

107 杨对土壤重金属的吸收和富集

李金花¹, 何 燕², 段建平³, 张绮纹¹

(1. 林木遗传育种国家重点实验室,中国林业科学研究院林业研究所,北京 100091; 2. 北京市林业种子苗木管理总站,北京 100011;
3. 北京市延庆县种子苗木管理站,北京 102100)

摘要:对北京市南郊房山区107杨绿化林地进行了土壤重金属吸收富集研究,林地周围有水泥厂、石材厂、污水和垃圾等不同污染源,结果表明:林地土壤受到了Pb、Cd、Cu和Zn不同程度的污染,Pb、Cu、Zn含量差异显著,Cd平均含量($0.077\ 6\ mg \cdot kg^{-1}$)低于北京市背景值,但Pb、Cu、Zn平均含量分别为37.61、26.25和90.3 mg · kg⁻¹,均超过了背景值,3块林地107杨叶片的Pb、Cd、Cu和Zn含量不同,与土壤重金属含量的变化无明显规律性,107杨叶片对土壤Pb、Cd、Cu和Zn重金属元素均能吸收富集,但对不同重金属的吸收富集能力不同,呈现出Cd>Zn>Cu>Pb的变化趋势,尤其对Cd具有很强的富集能力,富集系数最高值大于16,表现出了低背景高富集,而对Pb、Cu的富集能力相对较小,富集系数均小于1;不同林地107杨叶片对同种重金属元素的吸收存在较大的差异。

关键词:107杨;土壤;叶片;重金属;吸收;富集

中图分类号:S792.11

文献标识码:A

Absorption and Accumulation of Heavy Metal from Soil by Leaves of *Populus × euramericana* cv. ‘Neva’ Plantation

LI Jin-hua¹, HE Yan², DUAN Jian-ping³, ZHANG Qi-wen¹

(1. State Key Laboratory of Tree Genetics and Breeding, Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China;
2. Beijing Management Bureau of Forest Seed and Seedling, Beijing 100011, China;
3. Yanqing Management Bureau of Forest Seed and Seedling, Beijing 102100, China)

Abstract: The absorption and enrichment of heavy metal elements by leaves of *Populus × euramericana* cv. ‘Neva’ were analyzed through content assessing of heavy metal elements in soils of three forest lands at Fangshan District in the southern suburb of Beijing. These forest lands with *P. × euramericana* cv. ‘Neva’ plantation were around with the various sources of pollution such as cement mill, stone mill, sewage and garbage. Some of heavy metal elements such as Cd, Pb, Cu, and Zn were found in the soil samples and leaves of *P. × euramericana* cv. ‘Neva’ grown on the three forest lands which were investigated. The results of investigation showed that the soils of three forest lands were polluted with Pb, Cd, Cu and Zn in varying degrees. The contents of Pb, Cu and Zn in soils were significantly different among the three forest lands, whereas the average content of Cd ($0.077\ 6\ mg \cdot kg^{-1}$) was less but that of Pb, Cu, and Zn (37.61, 26.25 and 90.3 mg · kg⁻¹) were more than the average background value of Beijing. The contents of Pb, Cd, Cu and Zn in leaves of *P. × euramericana* cv. ‘Neva’ were different among three forest lands. With the changes of heavy metal contents in soil samples, there was no regularity on the changes of different heavy metal contents in leaves of *P. × euramericana* cv. ‘Neva’ grown on different forest land. *P. × euramericana* cv. ‘Neva’ can absorb and accumulate Pb, Cd, Cu and Zn in soil but showed different capacities of absorption and accumulation with the order of Cd > Zn > Cu > Pb. Especially, its absorption and accumulation capacity for Cd

was strong with maximum enrichment factor higher than 16 and showed high accumulation on low background, whereas its enrichment capacities for Pb and Cu were relatively poorer with average enrichment factor of less than 1. At different forest lands, there existed great difference on absorption capacity of *P. × euramericana* cv. ‘Nev’ with the same heavy metal.

