

大气沉降对茶叶重金属积累的影响

王 阳¹, 李宝刚², 章明奎³

1. 温州科技职业学院, 浙江温州 325006

2. 杭州市江干区城市管理监管中心, 杭州 310021

3. 浙江大学环境与资源学院; 浙江省亚热带土壤与植物营养重点研究实验室, 杭州 310058

摘要 针对大气沉降对茶叶重金属积累的影响, 选择了 2 个有明显污染源(分别受交通污染和工业污染影响)和 1 个无明显污染源(主要受大气循环物质沉降的影响)的 3 个茶园, 采用覆膜和露天对比研究了茶叶中重金属 Pb、Cd 和 Cr 的积累状况。结果表明, 试验期间大气沉降对茶树新叶的重金属积累影响较大, 对老叶中重金属积累的影响较小; 交通污染对茶叶 Pb 和 Cd 积累有明显的影响, 工业污染对茶叶 Pb、Cd 和 Cr 积累有明显的影响, 影响程度随距离公路或工厂距离的增加而下降; 无明显污染源区大气沉降对茶叶 Pb 积累也有一定的影响, 随海拔高度增加而下降。覆膜后, 交通污染区新叶中 Pb 和 Cd 和 Cr 积累分别降低了 27%—46%、21%—36% 和 13%—33%; 工业污染区新叶中 Pb、Cd 和 Cr 积累分别降低了 22%—44%、23%—32% 和 24%—29%; 而无明显污染源区新叶中 Pb 含量下降了 13%—19%。结果认为, 大气沉降是茶叶重金属的重要来源之一, 控制茶区大气污染和避免在大气污染区种植茶叶对减免茶叶重金属积累有重要作用。

关键词 大气沉降; 茶叶; 重金属积累; 污染

中图分类号 X131, X53

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.21.009

Effect of Atmospheric Deposition on Heavy Metal Accumulation in Tea Leaves

WANG Yang¹, LI Baogang², ZHANG Mingkui³

1. Wenzhou Vocational College of Science and Technology, Wenzhou 325006, Zhejiang Province, China

2. Monitor and Management Center of City Management, Jianggan District, Hangzhou 310021, China

3. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Subtropical Soil and Plant Nutrition; College of Natural Resource and Environmental Sciences, Zhejiang University, Hangzhou, 310058, China

Abstract Experiments were carried out to test the effects of atmospheric deposition on the heavy metal accumulation in tea leaves. The experiments concern three sites with different pollution sources of atmospheric deposition, including traffic pollution, industrial pollution and non-point pollution areas, and are under the conditions of open air and plastic film cover. The results show that the atmospheric deposition has a notable effect on the heavy metal accumulation in young tea leaves, but not for old tea leaves. The traffic pollution increases significantly the accumulation of Pb and Cd in young tea leaves. The industrial pollution increases significantly the accumulation of Pb, Cd, and Cr in young tea leaves, with its effect being decreased with the increase of the distance from a highway or factory. The altitude also affects the accumulation of Pb in the young tea leaves in the non-point pollution area. As compared with these, the accumulation of Pb, Cd and Cr in young tea leaves under plastic film cover conditions is decreased by 27%—46%, 21%—36% and 13%—33% for traffic pollution area, and 22%—44%, 23%—32%, and 24%—29% for industrial pollution area. The accumulation of Pb in young tea leaves under plastic film cover conditions in the non-point pollution area is 13%—19% lower than those under the open air condition. The contribution of atmospheric deposition to the accumulation of heavy metals in tea leaves is greater in industrial pollution

收稿日期: 2010-11-04; 修回日期: 2011-06-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(41071145, 40471064)

作者简介: 王阳, 副教授, 研究方向为土壤与肥料, 电子信箱: wangyangwenzhou@163.com; 章明奎(通信作者), 教授, 研究方向为土壤地理与土壤污染物质生物地球化学, 电子信箱: mkzhang@zju.edu.cn

areas than in traffic pollution areas. It is very important to control the atmospheric pollution in the tea production area and not to plant teas in the area with heavy atmospheric pollutions.

