

茶苗对重金属 Pb Cu Cd 和 Cr 的吸收累积规律

李 云¹, 张进忠^{1,2}, 童华荣³

(1.西南大学资源环境学院, 重庆 400716; 2.重庆市农业资源与环境重点实验室, 重庆 400716; 3.西南大学食品科学学院, 重庆 400716)

摘 要:通过盆栽实验,从动态角度研究了在不同培养期内,Pb、Cu、Cd 和 Cr 4 种重金属在茶树中的累积规律。结果表明,茶树不同部位对 4 种重金属的累积量存在很大差异,重金属的分布顺序为根>茎>叶;4 种重金属大部分被茶树根系固定,在其体内的迁移性较低,在茶叶中积累的顺序为:Cr>Cu>Cd>Pb。茶叶中重金属累积量和重金属添加量、培养时间都存在显著的正相关关系。4 种重金属元素中,Cr 的累积速率常数最大,Cd 最小。茶树对重金属的吸收与土壤 pH 值和土壤有效态重金属含量显著相关。本研究可为人们科学认识茶叶中重金属的残留问题、健康风险及其污染控制提供理论依据。

关键词:茶苗;重金属;吸收累积

中图分类号:X503.235 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2009)03-0454-06

Absorption and Accumulation of Cr, Pb, Cu and Cd in Young Tea Tree

LI Yun¹, ZHANG Jin-zhong^{1,2}, TONG Hua-rong³

(1.College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China; 2.Chongqing Key Laboratory of Agricultural Resources and Environment, Chongqing 400716, China; 3.College of Food Sciences, Southwest University, Chongqing 400716, China)

Abstract: The process of absorption and accumulation of heavy metals in tea tree was studied by potted cultivation in different culture period. The results showed that the absorption amounts of the four heavy metals (i.e. Pb, Cu, Cd, and Cr) were quite different in different parts of the young tea tree, and the sequence of all the four heavy metals were root>stem>leaf. The movement of the four heavy metals from soil into tea tree was low, most of them were fixed by root of the young tea tree, and the sequence of the four heavy metals in tea leaf was Cr>Cu>Cd>Pb. In addition, the accumulative amounts of the four heavy metals in tea leaf were related to the concentrations of the added four heavy metals in soil and culture time. The accumulative rate constant of Cr was maximum, while that of Cd is minimum among the four heavy metals. There were significant relationships between the absorption of heavy metals in tea tree and pH of the soil, and the amounts of available heavy metals in soil. This study can provide theoretical basis for recognizing heavy metals residue in tea, health risk and pollution control.

Keywords: young tea tree; heavy metals; absorption and accumulation

茶叶是我国具有文化底蕴的传统健康饮品,也是重要的经济作物。茶叶以其丰富的营养和保健的双重功效,简便、省时的优点越来越受到人们的青睐^[1]。我国西南地区是世界茶树的原产地,主要分布在四川、重庆和贵州等地。该地区自然条件优越,环境污染少,有利于茶树生长和生产卫生安全的名优茶。近年来,随着工业化和城市化进程的加快,茶园中化肥、农药的大量施用,使该地区的土壤环境受到不同程度的重

金属危害,由此引起茶叶中重金属含量也呈日益上升的趋势。茶叶中有毒重金属元素(如 Cu、Pb、Cr 和 Cd 等)超标,不仅影响茶叶口感、降低其营养价值和品质,而且威胁人体健康^[2]。

目前对茶叶中的重金属研究主要集中在两个方面:一是调查茶叶和茶园土壤中重金属的种类、来源和建立快速灵敏的检测方法^[3-5];二是通过实验室培养,从静态的角度探讨重金属在茶树不同部位的吸收和累积特征^[6-8]。然而,这些研究仅能反映当前茶叶中重金属的来源、种类和在茶叶中吸收和累积的总体结果,缺乏关于茶叶中重金属吸收累积规律的研究。本文通过盆栽实验,以培养时间和添加重金属浓度水平

