

川西蒙山茶树中铅、镉元素的吸收累积特性

兰海霞, 夏建国

(四川农业大学资源环境学院, 四川 雅安 625014)

摘要:通过盆栽试验,探讨了川西蒙山茶树中铅、镉元素的吸收累积特性及茶叶生物量的变化。结果表明,铅、镉元素在茶树体内由高到低的分布秩序为:吸收根>嫩茎>成熟叶片>新梢(一芽二叶);茶树各部位(吸收根、嫩茎、成熟叶片)铅、镉含量与土壤铅、镉含量间有极显著正相关关系;复合污染下,镉对吸收根、嫩茎、春茶、夏茶累积铅具有协同作用,铅对吸收根累积镉具有协同作用,对茶树其他部位累积镉具有拮抗作用;铅处理下,春茶生物量无显著变化,夏茶生物量与铅浓度呈极显著负相关($P<0.01$);镉处理下,春茶生物量与镉浓度呈显著负相关($P<0.05$),夏茶生物量呈极显著负相关($P<0.01$)。当镉浓度达到 $60\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,夏茶植株中毒致死。

关键词:铅;镉;复合污染;吸收累积;生物量

中图分类号:X503.235 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-2043(2008)03-1077-07

Absorption and Accumulation of Lead and Cadmium in Mengshan Tea Plant

LAN Hai-xia, XIA Jian-guo

(College of Resources and Environment, Sichuan Agricultural University, Ya'an 625014, China)

Abstract: The absorption and accumulation of lead and cadmium in Mengshan tea plant and the change of the tea biomass were studied using pot experiments. The results showed that the distribution of lead and cadmium in the tea could be sequenced as: absorbing roots > stems > mature leaves > tea flush. The lead and cadmium contents in different parts of the tea plant (absorbing roots, stems and mature leaves) had a significantly positive correlation with the contents in the soil. Under combined pollution, cadmium had a synergism effect on the accumulation of lead in absorbing roots, stems, spring tea and summer tea, while, lead had a synergism effect on the accumulation of cadmium in absorbing roots and showed an antagonistic effect on the other parts of the tea plant. The change of the biomass of spring tea was not significant, but the biomass of the summer tea had a significantly negative correlation with the increasing of lead treatment concentration($P<0.01$). The biomass of spring tea had a negative correlation and the biomass of summer tea had a significantly negative correlation with the increasing of cadmium treatment concentration($P<0.01$). When the content of cadmium was $60\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, the summer tea plants were poisoned lethally.

Keywords: lead; cadmium; combined pollution; absorption and accumulation; biomass

铅、镉是人体并不需要的重金属元素,一旦过量就会对人体造成危害。但长期以来,由于铅、镉在食品中主要表现为慢性蓄积性危害,也未见有茶叶引起铅、镉中毒的报道,因此人们往往忽视了茶叶中铅、镉等有害元素对人体健康的影响^[1]。茶树作为我国重要的经济作物之一,从国内外茶叶发展与品种开发的趋

势看,茶叶生产引向“无公害自然茶”已成为必然。而有关报道表明,我国茶叶中铅、镉含量超标的问题较为严重且有加重的趋势。铅、镉含量的升高不仅影响茶树的生长、产量和品质,而且会进一步通过食物链进入人体,危害人类健康,同时也使茶叶出口受到很大的制约。茶叶一旦受到铅、镉污染就很难得到有效的控制,有关铅、镉单组分对植物生长及生理特性的影响研究国内外已有较多的报道^[2-7],而目前关于茶树中、茶园土壤中铅、镉的吸收累积特性的研究鲜有报道,我们还不清楚目前茶园土壤、茶树不同部位铅、镉元素含量以及他们的相关关系。同时,环境中的重金

收稿日期:2007-07-23

基金项目:四川省教育厅青年基金项目(2005B001);四川农业大学青年科技创新基金项目(2005)

作者简介:兰海霞(1982—),女,在读硕士,主要从事植物营养与环境方面的研究。E-mail:haixialan@163.com

通讯作者:夏建国 E-mail:xiajianguo@126.com

属往往又相伴存在，单一的铅或镉污染极为少见，因此，了解铅、镉在茶树中的吸收累积特性，及时发现污染源和途径是人们解决茶树铅、镉污染的根本所在。开展铅、镉及其复合污染后两种离子在茶树体内的累积分布特征很有必要。本文以茶树为实验材料，采用盆栽实验，对茶树及茶园土壤中铅、镉元素的分布特征及两者间的关系进行了研究，旨在为茶叶中铅、镉污染研究提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

