附试验时以  $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$  为 Pb 源,重复上述实验过程。

解吸试验:向吸附反应结束后的土壤中分别加入 pH 为 5.0 的 0.01 mol/L 的  $\text{NaNO}_3$  溶液 25 mL,其他操作与吸附试验相同,用原子吸收分光光度计分别测定滤液中  $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{Cu}^{2+}$  浓度。

## 1.3 重金属 $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{Cu}^{2+}$ 共存的竞争吸附试验

称取风干土样 1.00 g 于 50 mL 聚丙烯离心管中,分别加入同时含相同浓度  $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{Cu}^{2+}$  的溶液,加入的各种重金属浓度分别为 2、8 和 40 mg/L,使得土壤中  $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{Cu}^{2+}$  加入量分别为 50、200 和 1 000 mg/kg,用 0.01 mol/L 的  $\text{NaNO}_3$  溶液定容至 25 mL。重复上述吸附实验过程,原子吸收分光光度计测定上清液中  $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Pb}^{2+}$  的浓度。计算重金属在土壤和溶液中的分配系数  $K_d$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同土地利用的土壤对 Pb、Cu 的吸附特性

5 种不同土地利用的土壤对 Pb、Cu 的吸附表现出大致相同的规律量,即在  $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{Cu}^{2+}$  低浓度时吸

附量急剧增加,高浓度时吸附量增加速度逐渐趋缓(图 1)。这与已有的研究结果<sup>[1,8,9,12]</sup>基本一致。低浓度时以专性吸附为主,吸附性能主要与重金属离子的浓度有关,与土壤本身的理化性质关系不大,不同土壤的吸附都较强,而且其吸附量接近;高浓度时专性吸附点位逐渐得以饱和,非专性吸附的能力增加,土壤的性质与组成成为限制吸附的主要因素,不同土壤对重金属的吸附能力差异逐渐显现<sup>[13]</sup>。

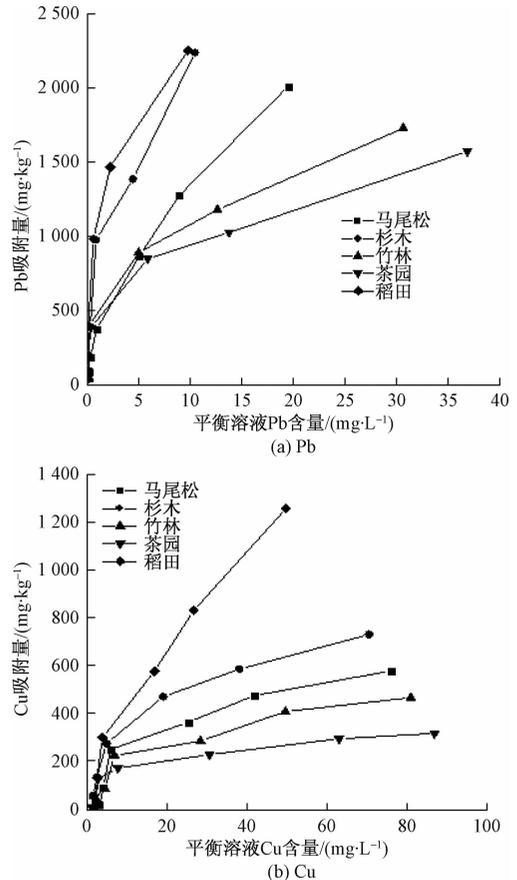


图 1 不同土地利用的土壤对 Pb、Cu 的吸附等温线

Fig. 1 Pb and Cu adsorption isotherm of different land use soils

5 种不同土地利用的土壤对 Pb 的吸附量大于 Cu(图 1),这可能是因为与 Cu 相比, Pb 对土壤有机物的键合位有更大的亲和力<sup>[2]</sup>。

土壤吸附能力大小与其自身的理化性质有关,如土壤胶体含量、胶体种类、土壤质地、有机质含量及 pH 等<sup>[14]</sup>。在加入的最大质量浓度(100 mg/L)条件下,不同土地利用的土壤对 Pb、Cu 的吸附量分别是马尾松林为 2 010.66、581.94  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,杉木林为 2 237.33、732.81  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,竹林为 1 730.47、470.56  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,茶园为 1 574.01、322.69  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,稻田为 2 254.35、1 254.63  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。不同土地利用的土壤对 Pb、Cu 的吸附量大小为稻田 > 杉木林 > 马尾松林 > 竹林 > 茶园,这与土壤中有机质和阳离