Keywords atmospheric deposition; tea leaves; heavy metal accumulation; pollution

0 引言

茶叶是中国重要的天然饮料,其质量状况深受人们的关注。研究表明,土壤和大气污染使许多地方的茶叶生产暴露于污染环境中,严重危害了茶叶生产的质量安全,中国部分地区茶叶中铅积累有逐年上升的趋势^[1]。在茶叶生产系统中,重金属的来源复杂、污染途径多样,既来源于土壤本身、肥料的施用及茶叶加工过程中金属机械的污染,也可来自工业活动和汽车尾气的排放^[2-4]。近年来,大气沉降对土壤、植物中重金属积累的影响已受到人们的关注^[5-6]。大气沉降对植物中重金属积累的影响包括间接或直接的影响,即通过污染土壤影响土壤上生长植物的重金属积累和通过植物地上部分吸收进入植物体。研究表明^[7-8],矿区附近的农产品中常常含有较高含量的重金属,但这些作物中重金属的积累是来源于污染土壤还是直接来源于大气尚缺乏直接的证据。近年来,有关土壤-茶叶系统重金属污染已经引起人们的关注,虽然认识到大气污染是茶叶重金属积累的重要原因^[2-4],但有关大气污染对茶叶中重金属的积累的影响还缺乏有效的试验数据。茶叶与空气直接接触面积较大,通过表皮细胞和气孔吸收有害物质有较大的可能性。本文采用多点位和覆膜相结合的方法,比较研究了3个不同茶园中茶叶重金属积累的差异。

1 材料与方法

1.1 试验情况

本研究选择在浙江省绍兴县南部丘陵山地茶园中进行。试验区属于亚热带湿润气候,年均气温约为16℃,年降雨量约为1300mm。选择3个不同区域的茶园进行对比试验:(1)交通污染区,选择了区内距离某县级公路5、50和120m处设置3个观察点;(2)工业污染区,选择了区内距离某金属加工厂10、30和90m处设置3个观察点;(3)无明显污染源区,选择了区内周围1km范围内无明显污染源、海拔为550m的山体,在海拔70和350m处设置2个观察点,该茶园主要受大气循环物质沉降的影响。分别在以上各茶园设覆膜和露天2个对比处理,重复3次。覆膜为长2m、宽0.5m、高度为80cm的小型塑料棚,塑料棚上方与四周用超薄的农用塑料膜隔离,棚底部地面以上10cm留空、通气。该塑料棚可避免大气污染物直接沉降在茶叶上。覆膜时间为春茶生长期(2009年3月15日—4月20日)。覆膜和露天处理的其他管理方式相同。研究区茶树年龄在15—20a之间。

1.2 分析方法

4月20日试验结束时,分别在各茶园的覆膜与露天对照处理小区采集茶树新叶和老叶。每个采集的茶叶样(包括新

叶和老叶样品)各等分为2份:1份不经清洗,直接进行杀青、烘干处理;另1份先在含少量洗洁精的水中清洗,然后用自来水冲洗2—3次,去除附着的灰尘及污染物质,之后再用去离子水冲洗2—3次。清洗后的茶叶样和未经清洗的茶叶样,先在100℃下杀青30min,之后在50℃下烘干至恒重,粉碎过0.25mm塑料筛。植物样品用高氯酸消化法消化^[9],每一样品设置2个重复分析样。消化后的溶液定容至50mL,其中Pb、Cd和Cr含量用石墨炉-原子吸收光谱法测定,每10个分析样设置1个标准溶液样,测定误差控制在5%以下。

在采集茶叶样的同时,在各茶园的观察点采集0—30cm土样,经室内风干、过2mm土筛后,各取约50g样品,进一步磨细过0.15mm塑料筛,供重金属总量测定。土壤Pb、Cd和Cr含量分析采用HNO₃-HClO₄-HF三酸消化^[10],用石墨炉-原子吸收光谱法测定。土壤重金属的分析测定中,均加入国家标准土壤标样(GSS-1)进行分析质量控制,分析结果符合质量控制要求(误差在3%—6%之间)。土壤pH值用玻璃电极法测定^[10]。