盆栽实验于 2005 年 9 月至 2006 年 8 月在四川农业大学新区农场进行，供试茶叶品种为蒙山早熟 213 号，供试土壤为酸性紫色土，由白垩系夹关组砂岩坡积物发育而成，采于四川蒙顶山。将采回的土壤混合均匀作为供试土壤。随机取多个点的土壤混合，经风干，压碎，过筛后测定其基本理化性质（表 1）。

1.2 试验方法

2005 年 9 月，每盆称取供试土壤 16 kg，向土壤中分别施入铅、镉，进行铅、镉胁迫处理后装盆。铅以醋酸铅[Pb (CH₃COO)₂·3H₂O]形式添加，添加铅元素浓度分别设为 50、100、200、400、800、1 500 mg·kg⁻¹ 土；镉以硝酸镉[Cd (NO₃)₂·4H₂O]形式添加，添加镉元素浓度分别设为 0.5、2.5、5、10、30、60 mg·kg⁻¹ 土；铅镉复合污染选取铅 100、200、400 mg·kg⁻¹ 分别与镉 2.5、5、10 mg·kg⁻¹ 两两交互，其中以不加铅镉为对照（CK）

处理，每个处理重复 4 次。将土壤混合均匀，钝化 3 个月。2005 年 11 月底移栽长势一致（株高 40~50 cm）的茶树，每盆 2 株，2006 年 9 月结束实验。

1.3 样品制备

2006 年 4 月、7 月分别采集一芽二叶测定春茶、夏茶茶叶中铅、镉含量。2006 年 9 月实验结束时采集茶树新梢（夏茶）、成熟叶片（当年生）、嫩茎、吸收根等样品，测定茶树不同部位铅、镉含量。各样品经分类处理后分别用自来水、蒸馏水和去离子水各洗涤 2 次。清洗干净的茶叶样品在室温下风干后杀青，然后在 80 ℃的烘箱中烘干，粉碎后过 20 目筛供分析用；嫩茎、成熟叶片（当年生）及吸收根样品在清洗干净后直接放在 80 ℃的烘箱中烘干，粉碎后过 20 目筛后供分析用。

2006 年 4 月、7 月采茶树一芽二叶（分别为春茶、夏茶）30 个，称其鲜重，供茶叶生物量分析。

1.4 样品测定方法

茶树根、嫩茎及叶样品中的全铅全镉含量采用干灰化 ICP-OES 法测定。为保证处理和测定数据的准确性，测定做 3 次重复。

2 结果与讨论

2.1 铅在茶树中的分布累积特性

从盆栽试验的结果看，茶树各部位中的铅含量随土壤铅离子添加量的增加而呈现出升高的趋势。但增幅并不一致（表 2）。茶树受到不同浓度铅污染后，吸

表 1 供试土壤养分含量状况
Table 1 Nutrient contents of the experimental soil

土壤类型	有机质/g·kg ⁻¹	全氮/g·kg ⁻¹	碱解氮/mg·kg ⁻¹	速效磷/mg·kg ⁻¹	速效钾/mg·kg ⁻¹	pH 值	全铅/mg·kg ⁻¹	全镉/mg·kg ⁻¹
酸性紫色土	10.65	1.24	45.56	2.93	45.32	4.73	31.25	0.21

表 2 茶树不同部位中铅的累积量 (mg·kg⁻¹)
Table 2 The accumulation amounts of lead in different parts of the tea plant

铅处理	铅元素含量				
	春茶（一芽二叶）	吸收根	嫩茎	成熟叶	夏茶（一芽二叶）
CK	0.56±0.02	33.46±5.84	12.37±0.82	3.26±1.20	0.64±0.03
50	0.61±0.04	163.98±18.42	15.34±0.97	4.43±0.06	1.34±0.05
100	0.65±0.01	544.55±26.34	28.34±1.35	5.54±0.86	1.79±0.01
200	0.81±0.01	1 258.75±39.95	38.35±2.36	6.29±1.82	2.02±0.01
400	0.86±0.03	2 467.00±41.32	53.58±3.63	8.80±0.44	2.47±0.03
800	0.92±0.02	5 119.50±21.89	86.37±3.04	11.33±0.78	3.01±0.02
1 500	1.30±0.05	9 212.50±43.25	98.68±3.37	27.15±1.24	3.53±0.05

注：表中数据均为平均值±标准差，下同。
Note: Values in the table are means±SD, the same below.