子交换量大小顺序稻田(5.66%, 30.33  $\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) > 杉木林(3.30%, 20.85  $\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) > 马尾松林(2.56%, 19.37  $\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) > 竹林(2.22%, 15.17  $\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) > 茶园(2.14%, 15.06  $\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) (表1)一致。有机质含量高,土壤表面的吸附点位多;CEC越高,负电荷量越高,通过静电吸引而吸附的金属离子越多<sup>[15]</sup>。稻田土壤经历了长时间的有机耕作,提高了土壤有机质和CEC含量,较高的有机质形成的有机胶体又具有比无机胶体大得多的CEC,从而在土壤胶体表面有较多的吸附点位,说明人为有机耕作有利于提高土壤对Pb、Cu的吸附。茶园经营过程中,人为的除草和清除枯枝落叶,且研究区域内降雨充沛,土壤冲刷侵蚀比较严重,导致土壤质量和吸附重金属的能力下降<sup>[16]</sup>。

## 2.2 Pb、Cu 吸附模型的拟合

土壤对Cu和Pb的吸附等温线用Langmuir型吸附模式和Freundlich型吸附模式进行拟合。建立 $1/Q$ (吸附量的倒数)和 $1/C$ (重金属离子平衡浓度的倒数)之间的关系,用Langmuir方程拟合;建立 $\lg Q$ (吸附量的对数)和 $\lg C$ (重金属离子平衡浓度的对数)之间的关系,用Freundlich方程拟合(表2和表3)。土壤对Cu和Pb的等温吸附特征用Langmuir方程和Freundlich方程拟合均较好,相关性达到显著水平( $P < 0.05$ ),这与胡小娜等<sup>[8]</sup>、陈苏等<sup>[6]</sup>、姜强等<sup>[10]</sup>研究结果基本一致。由Freundlich方程 $G = kC^{1/n}$ 变换得: $\lg G = \lg k + 1/n \lg C$ 。许多学者<sup>[6,17]</sup>认为Freundlich方程中 $1/n$ 值可作为土壤对重金属离子吸附作用的强度指标, $1/n$ 值愈大,表示土壤对重金属离子的吸附作用力愈大。土壤对Pb的吸附强度( $1/n$ )表现为稻田(0.7117) > 杉木林(0.6953) > 马尾松林(0.6479) > 竹林(0.5334) > 茶园(0.4625)(表2),对Cu的吸附强度( $1/n$ )表现

为稻田(1.0617) > 马尾松林(0.8396) > 杉木林(0.537) > 竹林(0.5177) > 茶园(0.4217)。

## 2.3 Pb、Cu 的解吸特性

解吸量可作为吸附强度指标,往往用来说明胶体表面活性吸附位与重金属离子结合的牢固程度,吸附于土壤上的重金属的解吸具有重要的生态意义<sup>[6]</sup>。土壤对铅、铜的解吸量随其吸附量的增加而增加,不同土壤对Cu的解吸能力大于Pb的(图2)。可能是随着土壤对铜的吸附量的增加,铜的吸附由交换性吸附为主代替了以专性吸附为主,交换性吸附的铜比较容易解吸,从而使土壤铜的解吸量显著增加。土壤中重金属的解吸过程与吸附过程密切相关,对Pb和Cu解吸量随吸附量的变化进行拟合。结果表明,Pb解吸量与吸附量之间指数函数模拟的最好,这与彭达强等<sup>[5]</sup>研究结论一致,但与张玉芬等<sup>[18]</sup>研究结果Pb解吸量与吸附量之间二次幂函数模拟最好的研究结果不一致,可能是研究的土壤类型不同所致。而Cu解吸量与吸附量之间线性函数模拟的最好,与胡小娜等<sup>[8]</sup>的研究结论一致。Pb和Cu拟合函数的相关性均达极显著水平( $P < 0.01$ )(表4)。

由图2可知,当马尾松、杉木、竹林、茶园、稻田土壤Pb的最大吸附量为2010.66、2237.33、1730.47、1574.01、2254.35  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,对应的解吸量分别为97.46、60.78、105.06、86.09、32.69  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,其解吸率分别为4.85%、2.72%、6.07%、5.47%、1.45%,以稻田土壤Pb的解吸率最低,竹林的最大,但均低于10%。不被解吸的Pb可能与土壤上的高能位结合,对植物的生物有效性低,说明土壤对外源Pb具有缓冲和固定作用。