Key words: *Populus × euramericana* cv. ‘Neva’; soil; leaves; heavy metal; absorption; enrichment

工业的迅猛发展和城市化进程加剧了土壤重金属的污染,不仅使土壤微生物活性和肥力下降以及减产,而且产生一系列的环境问题,直接影响人体健康。目前,植物修复是修复重金属污染土壤的重要途径之一,与传统的物理及化学修复方法相比,其具有成本低、操作简便、不易造成二次污染且不破坏土壤环境质量等优点,正在受到各国的普遍重视^[1-2]。目前,重金属污染土壤的修复所采用的超富集植物常表现出生物量低,生长缓慢,并易受杂草竞争性威胁,是植物修复的限制性因素^[3]。国内外开展了利用树木修复重金属污染土壤的研究^[4-8],主要是利用一些对重金属有富集能力的树种对污染土壤进行植物修复,树木修复不仅具有一般植物修复的优点,还有一些独特的优点,可实现污染土壤的资源化,还能生产木材或生物质能源,并可持续利用城市污水灌溉,具有绿化功能等。

杨树是我国重要造林树种之一,广泛用于生态林和用材林建设,其生物量大、生长迅速且有较长的生长周期,其巨大的根系、茎、枝、叶面积作用于环境,形成较大的绿色空间和根系网络,对重金属等污染物具有一定的吸收积累,且吸收积累的污染物不

参与食物链循环,避免了对人体产生伤害,因此被认为是修复重金属污染土壤的首选树种之一^[5-8]。目前,已经开展了一些杨树吸收、积累重金属的研究,如 Cd^[9-10]、As^[11]、Cu^[12-13] 和 Zn^[14-15] 污染土壤和水的修复研究。本文以在华北地区杨树人工林广泛使用的品种欧美杨 107 杨 (*Populus × euramericana* (Dode) Guineir cv. ‘Neva’)^[16] 为实验材料,通过对北京市房山区 107 杨人工林林地的土壤及叶片的重金属含量检测分析,探讨 107 杨对土壤重金属的吸收与富集作用,旨在为重金属污染土壤的杨树修复方法提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 取样林地概况和取样方法

供试材料采自北京市房山区周口店镇 2008 年种植的城市绿化林地,种植品种为 107 杨,株行距为 3 m × 4 m。房山区^[17] 处于永定河以及大石河、小清河的冲积平原上,土壤类型主要为褐土和潮土,pH 值 8 左右,呈偏碱性,地下水位在 2.5 m 以下。不同样地周围 1 km 之内主要污染源情况见表 1。

表 1 林地位置和污染源情况及林木生长情况

林地	地点	林地面积/hm ²	周围主要污染源	林木生长量	
				胸径/cm	树高/m
A	周口店河边	2.00	污水、垃圾场、石材厂、水泥厂	13 ~ 15	11 ~ 13
B	水泥厂路口	1.67	水泥厂、石灰厂	12 ~ 14	10 ~ 12
C	石料堆集地	1.67	石料场、水泥厂、石灰厂	10 ~ 12	10 ~ 12

采样于 2010 年 6 月中旬进行,在每块林地均按对角线选定 5 个取样点,在每个点上随机取 1 个样株,取样点四周无缺株现象,取样前测量样株的胸径和树高。在取样点 2 m × 2 m 的区域内的四个顶点和中心,分别采集 0 ~ 20 cm 表层土约 1 kg 土壤,混匀后用四分法取约 1 kg 作为该点的混合样品。叶片样品与土壤取样点相同,每个样株分东南西北四个方向随机采集 200 片成熟叶,将叶片用自来水清洗,再用去离子水冲洗后自然风干,放入恒温烘箱中 100 ℃ 杀青 15 min,再在 60 ~ 65 ℃ 下恒温烘干,用

试样粉碎机粉碎后置于无菌玻璃瓶中保存。

1.2 测定项目和方法

土壤和叶片样品的重金属元素镉(Cd)、铅(Pb)、铜(Cu)、锌(Zn)含量分析检测,均用原子吸收分光光度计法,分别采用土壤环境质量和食品安全的国家标准方法进行测定,依据的国家标准详见表 2。测定工作交由北京市理化分析测试中心化学部完成。重金属富集能力采用富集系数表示^[18]:富集系数 = 生物体内的重金属元素含量/土样中重金属元素的含量。

表2 土壤和叶片重金属含量分析采用的国家标准

检测项目	参照标准
土壤 Cd、Pb、Cu、Zn 分析	“土壤环境质量标准”(GB 15618—1995)
叶片铅(Pb)分析	“食品中铅的测定”(GB 5009. 12—2010)
叶片镉(Cd)分析	“食品中镉的测定”(GB/T 5009. 15—2003)
叶片铜(Cu)分析	“食品中铜的测定”(GB/T 5009. 13—2003)
叶片锌(Zn)分析	“食品中锌的测定”(GB/T 5009. 14—2003)

1.3 数据处理

利用 Excel 2007 和 SAS 8 版软件分别对数据进行录入和统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同林地土壤的重金属含量