收稿日期:2008-05-27

作者简介:李 云,安徽淮南人,硕士研究生,研究方向为环境化学。E-mail:gloria_8210@yahoo.com.cn

通讯联系人:张进忠 E-mail:jzhzhang@swu.edu.cn

为尺度,研究重金属在茶叶中的吸收累积过程,为科学地认识茶叶中重金属的残留、健康风险及其污染控制提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 主要仪器与试剂

1.1.1 实验仪器

火焰原子吸收分光光度计(配 Pb、Cu、Cd、Cr 空心阴极灯):TA5-990 型,北京普析通用仪器责任有限公司;

可见分光光度计:Spectrum Lab 22, 上海棱光技术有限公司。

1.1.2 试剂

Cd²⁺标准溶液(1 000 mg·L⁻¹):称取 1.0 g 高纯 Cd 粒,溶于 50 mL 1:1 HCl 中,用去离子水定容至 1 000 mL,贮于塑料瓶中;

Cu²⁺标准溶液(1 000 mg·L⁻¹):称取 1.0 g 高纯 Cu 粒,溶于 50 mL 1:1 HNO₃ 中,用去离子水定容至 1 000 mL,贮于塑料瓶中;

Cr(VI)标准溶液(1 000 mg·L⁻¹):称取 0.282 9 g K₂Cr₂O₇,溶于去离子水中,再定容至 1 000 mL,贮于塑料瓶中;

Pb²⁺标准溶液(1 000 mg·L⁻¹):称取 1.0 g 高纯 Pb 粒,溶于 50 mL 1:1 HNO₃ 中,用去离子水定容至 1 000 mL,贮于塑料瓶中;

邻菲洛啉指示剂:称取 1.5 g 邻菲洛啉及 0.7 g FeSO₄·7H₂O 于烧杯中,加水 100 mL 溶解混匀,储于棕色瓶中备用。

重金属离子混合液:见表 1。

1.2 盆栽实验方法

1.2.1 盆栽实验土壤性质

茶树盆栽用土采自于重庆市缙云山茶园,采回后

表 1 盆栽实验土壤中重金属的添加浓度(mg·kg⁻¹)

Table 1 Origin and concentration of heavy metals used in the tested soil

处理水平	处理元素/来源物质分子式			
	Cd/Cd(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O	Cr/K ₂ Cr ₂ O ₇	Cu/CuSO ₄	Pb/PbCl ₂
对照(CK)	0	0	0	0
处理 1	1.0	40	60	40
处理 2	2.0	80	120	80
处理 3	6.0	100	200	100
处理 4	20.0	150	300	150
茶园土壤和茶叶	0.3	250	150	250
重金属的环境质量 标准/mg·kg ⁻¹	1.0	5.0	60	5.0

晾晒、风干、研磨过筛待用。随后测定茶园土壤的基本理化性质^[9]:pH 值(电位法)、有机质(重铬酸钾容量法)、全 N(半微量凯式蒸馏法)、有效 P(NaHCO₃ 溶提法)、有效 K(NH₄Ac-火焰光度法)和 CEC(NH₄Ac 法)。结果见表 2。

表 2 盆栽土壤的基本理化性质

Table 2 Physiochemical properties of the soil used in potted experiment

土壤	pH	有机质/ g·kg ⁻¹	全氮/ g·kg ⁻¹	有效磷/ mg·kg ⁻¹	速效钾/ g·kg ⁻¹	CEC/ cmol·kg ⁻¹
茶园土	5.47	35.05	1.590	0.788	0.188	14.77

1.2.2 盆栽实验方案

将风干、压碎和过筛后的土壤装盆,按每盆 10 kg 称重装土。选择长势相对一致的茶苗,分别移栽到包括对照在内的 5 组处理花盆中,每盆栽种 6 株茶苗,每个处理重复 4 次,待茶苗长活之后再每盆定植 4 株,常规管理。供试茶苗为“平阳特早”(一年生),采自重庆茶叶研究所(永川)。