Cu的最大吸附量为581.94、732.81、470.56、322.69、1254.63  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,对应的解吸量分别为158.90、190.15、165.10、170.43、186.82  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,

表2 土壤对Pb等温吸附线Langmuir、Freundlich模型的拟合

Table 2 Langmuir and Freundlich models of Pb adsorption isotherms in different land use soils

土地利用	Langmuir 模型 $C/Q = C/Q_m + K/Q_m$	Freundlich 模型 $Q = KC^{1/n}$
马尾松	$Y = 0.0397X + 0.0006, r = 0.999^*$	$y = 0.6479x + 2.5037, r = 0.993^*$
杉木	$Y = 0.0279X - 0.0004, r = 0.981^*$	$y = 0.6953x + 2.7708, r = 0.961^*$
竹林	$Y = 0.0294X + 0.0002, r = 0.916^*$	$y = 0.5334x + 2.5464, r = 0.913^*$
茶园	$Y = 0.0182X + 0.0003, r = 0.988^*$	$y = 0.4625x + 2.5808, r = 0.964^*$
稻田	$Y = 0.0302X - 0.0017, r = 0.854^*$	$y = 0.7117x + 2.9012, r = 0.891^*$

注:Y为 $1/Q$ ,y为 $\lg Q$ ,Q为吸附量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;X为 $1/C$ ,x为 $\lg C$ ,C为平衡浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ;r为相关系数;\*为显著水平( $P < 0.05$ )。

表3 土壤对Cu等温吸附Langmuir、Freundlich模型的拟合

Table 3 Langmuir and Freundlich models of Cu adsorption isotherms in different land use soils

土地利用	Langmuir 模型 $C/Q = C/Q_m + K/Q_m$	Freundlich 模型 $Q = KC^{1/n}$
马尾松	$y = 0.1227x - 0.0046, r = 0.957^*$	$y = 0.8396x + 1.2111, r = 0.899^*$
杉木	$y = 0.0196x + 0.0008, r = 0.968^*$	$y = 0.537x + 1.8914, r = 0.950^*$
竹林	$y = 0.0247x + 0.0020, r = 0.954^*$	$y = 0.5177x + 1.7617, r = 0.922^*$
茶园	$y = 0.0238x + 0.0019, r = 0.948^*$	$y = 0.4217x + 1.8358, r = 0.908^*$
稻田	$y = 0.0784x - 0.0071, r = 0.882^*$	$y = 1.0617x + 1.4327, r = 0.913^*$

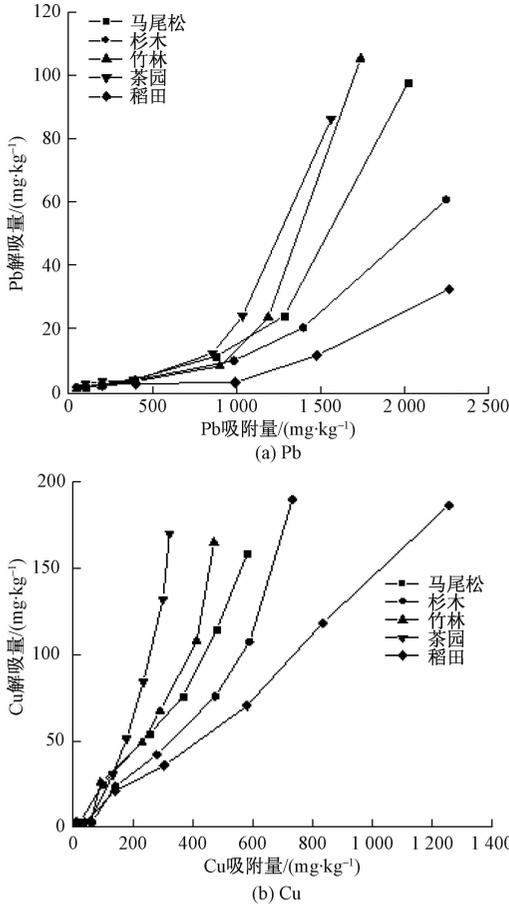


图 2 Pb、Cu 解吸量与吸附量之间的关系

Fig. 2 Relationship between soil adsorbed and desorbed of Pb and Cu

其解吸率分别为 27.31%、25.95%、35.09%、52.82%、14.89%，以稻田土壤 Cu 的解吸率最低，茶园的最大，Cu 的解吸率远大于 Pb 的。这说明，外源

