

杨、柳、榆、槐对淮北粉煤灰“土壤”中 矿质积累的影响*

王世绩 刘雅荣 刘建伟 周树理 秦德仁 冷国友

摘要 利用火力发电厂排放的粉煤灰,10 a 充填淮北煤矿塌陷区,其上覆盖约 30 cm 厚的潮土,形成特殊的“土壤”。1986~1987 年营造了杨、柳、榆、刺槐人工林,在集约栽培条件下,生长发育正常。1991 年调查了生物量和 14 种元素在树体内积累和分布,结果表明,N、P、K、Ca、Mg 等大量元素主要分布在树木的叶内,其次是根、树皮和侧枝,以树干的含量最低。在 4 个树种中,刺槐的含 N 量明显地高于其它 3 个树种。在有害的重金属元素中,Hg 主要分布在根和树皮内,其次是叶、枝,树干极少;Pb 主要分布在叶和树皮中,其次是枝和根,树干最少;Cd、Cr 较为均匀地分布在各器官中。但 Cr 在根中的含量极高,原因有待查明。根据树木的生物量,以及各种元素在不同器官中的含量,估算了 4 个树种对“土壤”中营养元素和有毒元素的摄取量:4~5 a 树木摄取量 N 是 195.2~500.3 kg/hm²,P 为 21.93~44.87 kg/hm²,Pb 和 Hg 分别为 55.25~102.32 kg/hm² 和 0.849~3.462 kg/hm²。最后,讨论了树木对环境的净化作用。

关键词 杨树、柳树、榆树、刺槐、人工林、粉煤灰、矿质元素

淮北地区采煤塌陷区利用发电厂的废弃物——粉煤灰覆土营造人工林,恢复被破坏的生态景观,取得了明显的社会效益^[1,2]。本文是系列研究的一部分^[3~5],其目的是探讨造林后,树木对粉煤灰中矿质元素的吸收量及其在各器官中的分布情况,从而评估树木对“人工土壤”粉煤灰中有毒元素的净化能力。有关该地区营造人工林的效果和此项研究的意义^[3~5],请参阅已发表的论文,在此不再赘述。

1 材料与方 法

1.1 自然概况

试验地设在安徽省淮北市淮北矿务局林业试验站内。年平均气温 14.5 ℃,降水量 826.9 mm,无霜期 202 d。林地表层覆盖 30 cm 厚的潮土,以下为 4~5 m 深电厂排放的粉煤灰。粉煤灰缺乏有机质,含 N 量极低,含有较多的 F、Hg、Pb、Cd、Cr 等元素,pH 较高,随季节变化在 8.0~9.5 之间,地下水位 2 m。试验地的详细情况,请参阅文献[3,4]。

1.2 供试材料

材料分别为 1987 年春营造的 4 年生欧美杨(*Populus × euramericana* cl. “Neva”)和 1986

1994—05—09 收稿。

王世绩研究员,刘雅荣,刘建伟(中国林业科学研究院林业研究所 北京 100091);周树理,秦德仁,冷国友(淮北矿务局林业处)。

* 本文为 1992~1994 年国家自然科学基金资助项目“淮北废矿区复垦造林与环境质量评价研究”部分内容。周银莲、阮天津同志参加部分分析工作。

年营造的杂交柳(*Salix × matsudana* J-172),白榆(*Ulmus pumila* Linn.),刺槐(*Robinia pseudoacacia* L. 鲁-13号)。密度 4 m×4 m, 3 m×4 m, 栽植穴内施复合肥料每株 0.5 kg。造林后每年灌水 1~2 次,追施尿素 150 kg/hm²。1991 年在人工林内每一树种选 3 株标准木按 1 m 分段,分层取样,称鲜重,部分样品测干重。按常规方法,制备各器官的混合样品,进行室内化学分析。

1.3 分析方法

S——BaSO₄ 比浊法;F——离子电极法;Se——硒试剂比色法;Hg——FS732 冷原子吸收法;As——二巯基甲酸银比色法;Pb——原子吸收法;N——Buchl 定 N 仪法;Ca、Mg、Fe、P、Cd、Cr——发射光谱测定法。分析由中国医学科学院和中国林业科学研究院中心分析室完成。