2 结果与分析

2.1 试验区土壤重金属含量

表1为3个茶园设置的观察点土壤pH值、重金属Pb、Cr和Cd含量 $w(\text{Pb})$ 、 $w(\text{Cr})$ 、 $w(\text{Cd})$ 。在交通污染区的3个观察点中,除土壤全Pb含量随离公路距离增加明显下降外,其他性质(包括土壤pH值、重金属Cd和Cr含量)随距离公路的距离均无明显变化趋势。在工业污染区的3个观察点中,除土壤pH值无明显变化外,重金属Pb、Cr和Cd含量均随离工厂距离增加有所下降,说明工厂产生的污染物质已对工厂周围茶园土壤产生了明显的重金属污染。在无明显污染源区的山地茶园的不同海拔高度的2个观察点,除土壤pH值有差异外,重金属含量差异不明显。

2.2 交通污染对茶叶中重金属积累的影响

在交通污染区(公路附近)内,茶树老叶中Pb、Cd和Cr含量均明显高于新叶(表2)。随着离公路距离的增加,茶叶中3种重金属含量均呈下降趋势,以Pb的变化最为明显,其次为Cd、Cr的变化相对较小。露天处理的新叶重金属含量随离公路距离的变化比覆膜处理的大。

茶叶样清洗处理后,重金属含量均有不同程度的下降(表2),其中,以老叶的下降最为明显,覆膜处理的下降量比露天处理的下降量小,表明茶叶中的一部分重金属以灰尘形式黏附在茶叶表面。在距离公路5、50和120m处,覆膜处理可使老叶Pb含量分别下降4%(实验误差所致,下同)、5%和

表 1 研究区茶园土壤重金属含量
Table 1 Concentrations of Pb, Cd, and Cr in the soils of three experiment areas

试验区	距离或海拔	pH 值	$w(\text{Pb})/(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	$w(\text{Cr})/(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	$w(\text{Cd})/(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$
交通污染区	距离公路 5m	4.37a	21.12a	37.43a	0.18a
	距离公路 50m	4.28a	18.67ab	35.28a	0.19a
	距离公路 120m	4.46a	17.74b	37.23a	0.16a
工业污染区	距离厂区 10m	4.87a	43.46a	49.65a	0.32a
	距离厂区 30m	4.63a	40.68a	42.32b	0.27b
	距离厂区 90m	4.74a	31.36b	37.69c	0.18c
无明显污染区	海拔 70m	4.53a	17.74a	40.87a	0.13a
	海拔 350m	4.17b	19.63a	42.34a	0.11a

注:相同污染区相同项目测定值后英文字母相同者差异不显著($P=0.05$)。
Notes: Mean values for same item and same pollution area with the same letter are not significantly different at $P=0.05$ probability level.

表 2 交通污染对茶叶中铅、镉和铬积累的影响
Table 2 Effect of traffic pollution on Pb, Cd, and Cr accumulation in tea leaves

重金属	距离/m	老叶中含量/ $(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$					新叶中含量/ $(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$				
		覆膜		对照		差值	覆膜		对照		差值
		原样	清洗	原样	清洗		原样	清洗	原样	清洗	
Pb	5	2.63a	1.84c	2.52a	1.62cd	-0.11(-4)	0.78f	0.72g	1.45d	0.82f	0.67(46)
	50	2.34b	1.51d	2.47ab	1.58d	0.13(5)	0.69fg	0.63h	1.09e	0.74fg	0.40(37)
	120	2.22b	1.56d	2.28b	1.67cd	0.03(1)	0.71g	0.61h	0.97e	0.77f	0.26(27)
Cd	5	0.15a	0.11b	0.14a	0.094bc	-0.01(-7)	0.043f	0.039g	0.067d	0.038g	0.024(36)
	50	0.12ab	0.087bc	0.13ab	0.086bc	0.01(8)	0.046f	0.036gh	0.058e	0.041fg	0.012(21)
	120	0.12ab	0.073c	0.11b	0.079c	-0.01(-9)	0.041fg	0.035h	0.059e	0.037g	0.018(31)
Cr	5	0.43b	0.27c	0.49a	0.24c	0.06(12)	0.12e	0.097fg	0.18d	0.12e	0.06(33)
	50	0.46ab	0.26c	0.44b	0.27c	-0.02(-5)	0.13e	0.102f	0.15de	0.11e	0.02(13)
	120	0.41b	0.26c	0.43b	0.28c	0.02(5)	0.12e	0.086g	0.15de	0.12e	0.03(20)

注:同一重金属元素测定值后英文字母相同者差异不显著($P=0.05$)。差值为对照与覆膜原样之间测定值的差异,括号内数值为差值相对于对照原样测定值的百分数。
Notes: Mean values for same element column with the same letter are not significantly different at $P=0.05$ probability level.