Cu 进入土壤后可能较易向环境中转移，在一定条件下对地下水、土壤溶液以及作物吸收重金属产生潜在影响，而外源铅进入土壤后易被固定，不易发生移动。茶园土壤 Cu 的解吸率较大，这意味着在同等复合污染情况下，Cu 在茶园土壤中的活性较强，因此外源 Cu 进入茶园土壤中，增加了  $Cu^{2+}$  的生物有效性和可迁移性，一方面被茶树吸收，影响岩茶品质<sup>[19]</sup>，另一方面，研究区内降雨量大且集中， $Cu^{2+}$  具有随径流向区域内水体流失的风险。

2.4 重金属的竞争吸附

复合污染在环境污染中极为普遍，污染离子共存于土壤溶液中，必然因竞争吸附位使彼此的吸附受到影响<sup>[20,21]</sup>。表 5 为  $Pb^{2+}$ 、 $Cu^{2+}$  共存在时对土壤吸附 Pb、Cu 影响的结果。分配系数  $K_d$  值是吸附达到平衡时，某一重金属在固相（土壤）与在液相中浓度的相对比值。其大小可以反映土壤对重金属的吸附强度。 $K_d$  值越大，说明土壤对重金属的吸附越强<sup>[1]</sup>。由表 5 可知，随着  $Pb^{2+}$ 、 $Cu^{2+}$  加入量增加，Pb 和 Cu 只加入单一重金属的  $K_d$  值与 2 种重金属加入时  $K_d$  值之间的差值有所增强，表明 Pb 和 Cu 之间竞争吸附随重金属加入量增加而增强。 $Pb^{2+}$ 、 $Cu^{2+}$  同时加入时的  $K_d$  值与对应浓度下只有单一重金属时的  $K_d$  值之比（表 5 中括号内数据）可反映重金属之间相对竞争能力。当  $Pb^{2+}$ 、 $Cu^{2+}$  重金属加入量相同时，该比值从大到小为  $Pb > Cu$ ，表明 Pb 的竞争能力大于 Cu 的，说明土壤中 Pb、Cu 共存时，Cu 的生物有效性相对提高。不同土地利用方式间 Pb 和 Cu 的竞争作用表现为稻田 > 杉木林 > 马尾松林 > 竹林 > 茶园。因此，研究区内茶园土壤 Pb 和 Cu

表 4 土壤对 Pb、Cu 解吸-吸附模型的拟合

Table 4 Fitting models of Pb and Cu desorption-adsorption in different land use soils

土地利用	Pb 解吸-吸附指数模型	Cu 解吸-吸附直线模型
马尾松	$y = 1.6913e^{0.0022x}, r = 0.980^{**}$	$y = 0.3183x - 1.7493, r = 0.984^{**}$
杉木	$y = 1.9422e^{0.0016x}, r = 0.993^{**}$	$y = 0.2339x - 10.759, r = 0.959^{**}$
竹林	$y = 1.496e^{0.0021x}, r = 0.964^{**}$	$y = 0.2984x - 8.0893, r = 0.938^{**}$
茶园	$y = 2.205e^{0.0017x}, r = 0.973^{**}$	$y = 0.3707x - 15.544, r = 0.985^{**}$
稻田	$y = 1.7318e^{0.0012x}, r = 0.975^{**}$	$y = 0.1456x - 2.2001, r = 0.995^{**}$

注：y 为解吸量，mg/kg；x 为吸附量，mg/kg；r 为相关系数；\*\* 为极显著水平（ $P < 0.01$ ）。

表 5 单一重金属与 2 种重金属吸附的分配系数  $K_d$  值

Table 5 Distribution coefficients of single element and two elements adsorption of the soils

重金属	初始浓度/ ( $mg \cdot L^{-1}$ )	2 种重金属同时加入					单一重金属				
		马尾松	杉木	竹林	茶园	稻田	马尾松	杉木	竹林	茶园	稻田
Pb	2	569(0.85)	1185(0.87)	424(0.76)	331(0.67)	1772(0.94)	669	1362	558	493	1885
	8	449(0.71)	682(0.83)	326(0.64)	235(0.56)	1251(0.88)	632	822	509	419	1421
	40	97(0.41)	119(0.49)	78(0.33)	62(0.29)	146(0.56)	237	243	234	212	260
Cu	2	83(0.56)	177(0.59)	65(0.51)	50(0.42)	232(0.67)	149	300	127	118	346
	8	40(0.37)	80(0.44)	34(0.32)	16(0.26)	106(0.51)	109	183	106	62	207
	40	12(0.26)	20(0.31)	8(0.22)	5(0.14)	27(0.39)	46	65	38	37	68