2 试验结果

2.1 粉煤灰中矿质元素的含量

根系调查的结果表明,在粉煤灰“土壤”上生长的杨、柳、榆、刺槐 4 个树种的根系发育正常,深度可达 1.80~2.30 m,水平根幅达 8 m 左右。在粉煤灰层分布的根量达 68%~87%。由此可以推断,树木体内积累的有毒元素主要是来自粉煤灰层。表 1 列出的 29 种元素含量是根据文献[6]提供的未复垦过的纯粉煤灰的分析资料,其中包括对人体有害的重金属,也包括植物必需的营养元素。

表 1 粉煤灰 2 m 深“土”层矿质元素的含量

元 素	含 量		元 素	含 量	
	(g/m ³)	(kg/hm ²)		(g/m ³)	(kg/hm ²)
N	24.4	488.0	B	72.8	1 456.0
P	268.4	5 368.0	Li	62.1	1 242.0
K	4 209.0	4 818.0	Cu	54.5	1 090.0
Ca	8 784.0	175 680.0	Cl	42.7	854.0
Mg	1 464.0	29 280.0	Pb	38.9	778.0
S	1 403.0	28 060.0	F	18.3	366.0
Si	316 834.0	6 336 680.0	Cr	4.9	98.0
Al	19 465.1	328 702.0	Co	4.7	94.0
Fe	10 126.0	202 520.0	Mo	4.0	80.0
Na	1 878.8	37 576.0	As	2.6	52.0
Ti	738.1	14 762.0	Ni	1.5	30.0
Zn	288.3	5 766.0	Cd	1.1	22.0
Ba	95.2	1 904.0	Se	0.6	12.0
Mn	86.4	1 728.0	Hg	0.2	4.4
Sr	75.8	1 516.0			

注:①根据粉煤灰容重(0.61 g/cm³)和元素百分含量计算,容重资料来自文献[6];②N 不属矿质元素,但对植物有重要意义,也一并列入表内。

从表 1 看出,前 6 种大量营养元素中,N、P 极度缺乏,K 相当于一般中等水平土壤中的含量。粉煤灰的主要化学成分是 SiO₂ 和 Al₂O₃,后者相当于正常土壤中含量的 2 倍。而 Pb、Cr、Hg 等有毒重金属均显著高于土壤的常规含量^[7]。