收根的累积量最大,新梢的累积量最小。茶树各部位的铅累积量顺序为:吸收根>嫩茎>成熟叶片>新梢(一芽二叶),反映出整个茶树体自下而上累积量明显减少,铅在茶叶新梢中的累积最少。这是因为铅元素在茶树体内活性较低,迁移能力较弱,大部分运移到根部即被固定,向地上部运输的量较低,同时茶树自下而上各部位对阻止土壤中的铅向茶树新梢中转移发挥了重要的缓冲及屏障作用^[8]。这可能主要是因为进入茶树体内的铅主要沉积于导管壁及木质部细胞中所致^[9]。本试验研究结果与在其他植物上的研究结果基本一致,许多研究都认为铅主要积累在植物根部,在重金属污染环境中的植物更大比例地积累和富集于根部和地下部分。在试验浓度范围内,茶树根部铅浓度显著上升,茶树无显著毒害症状。

为了阐述铅在茶树中的累积与分配特征,对其变化趋势进行了方程拟合(表 3)及显著性检验,得出:随着铅处理浓度的增加,春茶(一芽二叶)、吸收根、嫩茎、成熟叶片,夏茶(一芽二叶)中铅含量均极显著增加,决定系数 R^2 分别为 0.944、0.999、0.995、0.986、0.930,均达到极显著水平。

2.2 镉在茶树中的分布累积特性

从盆栽试验的结果看,茶树各部位中的镉含量随

土壤镉离子添加量的增加而呈现出升高的趋势(表 4)。茶树受到不同浓度镉污染后,吸收根的累积量最大,新梢的累积量最小。茶树各部位的镉累积量顺序:吸收根>嫩茎>成熟叶片>新梢(一芽二叶)。这可能因为镉是强累积性元素,茶树根系分泌物以及通过根系分泌物诱导的一系列变化(如:pH 的变化)有助于吸收根对镉的吸收,且植物螯合剂刺激根部液泡贮藏镉并防止根部吸收的镉向外运输^[10]。相关研究也表明,细胞壁的束缚和植物胺合肽对镉的钝化是解释重金属镉向外运输差异的重要方面。镉元素在茶树体内活性较低,到达根部的大部分能被根部所固定,向地上部运输的较少,且茶树自下而上各部位对阻止土壤中的镉向茶树新梢中转移发挥了重要的缓冲及屏障作用^[8,11]。整个茶树体自下而上累积量明显减少。同时也说明茶树根部最易受镉毒害,这与对一些一年生作物的研究结果相一致,但有关小麦、玉米及水稻的研究结果表明,一年生根系更易受镉等的污染^[4,11]。在试验浓度范围内,茶树根部镉含量随添加浓度的增加快速地升高,在镉浓度达到 $10\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,根部镉含量增幅趋于平缓,当镉浓度达到 $60\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,夏茶植株已中毒致死,说明镉浓度达到 $10\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,茶树根部已受到毒害,根部已不能大量的吸收更多的镉,从

表 3 不同浓度铅处理下茶树累积铅的曲线拟合模型

Table 3 Accumulating models of lead in the tea plant treated with different lead concentrations

处理类型	茶树部位	方程	R^2
铅	春茶(一芽二叶)	$Y_1=-5.1\text{E}-8x_1^2+0.01x_1+0.609$	0.944**
	吸收根	$Y_2=6.216x_1-22.654$	0.999**
	嫩茎	$Y_3=-4.8\text{E}-8x_1^2+0.130x_1+12.351$	0.995**
	成熟叶片	$Y_4=6.49\text{E}-6x_1^2+0.05x_1+4.380$	0.986**
	夏茶(一芽二叶)	$Y_5=-1.6\text{E}-6x_1^2+0.04x_1+1.097$	0.930**

注:Y 代表茶树各部位累积铅量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, x_1 表示铅处理浓度/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; F 检验 ** $P<0.01$, * $P<0.05$ 。

Note: Y denotes the accumulation amount of lead in different parts of tea plant, x_1 denotes the concentration of lead; F test, ** $P<0.01$, * $P<0.05$.