注：括号内数据为 2 种重金属同时加入时各种重金属的  $K_d$  值与加入单一重金属时相应  $K_d$  值的比值。

对岩茶和环境污染的风险较大。

### 3 结论

(1)南方酸性红壤区5种典型土地利用的土壤对Pb和Cu有较强的吸附能力,但其吸附能力因不同土地利用的差异有较大变化。不同土地利用的土壤对Pb、Cu的吸附量大小为稻田>杉木林>马尾松林>竹林>茶园,这与土壤中有有机质和阳离子交换量大小顺序一致。5种典型土地利用的土壤Pb的吸附能力大于Cu的。土壤对Cu和Pb的吸附等温线用Langmuir方程和Freundlich方程拟合的相关性均达到显著水平( $P < 0.05$ )。

(2)Pb和Cu解吸量随吸附量的增大而增大,Pb解吸量与吸附量之间指数函数模拟的最好,而Cu解吸量与吸附量之间线性函数模拟的最好,相关性均达极显著水平( $P < 0.01$ )。在土壤Pb最大吸附量条件下,马尾松林、杉木林、竹林、茶园和稻田土壤对Pb解吸率分别为4.85%、2.72%、6.07%、5.47%、1.45%,均低于10%,其中以稻田土壤的最低,竹林土壤的最大。当Cu达最大吸附量时,马尾松林、杉木林、竹林、茶园和稻田对Cu其解吸率分别为27.31%、25.95%、35.09%、52.82%、14.89%,以稻田土壤的最低,茶园土壤的最大。Cu的解吸率远大于Pb的。