从表3看出:3块林地15个取样点的土壤均受到Pb、Cd、Cu和Zn等重金属不同程度的污染,且3块林地的Pb、Cu、Zn含量差异显著($P < 0.05$),大部

分取样点属于轻污染,个别取样点污染严重,Zn和Pb含量较高,Cd含量较低,含量大小顺序为Zn>Pb>Cu>Cd,并且林地A、C比林地B的土壤污染程度重。

3块林地土壤Cd和Cu含量均低于国家《土壤环境质量标准》(GB15618—1995)1级标准限值,样地A土壤Pb、Zn和林地C土壤Pb平均含量均超过了1级标准限值。3块林地土壤Cd含量低于北京市背景值,仅为背景值的63%~67%,而3块林地土壤Pb、Cu、Zn平均含量均超过了北京市背景值,特别是林地A土壤Pb、Zn平均含量分别达到了43.44、117.9 mg·kg⁻¹,分别为背景值的1.77、2.05倍,其最小值也超过了背景值。由此可见,3块林地的污染源种类和数量不同,林地A污染源明显比林地C多,有石材厂和水泥厂,还有污水和垃圾,而林地B污染源有水泥厂和石材厂。

表3 不同107杨林地取样点土壤重金属元素含量

样地	取样点	土壤重金属元素含量/(mg·kg ⁻¹)			
		Pb	Cd	Cu	Zn
A	A-1	45.7	0.077	26.7	131.0
	A-2	51.8	0.085	30.5	142.0
	A-3	51.4	0.073	28.2	147.0
	A-4	33.8	0.079	23.1	86.4
	A-5	34.5	0.078	22.9	83.1
	标准差	8.82	0.0043	3.29	30.83
	均值	43.44	0.0784	26.28	117.9
B	平均值/背景值	1.77	0.66	1.41	2.05
	B-1	26.4	0.078	21.6	58.0
	B-2	29.1	0.082	21.6	63.6
	B-3	25.2	0.078	21.4	58.6
	B-4	27.5	0.078	21.2	61.5
	B-5	28.4	0.081	21.4	59.5
	标准差	1.56	0.0019	0.17	2.29
C	均值	27.32	0.0794	21.44	60.24
	平均值/背景值	1.11	0.67	1.15	1.05
	C-1	53.9	0.075	30.1	138.0
	C-2	41.1	0.081	32.3	98.6
	C-3	43.1	0.093	32.9	86.7
	C-4	35.1	0.055	31.1	56.7
	C-5	37.2	0.071	28.7	83.8
方差分析	标准差	7.31	0.013	1.69	29.57
	均值	42.08	0.075	31.02	92.76
	平均值/背景值	1.71	0.63	1.66	1.61
	国家《土壤环境质量标准》值(1级)	35	0.2	35	100
	北京市背景值 ^[19]	24.6	0.119	18.7	57.5
	均值	37.61	0.0776	26.25	90.30
	标准差	9.76	0.0081	4.51	33.46
$P_r > F$	变异系数/%	25.95	10.43	17.18	37.05
	$P_r > F$	0.0042*	0.6994	0.0001*	0.0104*

注: * 表示 $P < 0.05$ 水平。

2.2 不同林地 107 杨叶片的重金属含量

表4显示:3块林地107杨叶片重金属含量不同,Pb和Cd含量差异显著($P > 0.05$),Cu和Zn含量差异不显著,含量大小顺序为Zn>Cu>Pb>Cd,林地A 107杨叶片Zn平均含量最高(85.92 mg·kg⁻¹),林地C 107杨叶片Cd平均含量最低(0.22

mg·kg⁻¹)。相同林地上107杨叶片重金属含量不同,Zn含量最高,其次是Cu,Cd含量最低,说明其对不同重金属元素的吸收不同。此外,107杨叶片与土壤重金属含量的变化无明显规律性,土壤重金属含量较高的取样点上,107杨叶片重金属含量不一定较高。