表 4 茶树不同部位中镉的累积量 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

Table 4 The accumulation amounts of cadmium in different parts of the tea plant

镉处理	镉元素含量				
	春茶(一芽二叶)	吸收根	嫩茎	成熟叶片	夏茶(一芽二叶)
CK	0.03±0.01	25.92±3.54	0.52±0.03	0.12±0.01	0.06±0.02
0.5	0.10±0.01	104.30±6.54	1.51±0.05	0.42±0.01	0.20±0.03
2.5	0.12±0.00	383.40±16.34	1.43±0.01	0.71±0.01	0.23±0.04
5.0	0.17±0.10	677.50±20.14	1.96±0.01	0.95±0.03	0.54±0.02
10.0	0.19±0.01	1 235.00±22.63	2.13±0.03	1.64±0.05	1.56±0.05
30.0	0.20±0.00	1 267.00±25.34	5.64±0.02	3.05±0.41	1.83±0.06
60.0	0.23±0.01	—	—	—	—

而影响了镉向上的迁移转化。

为了说明镉在茶树中的累积与分配特征,对其变化趋势进行了方程拟合 (表 5)及显著性检验,可以得出,随镉处理浓度的增加,吸收的根、嫩茎、成熟叶片中的镉含量均极显著增加, 决定系数 R^2 吸收根为 0.999、嫩茎为 0.994,成熟叶片为 0.994,达到极显著水平;春茶、夏茶中镉的含量显著增加,决定系数 R^2 春茶为 0.916、夏茶为 0.951,达到显著水平。

2.3 铅镉胁迫在茶树体内的吸收累积特性

铅、镉交互作用对茶树不同部位累积铅、镉的影响是明显的 (表 6、表 7)。茶树内不同部位的铅、镉含量分布为:吸收根>嫩茎 (或成熟叶片)>一芽二叶。交

互浓度越高时,各部位的铅、镉含量越低,这可能因为茶树的某些部位已受到不同程度的毒害,从而影响了铅、镉向植物体上部的迁移。

交互处理下茶树累积铅的量以不加镉为对照 (CK), 交互处理下茶树累积镉的量以不加铅为对照 (CK)。在对照处理下,春茶中铅的含量增加缓慢,铅浓度在 $200\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以下时, 镉的加入抑制春茶中铅的吸收,且含量均小于对照,当铅浓度在 $400\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,春茶中铅含量大于对照;镉的加入同样也抑制茶树根对铅的吸收,对照中根铅的含量大多都大于加入镉后根中铅的含量;当铅浓度不变时,随着镉浓度的增加,茶树嫩茎中铅的含量都逐步减少,且都小于对

表 5 不同浓度镉处理下茶树累积镉的曲线拟合模型
Table 5 Accumulating models of cadmium in the tea plant treated with different cadmium concentrations

处理类型	茶树部位	方程	R^2
镉	春茶 (一芽二叶)	$Z_1=8.65E-6x_2^3-0.001x_2^2+0.022x_2+0.064$	0.916*
	吸收根	$Z_2=-3.892x_2^3+158.492x_2+16.714$	0.999**
	嫩茎	$Z_3=0.003x_2^3+0.037x_2+1.488$	0.994**
	成熟叶片	$Z_4=-0.002x_2^2+0.163x_2+0.242$	0.994**
	夏茶 (一芽二叶)	$Z_5=-0.04x_2^2+0.178x_2-0.024$	0.951*

注: Z 代表茶树各部位累积镉量, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, X_2 表示镉处理浓度, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; F 检验 ** $P<0.01$, * $P<0.05$ 。
Note: Z denotes the accumulation amount of cadium in different parts of tea plant, X_2 denotes the concentration of cadium; F test, ** $P<0.01$, * $P<0.05$.

表 6 不同的铅、镉浓度组合下茶树累积铅的量 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
Table 6 The accumulation amount of lead in the tea plant treated with the different combinations of lead and cadmium concentrations