盆栽实验开始于 2007 年 10 月,茶苗预培养 1 个月后,于 2007 年 11 月中旬加入重金属处理溶液:先将盆中表层土壤搅拌松动,再缓慢均匀地加入配制好的重金属混合处理溶液(每盆定量 1 L 体积),在一周时间内分 3 次加入,尽量使处理液在土壤中分布均匀。

1.3 样品采集与处理

在不同培养期内(10、20、30 和 50 d),采集茶树根、茎和嫩叶 3 个部位,分别测定不同浓度处理下的茶树各部位和土壤中的重金属含量,以及土壤 pH 值。各茶树样品经分类处理后,用自来水和去离子水洗涤两次,尤其注意根部土壤要冲洗干净。茶树和土壤样品在室温下风干后,再于 85 ℃烘箱中烘干,其中茶树样品要杀青和灰化处理 4~5 h。取出烘干后的茶树的根、茎、老叶和嫩芽样品,以及对应的各土壤样品,冷却至室温后,用研钵研碎。

1.4 样品测定方法

1.4.1 分析方法

采用原子吸收分光光度法(AAS)测定茶树样品和土壤样品中的重金属含量。

1.4.2 样品测定

1.4.2.1 茶树中重金属的测定

取出烘干后茶树的根、茎、叶样品,冷却至室温后,用研钵研碎。准确称取样品 0.5 g,加入 10 mL HNO₃ 和 2 mL HClO₄ 浸泡过夜后在消煮炉内消解,低

温蒸发至大约 10 mL,再加 4 mL HClO_4 ,继续加热至冒白烟,消煮液呈清亮色,至近干时停止加热,用去离子水冲洗烧杯壁及小漏斗多次,洗液与残液合并,定容至 50 mL 容量瓶中。采用原子吸收分光光度法测定标准溶液、样品溶液和空白溶液的重金属,绘制标准曲线并计算分析结果。

1.4.2.2 土壤中重金属全量和有效态含量的测定

全量的测定:称 0.5 g 土样置于 100 mL 锥形瓶中,加数滴水润湿,加王水 10 mL,在电热板上加热微沸至有机物剧烈反应后,再加入 5 mL HClO_4 ,强火加热至冒白烟,土壤呈灰白色或淡黄色。冷却,加适量去离子水,小火加热除去 HClO_4 ,再用 1% HNO_3 温热溶解,溶解盐类后,用去离子水定容至 50 mL 容量瓶待测(原子吸收光谱法)。同时做平行与空白实验。

有效态含量测定:称取 2.5 g 土样,置于锥形瓶中,加 $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ HCl 25 mL,振荡 2 h,用滤纸过滤待测,同时做试剂空白。 Cu 用原子吸收法直接测定; Pb 、 Cd 和 Cr 测定:取 10 mL 滤液于 25 mL 比色管中,加碘化钾抗坏血酸溶液 2 mL,5 mL MIBK(甲基异丁酮,分析纯),振荡萃取 2 min 得到有机相,以试剂空白做参比,火焰原子吸收法测定。如果 Pb 、 Cd 和 Cr 含量高时,可以直接用火焰原子吸收法测定。

2 结果与讨论

2.1 茶苗对土壤重金属的静态吸收累积规律

2.1.1 盆栽茶树不同部位吸收累积重金属差异

表 3 给出了盆栽土壤添加 Cd 、 Cr 、 Pb 和 Cu 处理 30 d 后,茶树各部位重金属含量。可以看出,茶树各部位中重金属的含量均随土壤中重金属添加量的增加而呈升高趋势。以重金属 Cu 为例,与对照相比,处理 1($60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)中茶树根部 Cu 含量增加 117 倍,而茶叶中 Cu 含量只增加 10 倍,叶片中 Cu 增加量仅为根部 Cu 增加量的 8.5%,而茎部 Cu 含量也只增加 16 倍左右;处理 2($120 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)中茶树的根、茎和叶中 Cu 含量分别为对照的 521 倍、17 倍和 13 倍左右,叶片中 Cu 增加量仅为根部 Cu 增加量的 2.4%;处理 3($200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)中茶树根部 Cu 增加量为对照的 594 倍,而茎和叶的 Cu 增加量分别为 19 倍和 13 倍,叶片中 Cu 增加量是根部 Cu 增加量的 2.1%;处理 4($300 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)中根、茎和叶中 Cu 增加量分别为对照的 748 倍、43 倍和 17 倍,其中叶片中 Cu 增加量仅为根部 Cu 增加量的 2.3%。 Cd 、 Cr 和 Pb 3 种重金属在茶树各部位的吸收累积也有类似的变化趋势。由此看出,