表4 不同林地取样点 107 杨叶片重金属元素含量

林地	取样点	107 杨叶片重金属元素含量/(mg·kg ⁻¹)			
		铅(Pb)	镉(Cd)	铜(Cu)	锌(Zn)
A	A-1	1.12	0.47	4.71	33.7
	A-2	1.65	0.65	7.06	97.2
	A-3	1.27	0.41	7.10	42.5
	A-4	0.96	0.83	8.68	76.0
	A-5	1.20	0.83	9.66	80.2
	均值	1.24	0.64	7.44	85.92
	标准差	0.25	0.19	1.88	26.79
B	B-1	0.82	0.54	9.70	61.5
	B-2	0.98	0.66	9.19	67.0
	B-3	1.08	1.25	8.08	66.7
	B-4	0.95	1.27	7.18	61.5
	B-5	0.72	0.95	4.35	26.3
	均值	0.91	0.93	7.70	56.60
	标准差	0.14	0.33	2.11	17.15
C	C-1	0.92	0.24	10.80	46.0
	C-2	0.88	0.11	7.08	27.0
	C-3	1.06	0.37	9.21	54.7
	C-4	1.15	0.28	7.33	25.0
	C-5	0.85	0.12	5.96	52.5
	均值	0.97	0.22	8.08	41.04
	标准差	0.12	0.11	1.92	14.11
方差分析	均值	1.04	0.60	7.74	54.52
	标准差	0.23	0.37	1.84	21.42
	变异系数/%	22.11	61.66	23.77	39.28
	$P_r > F$	0.034 5*	0.001 5*	0.879 0	0.183 8

2.3 不同林地土壤和 107 杨叶片重金属含量的相关性分析

由表5可知:土壤Cu、Zn均与Pb呈显著正相关关系($P < 0.05$),Zn与Cu也呈显著正相关关系($P < 0.05$),相关系数分别达到0.760 0、0.942 9和0.539 6;土壤Zn与107杨叶片Pb呈显著的正相关关系,相关系数为0.540 7,而土壤Pb、Cu与107杨叶片Cd均呈显著负相关关系,相关系数分别达到了-0.598 8和-0.794 7。有研究^[20]证实,在土壤Cd、Zn、Pb复合污染处理模拟实验条件下,土壤Cd和Zn含量对植物Cd吸收产生Cd-Zn复合效应,但二者对植物Zn吸收未产生复合效应,不仅土壤Pb对植物Cd和Zn吸收未产生影响,而且土壤Cd和Zn含量不影响植物Pb吸收;因此,本文研究的107

杨叶片对土壤重金属元素吸收可能存在复合效应。

2.4 107 杨对土壤中重金属的吸收富集能力

植物中的重金属主要来自土壤,富集系数的大小表明植物对某种元素富集能力的强弱^[18]。107杨叶片重金属的富集系数等于叶片与土壤重金属含量的比值。由表6可知:107杨叶片对土壤Pb、Cd、Cu和Zn重金属元素均能吸收富集,但对不同重金属的吸收富集能力不同,呈现出Cd>Zn>Cu>Pb的变化趋势,对Cd的富集系数的最大值为16.282 1,这表明虽然土壤Cd含量远远高于背景值,但107杨对Cd具有很强的富集能力,表现出了低背景高富集;而107杨叶片对土壤Zn、Cu和Pb的富集系数较小,平均值均小于1,尤其是Pb,其富集系数均小于0.042 9,表明与Cd相比,107杨叶片对Zn、Pb、Cu

表 5 不同林地土壤和 107 杨叶片重金属含量相关性分析

重金属元素	土壤				107 杨叶片			
	Pb	Cd	Cu	Zn	Pb	Cd	Cu	Zn
土壤	Pb	1						
	Cd	0.055 4	1					
	Cu	0.760 0 *	-0.076 5	1				
	Zn	0.942 9 *	0.126 6	0.539 6 *	1			
叶片	Pb	0.518 2	0.029 0	0.328 0	0.540 7 *	1		
	Cd	-0.598 8 *	0.233 9	-0.794 7 *	-0.420 5	0.026 6	1	
	Cu	0.012 6	0.147 0	-0.016 5	-0.050 8	0.020 4	-0.037 9	1
	Zn	-0.066 8	0.413 6	-0.295 5	0.050 0	0.489 0	0.432 0	0.445 8

注: * 表示 $P < 0.05$ 水平。

三种重金属元素的富集能力较小。王新等^[8]进行了杨树和落叶松对土壤重金属吸收和修复的研究,发现杨树(*Populus canadensis* Moench)对 Cd、Cu 和 Zn 有吸收能力(Cd > Zn > Cu),这与本文的研究结果一致。