茶树部位	镉浓度	铅浓度			
		0	100	200	400
春茶 (一芽二叶)	CK	0.56±0.02	0.65±0.01	0.81±0.01	0.86±0.03
	2.5	0.49±0.02	0.31±0.01	0.62±0.01	1.23±0.03
	5	0.12±0.00	0.40±0.02	0.45±0.01	1.21±0.04
	10	0.21±0.00	0.56±0.02	0.53±0.01	2.01±0.01
吸收根	CK	33.46±5.84	544.55±26.34	1 257.75±39.95	2 467.00±41.32
	2.5	46.72±2.34	391.20±13.12	1 109.50±23.45	1 547.50±12.34
	5	32.62±3.01	333.58±12.12	878.75±21.49	2 341.50±12.38
	10	16.63±2.01	397.80±11.02	1 127.75±23.14	2 422.00±21.34
嫩茎	CK	12.37±0.82	28.34±1.35	38.35±2.36	53.58±3.63
	2.5	7.02±0.10	12.68±0.21	14.35±0.34	15.34±0.14
	5	6.34±0.21	11.37±0.64	13.67±0.61	14.68±0.36
	10	5.94±0.25	10.25±0.80	12.34±0.24	13.58±0.29
成熟叶片	CK	3.26±1.20	5.54±0.86	6.29±1.82	8.80±0.44
	2.5	6.56±0.09	6.07±0.09	2.00±0.02	2.42±0.03
	5	5.80±0.06	4.67±0.10	3.61±0.06	0.80±0.02
	10	5.28±0.05	3.57±0.05	2.27±0.04	0.75±0.01
夏茶 (一芽二叶)	CK	0.64±0.03	1.79±0.01	2.02±0.01	2.47±0.03
	2.5	5.80±0.61	0.24±0.01	0.84±0.01	1.62±0.01
	5	4.37±0.34	0.82±0.00	1.34±0.02	1.86±0.00
	10	3.97±0.38	0.90±0.01	1.56±0.01	2.34±0.04

表 7 不同的铅、镉浓度组合下茶树累积镉的量 (mg·kg⁻¹)

Table 7 The accumulation amount of cadmium in the tea plant treated with different combinations of lead and cadmium concentrations					
茶树部位	镉浓度	铅浓度			
		CK	100	200	400
春茶（一芽二叶）	CK	0.03±0.01	0.01±0.00	0.01±0.00	0.03±0.00
	2.5	0.12±0.00	0.12±0.01	0.13±0.00	0.28±0.01
	5	0.17±0.10	0.13±0.02	0.14±0.01	0.27±0.01
	10	0.19±0.01	0.11±0.00	0.16±0.02	0.33±0.01
吸收根	CK	25.92±3.54	19.99±2.14	32.55±1.37	22.78±2.34
	2.5	383.40±13.34	568.50±13.24	521.05±24.56	777.00±34.24
	5	677.50±20.14	892.50±12.38	849.75±34.21	967.75±21.67
	10	1 235.00±22.63	1 691.25±23.64	1 542.50±12.89	1 174.00±34.25
嫩茎	CK	0.52±0.03	1.63±0.01	1.34±0.02	0.94±0.01
	2.5	1.43±0.01	1.63±0.02	1.37±0.01	0.96±0.00
	5	1.96±0.01	1.72±0.01	1.54±0.01	1.02±0.05
	10	2.13±0.03	1.81±0.01	1.63±0.05	1.31±0.02
成熟叶片	CK	0.12±0.01	0.08±0.00	0.04±0.00	0.04±0.00
	2.5	0.71±0.01	0.27±0.01	0.24±0.00	0.19±0.01
	5	0.95±0.03	0.23±0.01	0.31±0.01	0.11±0.01
	10	1.64±0.05	0.44±0.02	0.47±0.01	0.14±0.00
夏茶（一芽二叶）	CK	0.06±0.02	0.00±0.00	0.04±0.00	0.13±0.01
	2.5	0.23±0.04	0.13±0.02	0.19±0.00	0.15±0.01
	5	0.54±0.02	0.23±0.01	0.21±0.01	0.20±0.00
	10	1.56±0.05	0.16±0.02	0.22±0.01	0.21±0.02

照,嫩茎中铅的含量随着铅浓度的增加而增加,但增加量小于对照;成熟叶片中铅的含量随镉的加入而呈下降趋势,而对照是呈上升的趋势;加入镉后,夏茶中铅的含量随铅浓度的增加呈先减少后增加的趋势,且当铅浓度大于 100 mg·kg⁻¹ 时,夏茶中铅的含量均小

于相应的对照。由此可以说明,在试验浓度范围内,镉的加入可以有效地控制成熟叶片和夏茶对铅的吸收;虽然嫩茎和根中铅的含量同样在增加,但都小于不加镉时的含量 (表 6)。