茶树各部位对 4 种重金属的吸收累积能力有较大差异,各部位累积顺序为:根>茎>叶,这与石元值等^[10-11]研究茶树中 Cd 、 As 和 Pb 的累积特性和张连忠等^[12]研究苹果幼苗中 Cd 和 Cu 的分布特征与累积规律的结果基本一致。

上述结果表明,4 种重金属在茶树体内的迁移能力均较低,大部分被根部吸收固定,向地上部转移的量比较少,其中以 Cu 元素的活性最低,重金属从根部向叶片的平均迁移量仅为 2.0%左右,说明茶树的根部较茎和叶更易受到重金属的毒害,但它却为重金属向地上部分转移提供了良好的缓冲屏障。

表 3 茶树不同部位吸收累积重金属含量
Table 3 Amounts of Cd, Cr, Cu and Pb in tea tree

元素	添加量/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	茶树各部位重金属含量/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$		
		根	茎	叶
Cd	0(CK)	0.900	0.300	0.200
	1	14.90	1.700	1.300
	2	27.80	2.000	1.400
	6	30.60	2.200	1.500
	20	101.4	2.500	2.000
	150	1 340	126.0	90.00
Cr	0(CK)	2.500	0.600	0.110
	40	341.2	41.10	14.00
	80	1 070	45.10	18.00
	100	1 223	51.00	31.00
	150	1 340	126.0	90.00
	300	672.9	30.40	11.60
Pb	0(CK)	0.460	0.280	0.300
	40	49.40	17.40	18.40
	80	49.80	20.70	18.40
	100	56.50	22.20	20.10
	150	60.50	44.70	30.80
	300	672.9	30.40	11.60
Cu	0(CK)	0.900	0.700	0.670
	60	105.0	11.40	7.200
	120	465.9	11.70	8.400
	200	535.0	13.30	8.800
	300	672.9	30.40	11.60
	300	672.9	30.40	11.60

2.1.2 重金属在土壤-茶叶体系中的迁移累积

图 1 表示了培养 40 d 4 种重金属在土壤-茶叶体系中的迁移特征。茶树在不同浓度的外源重金属处理下,对 4 种重金属的吸收与累积有一定差异。随着重金属处理浓度的增加,茶树各部位吸收重金属的量呈现上升的趋势,重金属处理液加入量越多,升高趋势越明显。茶树各部位的重金属直接来源于根系对土壤中重金属的吸收,根部重金属含量随着添加量的增加而显著增加。以 Pb 为例,从处理 1 到处理 4,随着外

加 Pb 浓度的逐渐增加,茶树根部 Pb 累积量从 $49.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 增加到 $64.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 叶片 Pb 累积量从 $15.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 增加到 $23.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。说明茶叶中重金属含量与外源重金属量呈显著正相关关系,这与石元值等^[10]研究的茶叶对 Cd 和 As 的累积特征、杜应琼等^[13]研究的叶类蔬菜对 Pb、Cd 和 Cr 的累积特征基本一致。

一般来说,进入土壤中的重金属,可以通过植物根系的摄取迁移至植物体内,也可以向土壤下层移动。随着处理浓度的增加,茶叶中重金属含量呈现明显的增长趋势,这可能是由于土壤中加入不同浓度的重金属处理,增加了土壤中重金属的有效态含量,加大了茶树对重金属的吸收。