表 6 107 杨叶片对土壤重金属元素的富集系数

样地	取样点	Pb	Cd	Cu	Zn
A	A-1	0.024 5	6.103 9	0.176 4	0.257 3
	A-2	0.031 9	7.647 1	0.231 5	0.684 5
	A-3	0.024 7	5.616 4	0.251 8	0.289 1
	A-4	0.028 4	10.506 3	0.375 8	2.037 0
	A-5	0.034 8	10.641 0	0.421 8	0.965 1
	平均	0.028 5	8.137 8	0.283 2	0.728 8
B	B-1	0.031 1	6.923 1	0.449 1	1.060 3
	B-2	0.033 7	8.048 8	0.425 5	1.053 5
	B-3	0.042 9	16.025 6	0.377 6	1.138 2
	B-4	0.034 5	16.282 1	0.338 7	1.000 0
	B-5	0.025 4	11.728 4	0.203 3	0.442 0
	平均	0.033 3	11.763 2	0.359 1	0.939 6
C	C-1	0.017 1	3.200 0	0.358 8	0.333 3
	C-2	0.021 4	1.358 0	0.219 2	0.273 8
	C-3	0.024 6	3.978 5	0.279 9	0.630 9
	C-4	0.032 8	5.090 9	0.235 7	0.440 9
	C-5	0.022 8	1.690 1	0.207 7	0.626 5
	平均	0.023 1	2.986 7	0.260 3	0.442 4
方差分析	均值	0.028 7	7.656	0.303 5	0.748 8
	标准差	0.006 6	4.633	0.092 8	0.476 9
	变异系数/%	23.054	60.519	30.577 8	63.684 8
	$P_r > F$	0.052	0.002 2 *	0.242 3	0.258 8

注: * 表示 $P < 0.05$ 水平。

由表 6 也可知:不同林地 107 杨叶片对同种重金属元素的富集系数不同,表明其对同种重金属元素吸收能力存在差异,特别是不同林地间 Cd 富集系数存在显著差异,而其它 3 种重金属富集系数的差异不显著。林地 B 对 Cd 的富集系数均值大于 11,

而林地 C 对 Cd 的富集系数均值仅为 2.986 7。大量研究证实,土壤 pH 值、施肥、植物等均可影响对土壤 Cd 的吸收与富集^[3,9,16]。本研究中,3 块林地分别位于不同立地条件,土壤性质有差异,从而影响了对土壤重金属的吸收富集,究竟是何种因子产生了影响,尚需进一步研究。

3 讨论与小结

北京南部包括通州、大兴、丰台和房山地区的土壤存在不同程度的重金属污染^[19,21]。本研究选材取样点位于房山区的不同绿化林地,林地周围为水泥厂、石材厂、污水和垃圾等不同污染源,土壤受到 Pb、Cd、Cu 和 Zn 不同程度的污染,Cd 含量低于北京市背景值,但 Pb、Cu、Zn 平均含量均超过了背景值,特别是污染源多的林地 A,土壤 Pb、Zn 平均含量分别为北京市土壤背景值的 1.77 和 2.05 倍,其最小值也超过了背景值。据资料分析,工业性大气降尘、汽车废气和废水排放是土壤中高含量 Pb 的主要来源,而长期施用城市垃圾和污泥以及采用污水灌溉等,可能导致土壤中重金属包括 Cd 和 Cu 的积累,工业企业包括乡镇企业生产的废水、废渣、废物以及化肥的使用,是土壤 Zn 含量增加的主要原因^[21]。

由于重金属在土壤中较为稳定,土壤受到污染后,一般很难治理和消除^[1,5]。王新等^[8]利用杨树、落叶松对土壤重金属的吸收及修复研究表明,杨树对重金属的吸收量比落叶松大且修复所需的时间更短,因此利用杨树修复污染土壤的效果更佳。许多研究^[6-7]已证实,杨树对重金属的吸收累积量较其它树种高。本研究发现,107 杨叶片对土壤 Pb、Cd、Cu 和 Zn 重金属元素均能吸收富集,但对不同重金属的吸收富集能力不同,呈现出 Cd > Zn > Cu > Pb 的变化趋势,尤其对 Cd 具有很强的富集能力,表现

出了低背景高富集,而对Pb、Cu的富集能力相对较小,不同林地上107杨叶片对同种重金属元素吸收能力存在较大的差异。107杨对土壤重金属元素的吸收富集,不仅与土壤中重金属的含量相关,还与其林地土壤理化性质等诸多因素有关,这有待进一步研究。