在对照处理下,春茶中镉的累积量随镉的添加量

表 8 铅、镉添加量与茶树植株累积铅、镉量的多元回归模型

Table 8 Multivariate regression models between accumulation amount of lead and cadmium in the tea plant and added contents of lead and cadmium					
处理类型	茶树部位	数学模型	R ²	F	标准回归系数
铅含量	春茶	Y ₁ =0.827-0.004 X ₁ +0.001 X ₁ X ₂	0.711**	15.980	X ₁ : -0.484; X ₁ X ₂ : 1.044
	吸收根	Y ₂ =-34.085+5.399 X ₁ +0.031 X ₁ X ₂	0.937**	97.249	X ₁ : 0.944; X ₁ X ₂ : 0.011
	嫩茎	Y ₃ =10.091+0.078 X ₁ -0.009 X ₁ X ₂	0.594**	9.507	X ₁ : 0.935; X ₁ X ₂ : -0.773
	成熟叶片	Y ₄			不显著
镉含量	夏茶	Y ₅ =5.190+0.002 X ₁ -0.002 X ₁ X ₂	0.581**	8.996	X ₁ : 0.140; X ₁ X ₂ : -0.839
	春茶	Z ₁ = 0.073+0.06 X ₂ +5.07E-005 X ₁ X ₂	0.586**	9.190	X ₂ : 0.253; X ₁ X ₂ : 0.586
	吸收根	Z ₂ =127.411+132.552 X ₂ +0.005 X ₁ X ₂	0.904**	61.444	X ₂ : 0.944; X ₁ X ₂ : 0.011
	嫩茎	Z ₃ =1.321+0.087 X ₂ +0.000 X ₁ X ₂	0.674**	13.426	X ₂ : 0.974; X ₁ X ₂ : -0.864
	成熟叶片	Z ₄ =0.056+0.089 X ₂ +0.000 X ₁ X ₂	0.561**	8.317	X ₂ : 0.927; X ₁ X ₂ : -0.699
	夏茶	Z ₅ =0.128+0.113 X ₂ +0.000 X ₁ X ₂	0.725**	17.156	X ₂ : 1.031; X ₁ X ₂ : -0.859

注:F 检验 **P<0.01, *P<0.05;Y 代表茶树各部位累积铅量,mg·kg⁻¹,Z 代表茶树各部位累积镉量,mg·kg⁻¹,X₁ 表示铅处理浓度,mg·kg⁻¹,X₂ 表示镉处理浓度 mg·kg⁻¹。

Note: F test, **P<0.01, *P<0.05; Y denotes the accumulation amount of lead in different parts of tea plant, Z denotes the accumulation amount of cadmium in different parts of tea plant, X₁ denotes the concentration of lead, X₂denotes the concentration of cadmium.

增加而增加(表 7),加入铅浓度小于 $200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时春茶中镉的含量先增加后减少,且小于对照;加入铅后,根中镉的含量呈上升趋势,但都高于对照中镉的含量;在对照中,嫩茎中镉的含量是明显增加的,加入铅后,嫩茎中镉含量增加缓慢,且当镉浓度达到 $2.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,其中的含量大多都小于对照;成熟叶片和夏茶中镉的含量都随铅的加入而减少,都小于对照。说明铅的加入可以抑制嫩茎、成熟叶片和夏茶对镉的吸收,但有利于根对镉的吸收。

为明晰铅和镉存在怎样的交互作用,对茶树不同部位累积铅、镉的量与土壤中铅、镉的添加量进行多元回归分析(表 8)及显著性检验。结果表明,除成熟叶片外,茶树不同部位铅、镉含量都与铅、镉元素添加量呈极显著正相关。交互处理中,土壤中铅的含量对茶树吸收根、嫩茎累积铅起着主要的作用,标准回归系数分别为 0.944、0.935,铅-镉交互促进了铅的累积,但作用相对于铅小,其标准回归系数为 0.011, -0.773,铅-镉交互同样促进春茶、夏茶中铅的累积,但作用相对于铅大,表明镉对茶树累积铅具有协同作用;成熟叶片中铅的含量与铅、镉添加量所建立的方程不显著。土壤中镉的含量对茶树吸收根累积镉,起着主要的作用,标准回归系数分别为 0.944,铅-镉交互作用促进了镉的累积,但作用相对于镉小,其标准回归系数为 0.011,表明铅对茶树吸收根累积镉具有协同作用;铅-镉交互对茶树其他部位累积镉具有较强的抑制作用,表明铅对茶树其他部位累积镉具有拮抗作用。