(3)Pb和Cu之间竞争吸附随重金属加入量增加而增强,Pb的竞争能力大于Cu的。不同土地利用方式间Pb和Cu的竞争作用表现为稻田>杉木林>马尾松林>竹林>茶园。

### 参 考 文 献

- 符娟林,章明奎,黄昌勇. 长三角和珠三角农业土壤对Pb, Cu, Cd的吸附解吸特性. 生态与农村环境学报, 2006; 22(2): 59—64  
Fu Juanlin, Zhang Mingkui, Huang Changyong. Lead, copper, and cadmium adsorption-desorption behaviors of agricultural soils of Changjiang and Zhujiang deltas. Journal of Ecology and Rural Environment, 2006; 22(2): 59—64
- 王胜利,南忠仁,赵转军,等. 干旱区绿洲灌漠土和灰钙土Cu, Ni的吸附解吸特征. 兰州大学学报(自然科学版), 2009; 45(5): 23—27  
Wang Shengli, Nan Zhongren, Zhao Zhuanjun, et al. Sorption and desorption of copper and nickel in the irrigated desert soil and gray calcareous soil in the arid regions oasis. Journal of Lanzhou University (Natural Science), 2009; 45(5): 23—27
- 乔冬梅,齐学斌,庞鸿宾,等. 不同pH条件下重金属Pb<sup>2+</sup>的吸附解吸研究. 土壤通报, 2011; 42(1): 38—41  
Qiao Dongmei, Qi Xuebin, Pang Hongbin, et al. Effect of pH level on adsorption characteristics of Pb<sup>2+</sup>. Chinese Journal of Soil Science, 2011; 42(1): 38—41
- 常娟,白玲,冷婧,等. 江西省典型水稻土对铜的吸附解吸特性研究. 江西农业大学学报, 2016; 38(1): 207—214  
Chang Juan, Bai Ling, Leng Jing, et al. A study on adsorption and desorption of copper in typical paddy soils in Jiangxi province. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2016; 38(1): 207—214
- 彭达强,谢世友. 石灰土与紫色土中铅的等温吸附-解吸特性. 湖北农业科学, 2012; 51(3): 493—496  
Peng Daqiang, Xie Shiyu. Isothermal adsorption-desorption characteristics of lead in purple and calcareous Soil. Hubei Agricultural Sciences, 2012; 51(3): 493—496
- 陈苏,孙丽娜,孙铁衍,等. 不同污染负荷土壤中铜和铅的吸附-解吸行为. 应用生态学报, 2007; 18(8): 1819—1926  
Chen Su, Sun Lina, Sun Tiejian, et al. Sorption-desorption behaviors of Cd<sup>2+</sup> and Pb<sup>2+</sup> in different pollution load soils. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007; 18(8): 1819—1926
- 刘庆,赵西梅,舒龙,等. 土壤对铜的吸附-解吸特征及对土地利用的响应. 水土保持通报, 2012; 32(5): 128—131, 230  
Liu Qing, Zhao Ximei, Shu Long, et al. Characteristics of copper adsorption-desorption by soils and its responses to land use. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2012; 32(5): 128—131, 230
- 胡小娜,南忠仁,王胜利,等. 干旱区绿洲灌漠土Cu, Zn和Pb的吸附解吸特征. 生态环境学报, 2009; 18(6): 2183—2188  
Hu Xiaona, Nan Zhongren, Wang Shengli, et al. Sorption and desorption of copper, zinc and lead in the irrigated desert soil from the oasis in the arid regions, northwest China. Ecology and Environmental Sciences, 2009; 18(6): 2183—2188
- 李玉萍. 徐州和苏州土壤中铅铜锌镉的吸附解吸特性研究. 北京:首都师范大学, 2007  
Li Yeping. Study on sorption and desorption of Pb, Cu, Zn and Cd in the Xuzhou and Suzhou soils. Beijing: Capital Normal University, 2007
- 姜强,夏建国,刘朗,等. 不同土地利用方式下土壤微团聚体对Pb<sup>2+</sup>的吸附解吸特性研究. 水土保持学报, 2013; 27(6): 237—243  
Jiang Qiang, Xia Jianguo, Liu Lang, et al. Effect of soil micro-aggregates under different land uses pattern on adsorption and desorption characteristics of Pb<sup>2+</sup>. Journal of Soil and Water Conservation, 2013; 27(6): 237—243
- 房莉,余健,张彩峰,等. 不同土地利用方式土壤对铜、镉离子的吸附解吸特征. 中国生态农业学报, 2013; 21(10): 1257—1263  
Fang Li, Yu Jian, Zhang Caifeng, et al. Characteristics of adsorption and the sorption of copper and cadmium ions in soils under different land use types. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013; 21(10): 1257—1263
- 俞Y, Zhou Q. Effect of methamidophos on sorption-desorption behavior of copper in soils. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2003; 71(5): 979—987
- Brad H B. Adsorption of heavy metal ions on soil and soils constituents. Journal of Colloid and Interface Science, 2004; 277(1): 1—18
- Jordi S, Gemma R. Sorption-desorption tests to assess the risk derived from metal contamination in mineral and organic soils. Environment International, 2007; 33(2): 246—256
- Chip A, Lena M. Concentration, pH and surface charge effects on Cadmium and Lead sorption in three tropical soils. Journal of Envi-

- ronmental Quality, 2002;31(4): 581—589
- 16 李 灵,张 玉,江慧华,等. 九曲溪生态保护区不同土地利用方式对土壤质量的影响. 中国水土保持,2011;(11):41—45  
Li Ling, Zhang Yu, Jiang Huihua, *et al.* Effects of land use types on soil quality in ecological protection zone of Jiuqu stream. *Soil and Water Conservation in China*, 2011;(11):41—45
- 17 焦文涛,蒋 新,余贵芬,等. 土壤有机质对镉在土壤中吸附—解吸行为的影响. 环境化学,2005;24(5):545—549  
Jiao Wentao, Jiang Xin, Yu Guifen, *et al.* Effects of organic matter on cadmium adsorption-desorption in three soils. *Environmental Chemistry*, 2005;24(5):545—549
- 18 张玉芬,刘景辉,杨彦明,等. 通辽地区 4 种典型土壤对铅、汞、镉和砷的吸附解吸特征. 中国农业大学学报, 2015; 20(5): 111—118  
Zhang Yufen, Liu Jinghui, Yang Yanming, *et al.* Adsorption and desorption characteristics of lead, mercury, cadmium and arsenic in four typical soils of tongliao. *Journal of China Agricultural University*, 2015;20(5):111—118
- 19 李 灵,梁彦兰,张 玉,等. 武夷岩茶核心种植区土壤重金属污染特征及土壤质量评价. 土壤通报,2013;44(3):730—736  
Li Ling, Lang Yanlan, Zhang Yu, *et al.* Characteristics of soil heavy metal pollution and evaluation of soil quality of wuyi yan tea. *Chinese Journal of Soil Science*, 2013;44(3):730—736
- 20 王玉军,周东美. 土壤中铜、铅离子的竞争吸附动力学. 中国环境科学,2006;26(5):555—559  
Wang Yujun, Zhou Dongmei. Competitive adsorption kinetics of copper and lead ions in soils. *China Environmental Science*, 2006;26(5):555—559
- 21 Lu S G, Xu Q F. Competitive adsorption of Cd, Cu, Pb and Zn by different soils of Eastern China. *Environmental Geology*, 2009;57(3):685—693