本研究发现,107杨对土壤重金属Pb、Cd、Cu和Zn元素均能吸收富集,呈现出Cd>Zn>Cu>Pb的变化趋势,对Cd具有很强的富集能力,表现出了低背景高富集,对Zn、Pb、Cu三种重金属元素的富集能力较小。由于107杨是我国华北地区杨树人工林广泛使用的品种,具有速生、造林成活率高、适应性广、木材优质等优点^[6-7],在重金属污染土壤的植物修复中势必具有生长快、生物量大、吸收量大、修复时间短等优势,可在城郊地区重金属污染土壤的林木修复中发挥作用。

参考文献:

- [1] Cunningham S D, Ow D W. Promises and prospects of phytoremediation[J]. *Plant Physio*, 1996, 110: 715 - 719
- [2] 骆永明. 金属污染土壤的植物修复[J]. 土壤, 1999, 31(5): 261 - 265
- [3] Stoltz E, Greger M. Accumulation properties of As, Cd, Cu, Pb and Zn by four wetland plant species growing on submerged mine tailings [J]. *Environ Exp Bot*, 2002, 47: 271 - 280
- [4] Landberg T, Greger M. Differences in uptake and tolerance to heavy metal in *Salix* from unpolluted and polluted areas [J]. *Appl Geochim*, 1996, 11: 175 - 180
- [5] Schnoor J L. Phytostabilization of metals using hybrid poplar trees [M]// Raskin I, Ensley B D. *Phytoremediation of Toxic Metals: Using Plants to Clean Up the Environment*. New York: Wiley-Interscience, 2000: 133 - 150
- [6] Sebastiani L, Sciebba F, Tognetti R. Heavy metal accumulation and growth responses in poplar clones Eridano (*Populus deltoides* × *maximowiczii*) and I - 214 (*P. × euramericana*) exposed to industrial waste[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2004, 52: 79 - 88
- [7] Giachetti G, Sebastiani L. Metal accumulation in poplar plant grown with industrial wastes[J]. *Chemosphere*, 2006, 64: 446 - 454
- [8] 王新,贾永锋. 杨树、落叶松对土壤重金属的吸收及修复研究[J]. 生态环境, 2007, 16(2): 432 - 436
- [9] 张东为,崔建国,戈素芬,等. 土壤镉污染对不同品种杨树生长状况的影响[J]. 水土保持通报, 2008, 28(3): 59 - 64
- [10] 万雪琴,张帆,夏新莉,等. 镉胁迫对杨树矿质营养吸收和分配的影响[J]. 林业科学, 2009, 45(7): 45 - 51
- [11] Pilon-Smits E A H, De Souza M P, Lytle C M, et al. Selenium volatilization and assimilation by hybrid poplar (*Populus tremula* × *alba*) [J]. *J Exp Bot*, 1998, 49: 1889 - 1892
- [12] Borghi M, Tognetti R, Monteforti G, et al. Responses of *Populus × euramericana* (*P. deltoides* × *P. nigra*) clone Adda to increasing copper concentrations[J]. *Environ Exp Bot*, 2007, 61: 66 - 73
- [13] Borghi M, Tognetti R, Monteforti G, et al. Responses of two poplar species (*Populus alba* and *Populus × canadensis*) to high copper concentrations[J]. *Environ Exp Bot*, 2008, 62: 290 - 299
- [14] Di Baccio D, Tognetti R, Sebastiani L, et al. Responses of *Populus deltoides* × *P. nigra* (*P. × euramericana*) clone I - 214 to high zinc concentrations[J]. *New Phytol*, 2003, 159: 443 - 452
- [15] Baccio D, Minnocci A, Sebastiani L. Leaf structural modifications in *Populus × euramericana* subjected to Zn excess [J]. *Biologia Plantarum*, 2010, 54(3): 502 - 508
- [16] 张绮纹,李金花. 杨树工业用材林新品种[M]. 北京:中国林业出版社, 2003
- [17] 王淑玲. 房山自然资源与环境[M]. 北京:中国农业科学技术出版社, 2004: 325 - 343
- [18] 郭水良,黄朝表,边媛. 金华东郊杂草对土壤重金属元素的吸收与富集作用(I)——6种重金属元素在杂草和土壤中的含量分析[J]. 上海交通大学学报:农业科学版, 2002, 20(1): 22 - 29
- [19] 陈同斌,郑袁明,陈煌,等. 北京市土壤重金属含量背景值的系统研究[J]. 环境科学, 2004, 25(1): 117 - 122
- [20] 李博文,杨志新,谢建治. 土壤Cd、Zn、Pb复合污染对植物吸收重金属的影响[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(5): 908 - 911
- [21] 付华,吴雁华,魏立华. 北京南部地区农业土壤重金属分布特征与评价[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(1): 182 - 185