2.4 铅、镉胁迫对茶树生物量(一芽二叶)的影响

铅处理对茶叶鲜重的影响较为明显。春茶鲜重相对对照都有缓慢增加的趋势,但是在整个处理期间变化并不显著;最大增加量是对照的 102.12%;夏

茶鲜重随着铅浓度的升高而明显下降,其相关系数 $r=-0.937$,为极显著负相关 ($P<0.01$)。最小量是对照的 75.45%,铅浓度为 $200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时达到最大量,是对照的 101.60% (图 1a)。春茶鲜重随着镉浓度的升高而明显下降,其相关系数 $r=-0.867$,为显著负相关 ($P<0.05$);夏茶鲜重随着镉浓度的升高而明显下降,其相关系数 $r=-0.878$,为极显著负相关 ($P<0.01$)。土壤镉浓度为 $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时春茶生物量最高,比对照增加了 14%。在其他处理浓度间都随浓度的增加减少;夏茶生物量随土壤镉浓度的增加而减少,镉浓度为 $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时减少量最少。超过 $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,茶树植株基本无新叶,当镉浓度达到 $60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,夏茶植株已中毒致死(图 1b)。

铅、镉对春茶的生长有一定的刺激作用。春茶未受到严重影响,并没有发现茶树产生毒害症状。这可能是因为铅、镉在土壤中比较稳定,不易移动,同时茶树有较强的保水能力,对其也具有较高的耐受性,低剂量或短时间的胁迫可能对茶树的生长有一定的刺激作用。这与石元值等^[12]的观点一致。培养 8 个月后,土壤中铅、镉浓度过高时抑制茶树生长,生物量显著降低,这是因为铅、镉作为非必须元素,在植物体内累积到一定程度,会影响细胞分裂和生长,干扰营养物质的吸收和分配^[3],引起植物光合作用、呼吸作用、氮素代谢、核酸代谢等一系列生理生化过程的紊乱^[2,13-15],导致氧化过程、光合过程及脂肪代谢过程强度减弱。另一方面,铅可促使水的吸收量减少,耗氧量增大,从而阻碍植物生长,生物量减少,甚至引起植物死亡。

3 结论

(1)茶树受到不同浓度铅污染后,吸收根的累积

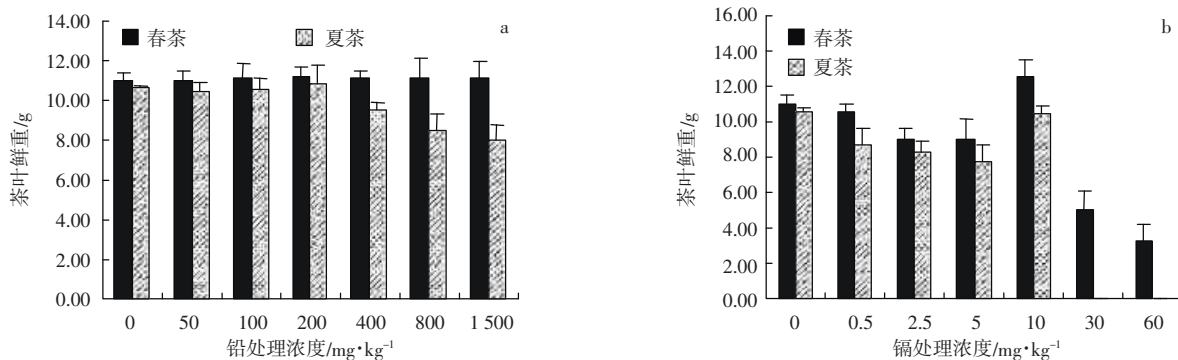


图 1 铅、镉胁迫对茶树生物量(一芽二叶)的影响

Figure 1 Effects of lead, cadmium stress on yield of tea

量最大,新梢的累积量最小。各部位的铅累积量顺序为:吸收根>嫩茎>成熟叶片>新梢(一芽二叶)。不同部位铅含量与土壤中铅含量均达到极显著水平。

②茶树受到不同浓度镉污染后,各部位的镉累积量顺序为:吸收根>嫩茎>成熟叶片>新梢(一芽二叶)。随镉处理浓度的增加,吸收根、嫩茎、成熟叶片中镉含量均极显著增加,春茶、夏茶中镉的含量显著增加。当镉浓度达到 60 mg·kg⁻¹ 时,夏茶植株已中毒致死。

③复合污染对茶树体内铅、镉含量有着不同的影响,在试验浓度范围内,镉的加入可以有效的控制成熟叶片和夏茶对铅的吸收;铅的加入可以抑制嫩茎、成熟叶片和夏茶对镉的吸收,但有利于根对镉的吸收。

④铅胁迫处理下,春茶生物量有缓慢增加的趋势,但处理期间变化并不显著,春茶与镉浓度呈显著负相关 ($P<0.05$);夏茶生物量与土壤添加的铅、镉浓度都呈极显著负相关 ($P<0.01$);实验浓度范围内,铅对茶树无明显毒害症状,而当镉浓度达到 60 mg·kg⁻¹ 时,夏茶植株已中毒致死。

参考文献:

[1] 石元值,马立峰,韩文炎,等. 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 Y Z, MA L F, HAN W Y, et al. Studies of the absorption and accumulation of lead in tea plant[J]. *Seienfia Azricuhura Sinica*, 2003,36(11): 1272-1278.