## Pb and Cu Adsorption-desorption Characteristics of Five Typical Land Use Soils in Acid Red Soil Zone of South China

LI Ling<sup>1</sup>, TANG Hui<sup>2</sup>, ZHANG Yu<sup>3</sup>, CHEN Da-ying<sup>1</sup>, WANG Tao<sup>1</sup>, QIU Yan-kun<sup>1</sup>

(Fujian Provincial Key Laboratory of Eco-Industrial Green Technology, College of Ecology and Resources Engineering,

Wuyi University<sup>1</sup>, Wuyishan 354300, P. R. China; School of Foreign Studies, Shaanxi University of Technology<sup>2</sup>,

Hanzhong 723003, P. R. China; College of Architecture and Civil Engineering, Wuyi University<sup>3</sup>, Wuyishan 354300, P. R. China)

[Abstract] Five typical land use soils, collected from the acid red soil zone of South China, were analyzed to explore Pb and Cu adsorption-desorption characteristics of the soils. The research results show that: ① In terms of Pb or Cu adsorption capacity with initial maximum concentrations of Pb or Cu added (100 mg·L<sup>-1</sup> solutions), a decreasing order was observed as paddy soil (2 254.35, 1 254.63 mg·kg<sup>-1</sup>) > Chinese fir forest soil (2 237.33, 732.81 mg·kg<sup>-1</sup>) > Pinus massoniana forest soil (2 010.66, 581.94 mg·kg<sup>-1</sup>) > bamboo forest soil (1 730.47, 470.56 mg·kg<sup>-1</sup>) > tea plantation soil (1 574.01, 322.69 mg·kg<sup>-1</sup>). The order was same as the soil organic matter and CEC content. ② Isothermal curves of Pb and Cu adsorption these five soils fit well to Langmuir and Freundlich equations ( $P < 0.05$ ). The adsorption intensity of Pb ( $1/n$ ) ranked as follows: paddy soil (0.711 7) > Chinese fir forest soil (0.695 3) > Pinus massoniana forest soil (0.647 9) > bamboo forest soil (0.533 4) > tea plantation soil (0.462 5). The adsorption intensity of Cu ( $1/n$ ) ranked as follows: paddy soil (1.061 7) > Pinus massoniana forest soil (0.839 6) > Chinese fir forest soil (0.537) > bamboo forest soil (0.517 7) > tea plantation soil (0.421 7). ③ The desorptive rates of Pb<sup>2+</sup> was 4.85% (Pinus massoniana forest soil), 2.72% (Pinus massoniana forest soil), 6.07% (bamboo forest soil), 5.47% (tea plantation soil), 1.45% (paddy soil). The desorptive rates of Cu<sup>2+</sup> was 27.31% (Pinus massoniana forest soil), 25.95% (Pinus massoniana forest soil), 35.09% (bamboo forest soil), 52.82% (tea plantation soil), 14.89% (paddy soil). The desorptive rates of Cu<sup>2+</sup> was much higher than that of Pb<sup>2+</sup>. ④ The selective sequence of five soils to Pb and Cu adsorption was Pb > Cu in competitive adsorption. The competitive adsorption of Pb and Cu was observed as paddy soil > Chinese fir forest soil > Pinus massoniana forest soil > bamboo forest soil > tea plantation soil. The desorptive rates of Cu<sup>2+</sup> in tea plantation soil was relative bigger, so the exogenous Cu was easily absorbed by tea tree to effect rock tea quality. The risk of Cu<sup>2+</sup> to the regional water body was higher.

[Key words] adsorption desorption Cu Pb land use acid red soil