同时应当看到,4种重金属在茶叶中的吸收累积有一定的差异。采用一元线性回归方程拟合实验数据,结果表明茶叶中重金属累积量(C_t)与水培液中重金属加入量(C_0)之间呈明显的线性关系。获得的线性方程为:Cr, $C_t = 13.92C_0 + 5.4$ ($n=4, R^2 = 0.9952$); Pb, $C_t = 1.08C_0 + 14.8$ ($n=4, R^2 = 0.9084$); Cu, $C_t = 4.6C_0 - 0.05$ ($n=4, R^2 = 0.9051$); Cd, $C_t = 1.67C_0 - 0.85$ ($n=4, R^2 = 0.7778$)。图1中拟合曲线的斜率反映了茶叶对土壤中重金属吸收的程度大小,具有浓缩系数的生物学意义。获得的浓缩系数分别为:Cr, 13.92; Pb, 1.08; Cu, 4.6; Cd, 1.67,表明茶叶对4种重金属的吸收累积能力大小顺序为:Cr>Cu>Cd>Pb。

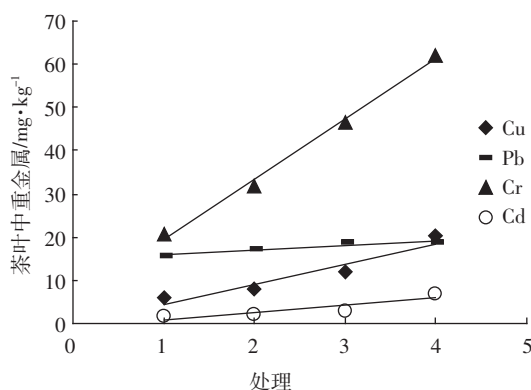


图1 茶叶重金属含量与重金属添加量的关系

Figure 1 Relationship between the amounts of heavy metals in tea leaf and the added amounts of heavy metals in soils

2.2 重金属在茶叶中的动态累积特征

图2表示了在同一浓度的外源重金属处理下,不同培养期茶叶中重金属累积的动态变化特征。可以看出,茶叶中4种重金属含量都随着培养时间的增加有不断增加的趋势,呈现一定的正相关关系,这与石元

值和马立峰^[11]研究的铅在茶树中的吸收累积特性、王国梁等^[14]研究的蔬菜地土壤中重金属含量随时间变化的规律一致。以茶叶中 Cr 含量为例,从培养 10 d 的 $5.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 增加到培养 40 d 的 $22.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,呈现出明显的增长趋势。茶叶中其他 3 种重金属含量也有类似的变化趋势。但是,随着培养时间的增加,4 种重金属在茶叶中的增加幅度不同,Cr 和 Pb 两种重金属在茶叶中的增幅较大,而 Cu 和 Cd 的增幅较小,说明 Cr 和 Pb 两种元素在茶树体内的吸收累积能力较强,同时也表明在 4 种重金属元素中,茶树对 Cr 元素的耐受能力最强。结果表明,茶叶对 4 种重金属的吸收累积能力不同,并且重金属在茶树体内的运输能力也有差异。随着培养时间的增加,茶叶对土壤中 4 种重金属的吸收量都有不同程度的增加,茶树根部和茎部对重金属的吸收也呈现相似的变化趋势。在本实验的重金属处理浓度下,在培养期内茶树的各生理机能基本上没有受到影响,仍对重金属有吸收和累积能力。因此,茶叶中重金属含量与培养时间呈显著正相关关系。

采用一元线性回归方程拟合实验数据,结果表明茶叶中重金属累积量($\ln C$)与培养时间(t)之间呈明显的线性关系。获得的线性方程为:Pb, $\ln C_t = 0.183t + 12.85$ ($R^2 = 0.9963$); Cr, $\ln C_t = 0.563t + 0.05$ ($R^2 = 0.9952$); Cu, $\ln C_t = 0.115t + 4.55$ ($R^2 = 0.9657$); Cd, $\ln C_t = 0.035t + 0.35$ ($R^2 = 0.9459$)。由此可见,重金属在茶叶中的累积过程符合一级动力学方程,可用模型 $\ln C_t = kt + A$ 来表示。