1%,新叶 Pb 含量分别下降 46%、37%和 27%;老叶 Cd 含量分别下降-7%、8%和-9%,新叶 Cd 含量分别下降 36%、21%和 31%;老叶 Cr 分别下降 12%、-5%和 5%,新叶 Cr 含量分别下降 33%、13%和 20%。这一结果表明,短时间的大气沉降对老叶重金属积累的影响较小,但对新叶重金属积累可产生显著影响。这种影响随距公路的距离增加而有所减小。

2.3 工业污染对茶叶重金属积累的影响

与交通污染区相似,工业污染区茶树老叶中 Pb、Cd 和 Cr 含量也均明显高于新叶(表 3)。随着离工厂距离的增加,茶叶中 3 种重金属含量均呈下降趋势,其中露天处理的新叶中的下降尤为明显。覆膜处理对老叶中重金属积累的影响相对较小,二者重金属含量的差异在 3%—16%之间。但覆膜处理明显降低了新叶中重金属的积累,在距离工厂 10、30 和 90m 处,覆膜处理可使新叶 Pb 含量分别下降 44%、39%和 22%,新

叶 Cd 含量分别下降 23%、32%和 26%,新叶 Cr 含量分别下降 27%、29%和 24%。这些结果表明工业污染可对新叶重金属的积累产生较大的影响。

2.4 不同海拔高度对茶叶重金属积累的影响

表 4 为不同海拔高度的 2 块茶园在露天和覆膜处理 2 种情况下茶叶中重金属的积累状况。

由表 4 可知,海拔高度对茶叶(包括老叶和新叶)中 Cd 和 Cr 的积累影响不大,但对茶叶中 Pb 积累有明显影响,低海拔的茶叶中 Pb 含量高于高海拔茶叶中的 Pb 含量。露天处理和覆膜处理茶叶中重金属含量的比较发现,大气沉降对老叶中重金属积累影响不明显,对新叶中重金属 Cd 和 Cr 含量的影响也不明显,但对新叶中 Pb 积累有明显影响。

在海拔为 70 和 350m 处,覆膜后新叶中 Pb 含量分别减少了 19%和 13%。

表 3 工业污染对茶叶中铅、镉和铬积累的影响

Table 3 Effect of industrial pollution on Pb, Cd, and Cr accumulation in tea leaves

重金属	距离/m	老叶中含量/(mg·kg ⁻¹)					新叶中含量/(mg·kg ⁻¹)				
		覆膜		对照		差值	覆膜		对照		差值
		原样	清洗	原样	清洗		原样	清洗	原样	清洗	
Pb	10	4.67b	2.75e	5.14a	2.52e	0.47(9)	1.28gh	1.06h	2.27f	1.32gh	0.99(44)
	30	3.39d	2.11f	3.77c	2.17f	0.38(10)	0.89hi	0.76i	1.47g	0.95h	0.58(39)
	90	2.79e	1.94f	3.07d	2.06f	0.28(9)	0.91hi	0.73i	1.17h	0.87hi	0.26(22)
Cd	10	0.32ab	0.27bc	0.38a	0.29b	0.06(16)	0.075e	0.057f	0.097d	0.067ef	0.022(23)
	30	0.33ab	0.25bc	0.34ab	0.29b	0.01(3)	0.063ef	0.055f	0.093d	0.054f	0.030(32)
	90	0.26bc	0.23c	0.30b	0.24c	0.04(13)	0.058f	0.050f	0.078e	0.057f	0.020(26)
Cr	10	1.16a	0.65d	1.22a	0.63d	0.06(5)	0.36hi	0.29i	0.49g	0.32i	0.13(27)
	30	0.78c	0.48f	0.92b	0.54e	0.14(15)	0.32i	0.27i	0.45gh	0.28i	0.13(29)
	90	0.83bc	0.51ef	0.87b	0.53e	0.04(5)	0.31i	0.27i	0.41h	0.28i	0.10(24)

注:同一重金属元素测定值后英文字母相同者差异不显著($P=0.05$)。差值为对照与覆膜原样之间测定值的差异,括号内数值为差值相对于对照原样测定值的百分数。

Notes: Mean values for same element column with the same letter are not significantly different at $P=0.05$ probability level.