[2] Van Assche F V, Clijs ter H. Effects of metal on enzyme activity in plants[J]. *Plant Cell Envion*, 1990,13:195-206.

[3] 任安芝,高玉葆,刘 爽,铬、镉、铅胁迫对青菜叶片几种生理生化指标的影响[J].应用与环境生物学报,2000,6(2):112-116.
REN A Z, GAO Y B, LIU S. Effects of Cr and Pb on free proline content in leaves of *Brassica chinensis* L[J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2000,6 (2):112-116.

[4] 孙贤斌,李玉成,王 宁.铅在小麦和玉米中活性形态和分布的比较研究[J].农业环境科学学报,2005,24(4):666-669.
SUN X B, LI Y C, WANG N. Comparisons on active chemical fornl and distribution of lead in wheat and corn[J]. *Journal of Agro-Environment Scienc*, 2005,24(4):666-669.

[5] 曾路生,廖 敏,黄昌勇,等.镉污染对水稻土微生物量、酶活性及水稻生理指标的影响[J].应用生态学报,2005,16(11):2162-2167.
ZENG L S, LIAO M, HUANG C Y, et al. Effects of Cd contamination on

paddy soil microbial biomass and enzyme activities and rice physiological indices [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005,16(11):2162-2167.

[6] Koeppe D E. Lead: understanding the minimal toxic of lead in plants[A]. Lepp N W. Effect of heavy Metal Pollution on plants [C].London New Jersey:App Sci Pub,1981.55-57.

[7] Cieslinski G,Neilsen G H,Hogue E J. Effect of soil cadmium application and pH on growth and cadmium accumulation in roots, leaves and fruit of strawberry plants[J].*Plant and Soil*,1996,180:67-276.

[8] 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 Y Z, RUAN J Y, MA L F, et al. Absorption and accumulation of As and Cd in tea [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2006,22 (3):70-75.

[9] 顾淑华,旭 军.红壤性水稻土铅环境容量研究[J].环境科学学报, 1989, 9(1) :27-36 .
GU S H, XU J. Studies of the Environmental capacity of Lead in Red paddy soil[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1989, 9(1) :27-36.

[10] 李 瑛,张桂银,李洪军,等.根际土壤中 Cd、Pb 形态转化及其植物效应[J].生态环境,2004,13(3):316-319.
LI Y, ZHANG G Y, LI H J, et al. Speciation transformation of Cd、Pb in rhizosphere and their effects on plant [J]. *Ecology and Environment*, 2004,13(3):316-319.

[11] 蔡保松,张国平.大、小麦对镉的吸收、运输及在籽粒中的积累[J].麦类作物学报, 2002,22(3):82-86.
CAI B S, ZHANG G P. Cadmium absorption and mobilization in barley and wheat plants and its accumulation in grains [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2002,22(3):82-86.

[12] 石元值.茶树中铅元素的吸收累积特性及污染来源研究[D].杭州:浙江大学,2003.
SHI Y Z. Studies of the absorption and accumulation and the source of pollution of lead in tea plant [D].Hang Zhou: Zhejiang University, 2003.

[13] 杨丹慧.重金属对高等植物光合膜结构和功能的影响[J].植物学通报,1991,8(3):26-29.
YANG D H. Effects of heavy metals on photosynthetic membrane structure and function of higher plants [J]. *Botany Bulletins*, 1991,8(3):26-29.

[14] 周 鸿,曲仲湘,王焕校.铅对几种农作物的影响及迁移积累初探[J].环境科学学报,1983,3(3):222-233.
ZHOU H, QU Z X, WANG H X. Effects of Lead on some crops and the initial exploration of absorption and accumulation[J]. *Journal of Environmental Science*, 1983,3(3):222-233.

[15] 张义贤.重金属对大麦 (*Hordeum vulgare*) 毒性的研究[J].环境科学学报,1997,17(2):199-205.
ZHANG Y X. Studies of heavy metals on toxicity of *Hordeum vulgare*[J]. *Journal of Environmental Science*, 1997,17(2):199-205.