从上述线性方程可以获得 Cu、Pb、Cr 和 Cd 在茶叶中的累积速率常数分别为 0.115、0.183、0.563 和 0.035。结果表明,随着时间的推移,4 种重金属在茶叶中的累积速率有较大差异,其中 Cr 元素的累积速率

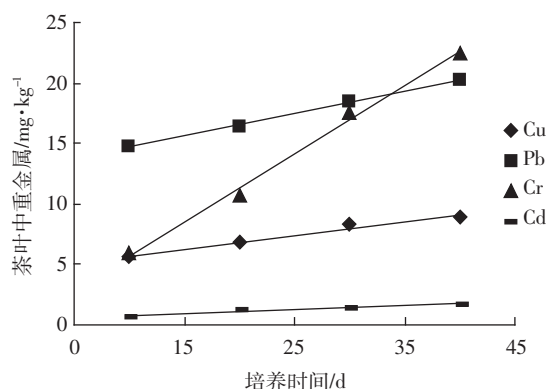


图2 不同培养时间茶叶中重金属含量吸收累积含量
Figure 2 Amounts of heavy metals in tea leaves at different culture times

最大,而 Cd 的累积速率最小。

2.3 茶叶中重金属含量与土壤 pH 值、有效态重金属含量的关系

图 3 给出了茶叶中重金属含量与土壤 pH 值、有效态重金属含量的关系。从图 3 可以看出,随着土壤中有效态重金属含量的增加,茶叶中重金属含量不断升高,而土壤 pH 值却随着时间的推移而呈现一定的下降趋势,这可能是茶树在生长过程中根系分泌的有机酸增加了土壤的酸度,同时也增加了土壤中重金属的生物有效性^[11],导致了茶叶中重金属累积量的增加。

茶树是喜酸植物。近年来,由于大量施用化肥,环境污染和酸雨加剧,茶园土壤酸化严重,影响土壤的理化特性和茶树对重金属的吸收^[15]。另外,茶树根系分泌的有机酸和呼吸作用产生的 H_2CO_3 也是导致茶园土壤酸度增加的重要原因^[16]。

重金属在土壤-茶叶体系中的累积迁移,一般取决于重金属在土壤中的存在形态和含量、茶树种类和环境条件等因素^[17]。此系统又是一个强有力的“活过滤器”,生命活动最为旺盛,可以通过一系列物理、化

学和生物学过程,对其中的重金属进行吸附、交换、拮抗和沉淀等净化作用,这些自然过程对重金属的生物效应都具有重要意义。

3 结论

(1)茶树不同部位吸收累积重金属有明显差异。茶树受到重金属污染时,大部分累积在根部,向茎和叶迁移的量较小。

(2)茶树各部位中重金属含量随着土壤中重金属添加量的增加而增加,二者呈显著正相关关系。随处理浓度的增加,4 种重金属的累积顺序为:Cr>Cu>Cd>Pb。

(3)土壤添加外源重金属处理后,重金属有效态含量显著增加,茶叶和茶树其他部位的重金属含量随着培养时间的增加而增加,4 种重金属中,Cr 的累积速率最大,Cd 最小。