表 4 海拔高度对茶叶中铅、镉和铬积累的影响

Table 4 Effect of altitude on Pb, Cd, and Cr accumulation in tea leaves

重金属	海拔/m	老叶中含量/(mg·kg ⁻¹)					新叶中含量/(mg·kg ⁻¹)				
		覆膜		对照		差值	覆膜		对照		差值
		原样	清洗	原样	清洗		原样	清洗	原样	清洗	
Pb	70	2.14a	1.64b	2.09a	1.71b	-0.05(-2)	0.66e	0.60e	0.81d	0.62e	0.15(19)
	350	1.53b	1.26c	1.67b	1.08c	0.14(8)	0.34fg	0.32g	0.39f	0.33g	0.05(13)
Cd	70	0.14ab	0.11b	0.15a	0.12b	0.01(7)	0.043e	0.038cd	0.041e	0.035d	-0.002(-5)
	350	0.17a	0.13b	0.15a	0.13b	-0.02(-13)	0.036cd	0.039cd	0.042e	0.033d	0.006(14)
Cr	70	0.29a	0.23b	0.27a	0.21b	-0.02(-7)	0.14c	0.12cd	0.16c	0.13cd	0.02(12)
	350	0.31a	0.22b	0.28a	0.23b	-0.03(-11)	0.15c	0.12cd	0.13cd	0.11d	-0.02(-15)

注:同一重金属元素测定值后英文字母相同者差异不显著($P=0.05$)。差值为对照与覆膜原样之间测定值的差异,括号内数值为差值相对于对照原样测定值的百分数。

Notes: Mean values for same element column with the same letter are not significantly different at $P= 0.05$ probability level.

3 讨论

有关茶叶等农作物直接吸收大气沉降中的重金属元素还缺乏研究,但已有相关报道表明,大气污染环境生长的植物组织中有较高的重金属积累^[11-17]。从一些相关研究可知,许多植物叶片表皮细胞及叶肉组织可吸收富集多种污染元素。这是因为植物的叶片表面都有大量的气孔,各种大气污染物除通过气孔直接进入细胞内部外,还可以透过角质层、蜡质层被表面细胞吸收。因此,长期暴露在污染环境下的植物组织中常含有较高浓度的污染物,这种特性已被广泛应用于生物监测和生物指示,部分植物已被用于大气污染物的净化^[18]。国内外在城市植物叶片对大气中氮、硫和重金属等吸收的研究方面积累了较多的资料^[13,16-20],例如,陆东晖和殷云龙^[20]分析了南京市交通繁忙路段城市干线绿地中乔木香樟

灌木海桐和大叶黄杨及草坪植物狗牙根和马尼拉草叶片中 10 种重金属元素的含量,发现香樟叶层植物组织内部对 Al、Fe、Mo、Cu、Pb 和 Cr 等重金属元素,海桐叶层对 Al、Fe、Mn、Cu、Mo、Zn、As、Cr、Cd 和 Pb 这 10 种重金属元素,以及狗牙根和马尼拉草叶层对 As、Cr、Cd 和 Pb 这 4 种有害重金属元素都具有明显的蓄积。邱媛等^[18]测定了惠州市不同功能区的典型绿化树种大叶榕和紫荆叶片的重金属含量,发现不同功能区植物叶片的重金属含量差异显著,叶面重金属的综合污染指数为:工业区>商业交通区>居民区>清洁区,大叶榕与紫荆叶片中 Cr 和 Cd 含量与大气降尘中重金属存在相关性。本研究的观察也表明,无论是交通污染环境还是工业污染环境下,露天条件下生长的茶树新叶中重金属元素 Cd、Pb 和 Cr 的含量明显高于覆膜条件下,而且这种影响随离公路(或工