(4)土壤中重金属有效态含量随着土壤 pH 的降低而增加。

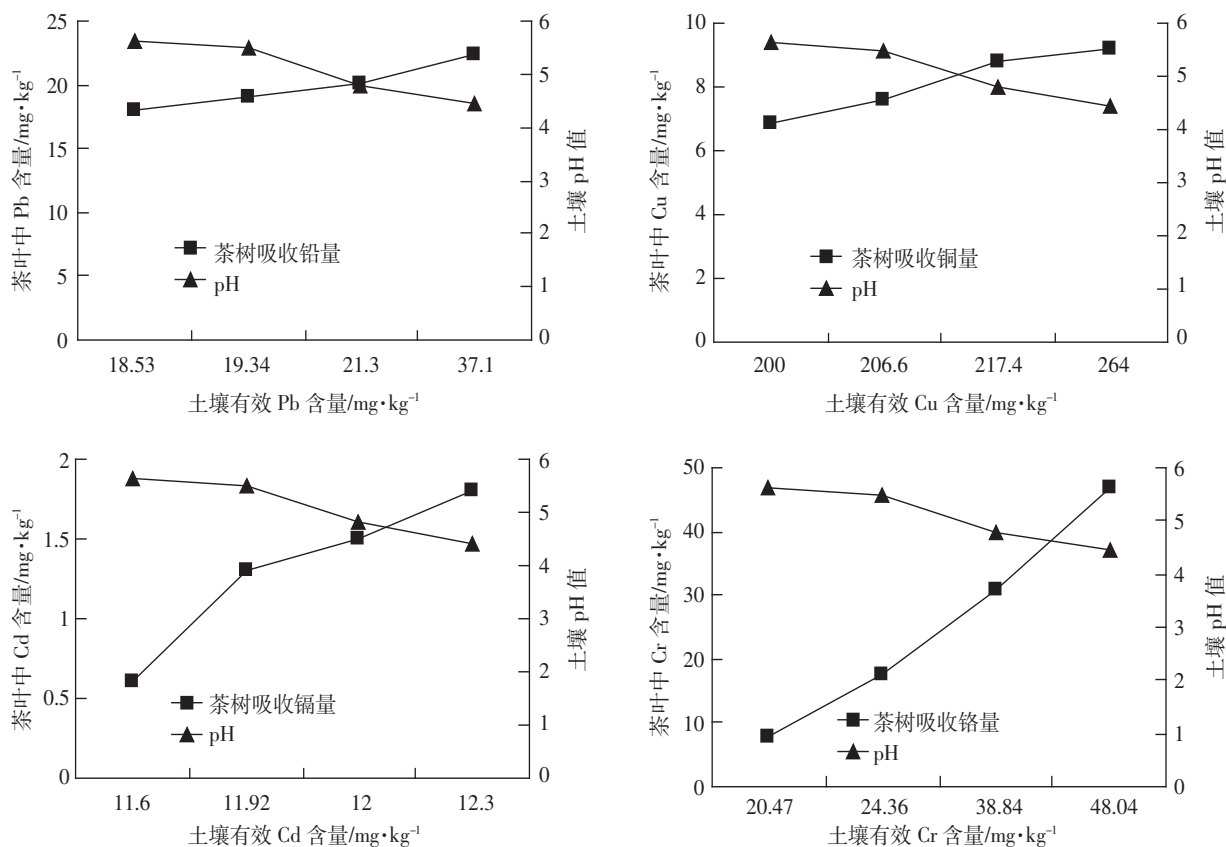


图 3 茶叶中重金属含量与土壤中有有效态重金属含量和 pH 的关系

Figure 3 Relationship between heavy metals in teas and available heavy metals and pH in soil

参考文献:

- [1] 汪庆华, 刘 新. 浅谈我国茶叶质量安全现状及应对措施[J]. 茶叶, 2006(2):66-69.
WANG Qing-hua, LIU Xin. Simply discussion of the tea quality safety situation and replying measures in China[J]. *Tea*, 2006(2):66-69.
- [2] 陈宗懋. 中国茶叶卫生质量面临的问题和对策[J]. 茶业通报, 2001, 23(1):7-10.
CHEN Zong-mao. The problems and measures of the quality safety situation of Chinese tea[J]. *Tea Communication*, 2001, 23(1):7-10.
- [3] 吴永刚, 姜志林, 罗 强. 公路边茶园土壤与茶树中重金属的积累与分布[J]. 南京林业大学学报, 2002, 26(4):39-42.
WU Yong-gang, JIANG Zhi-lin, LUO Qiang. The accumulation and distribution of heavy metals in soil of tea garden and tea tree on the highway[J]. *Journal of Nanjing Forestry University*, 2002, 26(4):39-42.
- [4] 吴新民, 潘根兴, 姜海洋, 等. 南京城市土壤的特性与重金属污染的研究[J]. 生态环境, 2003, 12(1):9-23.
WU Xin-min, PAN Gen-xing, JIANG Hai-yang, et al. Research on the property of urban soil and heavy metal pollution in Nanjing[J]. *Ecological Environment*, 2003, 12(1):9-23.
- [5] Jin C W, Zheng S J, He Y F, et al. Lead contamination in tea garden soils and factors affecting its bioavailability[J]. *Chemosphere*, 2005, 59(8):1151-1159.
- [6] 康孟利. 铅在茶树体内累积分布及其对茶树生育、生理影响的研究[D]. 杭州:浙江大学硕士学位论文, 2004. 1-56.
KANG Meng-li. Research on the accumulation and distribution of lead in tea tree, and its breeding physiological impact on the tea tree[D]. Hangzhou: Master's degree thesis in Zhejiang University, 2004. 1-56.
- [7] Shi Y Z, Ma L F, Han W Y, et al. Studies of the absorption and accumulation of lead in tea plant[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2003, 36(11):1272-1278.
- [8] Sha J Q, Zheng D X. Distributions of mineral elements in the organs of Huangdan, a cultivar for Oolong tea[J]. *Journal of Tea Science*, 1996, 16(2):141-146.
- [9] 杨剑虹. 土壤农化分析与环境监测[M]. 重庆:西南农业大学资源环境学院, 2004:7-61.
YANG Jian-hong. Agricultural analysis and environmental monitoring of soil[M]. Chongqing: College of Resources and Environment, Southwest Agricultural University, 2004:7-61.
- [10] 石元值, 阮建云, 马立峰, 等. 茶树中镉、砷元素的吸收累积特性[J]. 生态与农村环境学报, 2006, 22(3):70-75.
SHI Yuan-zhi, RUAN Jian-yun, MA Li-feng, et al. Characteristics of the absorption and accumulation of cadmium and arsenic in tea tree[J]. *Journal of Ecological and Rural Environment*, 2006, 22(3):70-75.
- [11] 石元值, 马立峰. 铅在茶树中的吸收累积特性[J]. 中国农业科学, 2003, 36(11):1272-1278.
SHI Yuan-zhi, MA Li-feng. Characteristics of absorption and accumulation of lead in tea plant[J]. *Agricultural Science in China*, 2003, 36(11):1272-1278.
- [12] 张连忠, 陆克国, 杨洪强. 苹果幼树铜、镉分布特征与累积规律研究[J]. 园艺学报, 2006, 33(1):111-114.
ZHANG Lian-zhong, LU Ke-guo, YANG Hong-qiang. Characteristics of distribution and accumulation law of copper and cadmium in apple seedling[J]. *Journal of Gardening*, 2006, 33(1):111-114.
- [13] 杜应琼, 何江华, 陈俊坚, 等. 铅、镉和铬在叶类蔬菜中的累积及对其生长的影响[J]. 园艺学报, 2003, 30(1):51-55.
DU Ying-qiong, HE Jiang-hua, CHEN Jun-jian, et al. Accumulation of lead, cadmium and chromium in frond vegetables, and the influence on vegetables growing[J]. *Journal of Gardening*, 2003, 30(1):51-55.
- [14] 王国梁, 周生路, 赵其国, 等. 菜地土壤剖面上重金属元素含量随时间的变化规律研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(1):80-83.
WANG Guo-liang, ZHOU Sheng-lu, ZHAO Qi-guo, et al. Variation law of the content of heavy metals in the vegetable soil profile as culture times changed[J]. *Journal of Agricultural Engineering*, 2006, 22(1):80-83.
- [15] 童启庆. 茶树栽培学[M]. (第三版), 北京:中国农业出版社, 1999:342-344.
TONG Qi-qing. Tea tree cultivation(The third edition)[M]. Beijing: China Agricultural Press, 1999:342-344.
- [16] 潘根生, 顾冬珍. 茶树栽培生理生态[M]. 北京:中国农业科学技术出版社, 2006.
PAN Gen-sheng, GU Dong-zhen. Physiology and ecology of cultivation of tea plant[M]. Beijing: China Press of Agricultural Science and Technology, 2006.
- [17] 张 辉. 土壤环境学[M]. 北京:化学工业出版社, 2006.
ZHANG Hui. Soil environmental science[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006.