厂)距离的增加而下降,也证明了大气沉降可对茶叶中重金属积累产生较大的影响。而对老叶中重金属的积累影响相对较小,但经过清洗后也可使老叶中重金属含量大幅度下降,说明老叶中也存在大量的受沉降影响的重金属,这可能是由于老叶中重金属积累是一个长期的过程(包括来自土壤和大气沉降),受短期大气沉降的影响相对较小。

中国茶叶出口时,对重金属 Pb 和 Cd 设有限制标准,分别为 5 和 0.05mg/kg。根据这一标准,本文中除工业污染区距离公路 10m 处的对照(无覆盖处理)老茶叶中 Pb 较高(5.14mg/kg),超过标准值外,其他茶叶的 Pb 含量均在标准值以下(表 2 和表 3)。而 Cd 的超标较为明显,交通污染区的老茶叶无论是覆盖处理还是对照处理,其茶叶 Cd 含量都超过了标准值;而新茶叶覆盖处理茶叶 Cd 含量全在标准值以下,但对照处理的全在标准值以上(表 2);工业污染区无论是新茶还是老茶、无论覆盖是否,其茶叶 Cd 含量全超过了标准值(表 3)。本研究中清洗前后露天环境中生长的茶叶重金属含量的差异基本上可反映大气沉降对茶叶重金属积累的影响。在交通污染区,大气沉降对老茶叶 Pb、Cd 和 Cr 含量的贡献率分别为 27%—36%、28%—34% 和 35%—51%,对新茶叶 Pb、Cd 和 Cr 含量的贡献率分别为 21%—43%、29%—43% 和 20%—33%。在工业污染区,大气沉降对老茶叶 Pb、Cd 和 Cr 含量的贡献率分别为 33%—51%、15%—24% 和 39%—48%,对新茶叶 Pb、Cd 和 Cr 含量的贡献率分别为 35%—42%、28%—42% 和 32%—38%。可见,大气沉降对茶叶重金属积累有较明显的贡献。总体上,工业污染区大气沉降对茶叶重金属积累的贡献略高于交通污染区。

4 结论

大气污染可对茶树新叶中重金属积累产生一定的影响,其影响程度与污染源和距污染源的距离有关。有明显污染源的茶园(交通污染和工业污染)大气沉降对茶叶重金属的积累明显高于无明显污染源的茶园。覆膜后,交通污染区新叶中 Pb 和 Cd 和 Cr 积累分别降低了 27%—46%、21%—36% 和 13%—33%;工业污染区新叶中 Pb、Cd 和 Cr 积累分别降低了 22%—44%、23%—32% 和 24%—29%;而无明显污染源区新叶中 Pb 含量下降了 13%—19%。因此,在茶叶生产区应重视大气环境建设,避免在大气污染严重区附近种植茶叶。

参考文献 (References)

- [1] 姜红艳, 龚淑英. 茶叶中铅含量现状及研究动态[J]. 茶叶, 2004, 30(4): 210—212.
Jiang Hongyan, Gong Shuying. *Journal of Tea*, 2004, 30(4): 210—212.
- [2] 张凯, 付晓陆, 陈余平, 等. 非土壤因素对茶叶铅污染的影响[J]. 广东微量元素科学, 2007, 14(4): 19—23.
Zhang Kai, Fu Xiaolu, Chen Yuping, et al. *Guangdong Trace Elements Science*, 2007, 14(4): 19—23.
- [3] 陈中官, 金崇伟. 茶叶铅污染来源的研究进展[J]. 广东微量元素科学, 2006, 13(6): 7—10.
Chen Zhongguan, Jin Chongwei. *Guangdong Trace Elements Science*,

- 2006, 13(6): 7—10.
- [4] 郇逸根, 路远发. 西湖茶园茶叶铅污染铅同位素示踪[J]. 物探与化探, 2008, 32(2): 180—185.
Li Yigen, Lu Yuanfa. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 2008, 32(2): 180—185.
- [5] 梁鸿霞, 翟通德, 陈中兰, 等. 南充市区绿化植物叶片重金属元素含量及其大气污染评价[J]. 西华师范大学学报: 自然科学版, 2006, 27(4): 435—438.
Liang Hongxia, Zhai Tongde, Chen Zhonglan, et al. *Journal of China West Normal University: Natural Science Edition*, 2006, 27(4): 435—438.
- [6] 任乃林, 陈炜彬, 黄俊生, 等. 用植物叶片中重金属元素含量指示大气污染的研究[J]. 广东微量元素科学, 2004, 11(10): 41—45.
Ren Nailin, Chen Weibin, Huang Junsheng, et al. *Guangdong Trace Elements Science*, 2004, 11(10): 41—45.
- [7] 王英辉, 陈学军, 赵艳林, 等. 铅锌矿区土壤重金属污染与优势植物累积特征[J]. 中国矿业大学学报, 2007, 36(4): 487—493.
Wang Yinghui, Chen Xuejun, Zhao Yanlin, et al. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2007, 36(4): 487—493.
- [8] 刘益贵, 彭克俭, 沈振国. 湖南湘西铅锌矿区植物对重金属的积累[J]. 生态环境, 2008, 17(3): 1042—1048.
Liu Yigui, Peng Kejian, Shen Zhenguo. *Ecology and Environment*, 2008, 17(3): 1042—1048.
- [9] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
Lu Rukun. *Analytical methods on agro-chemical properties of soil*[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [10] Spark D L. Methods of soil analysis, Part 3: Chemical methods[M]. Madison: SSSA and ASA, 1996: 703—919.
- [11] 黄绍文, 韩宝文, 和爱玲, 等. 城郊公路边菜田土壤和韭菜中重金属的空间变异特征[J]. 华北农学报, 2007, 22(B10): 152—157.
Huang Shaowen, Han Baowen, He Ailing, et al. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2007, 22(B10): 152—157.
- [12] 李寒娥, 李秉滔, 蓝盛芳. 城市行道树对交通环境的响应[J]. 生态学报, 2005, 25(9): 2180—2187.
Li Han'e, Li Bingtao, Lan Shengfang. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(9): 2180—2187.
- [13] 王娟, 杨蓉西, 周云龙, 等. 白皮松针叶中几种元素的测定及对北京大气污染状况的评价[J]. 环境科学研究, 2004, 17(2): 6—9.
Wang Juan, Yang Rongxi, Zhou Yunlong, et al. *Research of Environment Sciences*, 2004, 17(2): 6—9.
- [14] Tomasevic M, Vukmirovic Z, Rajsic S, et al. Characterization of trace metal particles deposited on some deciduous tree leaves in an urban area[J]. *Chemosphere*, 2005, 61(6): 753—760.
- [15] De Temmerman L, Hoenig M. Vegetable crops for biomonitoring lead and cadmium deposition[J]. *Journal of Atmosphere Chemistry*, 2004, 49(1—3): 121—135.
- [16] Gawel J E, Trick C G, Morel F M M. Phytochelatin are bioindicators of atmospheric metal exposure via direct foliar uptake in trees near Sudbury, Ontario Canada[J]. *Environmental Science & Technology*, 2001, 35(10): 2108—2113.
- [17] Anderson S, Chappelka A H, Flynn K M, et al. Lead accumulation in *Quercus nigra* and *Q-velutina* near smelting facilities in Alabama, USA[J]. *Water Air and Soil Pollution*, 2000, 118(1—2): 1—11.
- [18] 邱媛, 管东生, 陈华, 等. 惠州市植物叶片和叶面降尘的重金属特征[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2007, 46(6): 98—102.
Qiu Yuan, Guan Dongsheng, Chen Huan, et al. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2007, 46(6): 98—102.
- [19] Chen Z S, Liu J C, Cheng C Y. Acid deposition effects on the dynamic of heavy metals in soils and their biological accumulation in the crops and vegetables in Taiwan [C]//Bashkin V, Park S U, ed. *Acid Deposition and Ecosystem Sensitivity in East Asia*. Hauppauge: Nova Science Publishers, 1998, 189—225.
- [20] 陆东晖, 殷云龙. 城市道路绿化植物叶层对重金属元素和 N、S 的吸收与蓄积作用[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2008, 32(2): 51—55.
Lu Donghui, Yin Yunlong. *Journal of Nanjing Forestry University: Natural Science Edition*, 2008, 32(2): 51—55.

(责任编辑 岳臣)