2.2 14种元素在树木各器官中的积累

重点分析了杨、柳、榆、槐4个树种的叶子、枝条、主干、树皮和根中14种元素的含量,其结果列入表2。

表2 14种元素在树木各器官中的积累量

器官	树种	(mg/g)							(μg/g)						
		N	P	K	Ca	Mg	S	Fe	F	Se	Hg	As	Pb	Cd	Cr
叶片	杨	18.32	2.1	25.79	>10	4.9	2.42	190	43.0	6.17	0.022	<0.02	3.92	0.2	<0.25
	柳	27.75	2.0	8.89	>10	3.0	4.05	190	47.5	9.88	0.129	<0.02	7.07	0.45	<0.25
	榆	28.46	1.9	13.66	>10	3.9	1.42	95	39.0	8.47	0.047	<0.02	4.14	0.6	<0.25
	槐	28.45	2.2	8.06	>10	3.9	2.15	170	49.5	8.66	0.058	<0.02	6.74	0.35	0.25
枝条	杨	4.03	0.55	0.20	>5	0.75	0.35	95	20	2.35	0.008	<0.02	2.04	0.05	<0.13
	柳	3.12	0.50	1.27	>5	0.85	0.88	50	19	3.38	0.069	<0.02	2.13	0.3	<0.13
	榆	3.43	0.35	1.18	>5	0.80	0.24	65	27	1.18	0.023	<0.02	2.96	0.05	<0.13
	槐	7.97	0.60	1.19	>5	0.75	0.21	110	21	0.38	0.023	<0.02	3.31	0.23	<0.13
树干	杨	1.45	0.28	0.82	1.6	0.35	0.09	23	14.5	0.93	<0.008	<0.02	0.55	0.05	0.15
	柳	1.09	0.17	0.51	2.8	0.35	0.20	27	13.5	0.80	<0.008	<0.02	0.03	0.3	<0.13
	榆	1.98	0.45	1.46	4.5	0.75	0.11	13	15.6	0.43	<0.008	<0.02	0.64	0.2	<0.25
	槐	3.26	0.23	0.53	1.4	0.60	0.08	48	15.5	0.13	<0.008	<0.02	0.29	0.2	<0.25
树皮	杨	7.08	0.3	0.42	>10	1.8	0.77	95	25.3	2.94	0.048	<0.02	3.69	0.3	<0.13
	柳	6.45	0.8	2.93	>10	2.2	0.77	190	18.5	3.96	0.056	<0.02	4.49	0.2	<0.25
	榆	6.61	0.8	3.41	>10	2.8	0.37	190	16.0	2.91	0.033	<0.02	5.67	0.2	<0.25
	槐	21.10	1.3	2.27	>10	0.85	1.32	190	18.0	3.47	0.057	<0.02	6.33	0.2	<0.25
杨根	①	10.34	4.5	4.67	5	1.5	0.65	140	15.5	2.59	0.016	<0.02	1.80	0.1	12
	②	10.06	1.8	5.06	10	2.1	1.17	420	18.0	4.96	0.028	<0.02	2.17	<0.1	30
	③	—	3.0	4.28	10	2.5	2.14	900	22.5	5.42	0.314	<0.02	1.94	0.55	26
柳根	④	7.70	0.9	4.18	>10	2.4	2.46	280	14.0	4.14	0.358	<0.02	3.21	0.95	18
榆根	①	4.20	0.43	4.44	>5	4.0	0.26	130	19.0	1.94	0.012	<0.02	1.13	0.2	1.5
	②	5.19	1.2	4.06	>10	3.0	0.36	290	18.0	4.52	0.058	<0.02	2.71	0.6	4.5
	③	7.17	0.9	6.41	>10	3.5	1.47	460	19.6	5.64	0.306	<0.02	3.17	0.2	2.3
槐根	①	18.59	2.3	5.24	>5	2.2	0.33	100	15.0	5.5	<0.080	<0.02	1.51	0.85	5
	②	19.82	2.1	5.74	>10	1.7	1.07	180	13.5	10.7	0.168	<0.02	1.74	0.35	13
	③	22.35	1.4	5.39	>10	2.0	0.78	330	15.5	11.6	0.460	<0.02	2.77	0.75	38

①粗根>3 mm;②中根1~3 mm;③细根<1 mm;④为柳根混合样品。

从表2看出,N、P、K、Ca、Mg主要分布在叶内,其次是根、皮、枝,树干。在4个树种中,刺槐的含N量明显地高于其它3个树种。尤其是根内N的含量(18.6~22.4 mg/g)比其它树种高1~2倍,这可能与其生物固N能力有关。在有害的重金属中,Hg在4个树种的细根含量为0.306~0.460 μg/g,中根为0.028~0.168 μg/g,粗根为0.016~0.08 μg/g,细根比粗根多19~58倍;其次是树皮(0.033~0.057 μg/g)和树叶(0.022~0.058 μg/g)。Hg在柳树叶内含量极高(0.129 μg/g),究竟属于例外情况,还是分析误差,有待于进一步确认。此外,枝中含Hg量较少(0.023~0.069 μg/g),树干极少(0.008 μg/g)。

Pb主要分布在叶(3.92~7.07 μg/g)和树皮(3.69~6.33 μg/g)中,其次是根(1.13~3.21 μg/g)和枝(2.04~3.31 μg/g),树干最少(0.03~0.64 μg/g)。Cd和Cr在各器官中的分

布较为均匀。唯独根部 Cr 的含量比其它器官高百倍以上,这究竟是由于 Cr 在根系中积累的多,还是根系表面吸附的 Cr 多? 尚有待进一步探讨。

2.3 树木对“土壤”中有害元素的净化作用

为了大致估算树木每年能从“土壤”中吸收多少有害元素? 对净化环境的作用如何? 根据表 2 中的数据、生物量/株和造林密度,便可按下列公式:器官的元素含量 \times 器官生物量总和 \times 造林密度计算出 4 年生杨树和 5 年生柳树、榆树和刺槐从“土壤”吸收元素的总量。生物量的调查结果已另文发表^[5],本文不再列出详细数据,现将各树种从“土壤”中吸收的元素总量的计算结果列入表 3。

表 3 4 个树种从 2 m 深“土壤”中吸收的元素总量

树 种	器 官	(g/株)							(mg/株)						
		N	P	K	Ca	Mg	S	Fe	F	Se	Hg	As	Pb	Cd	Cr
杨 树	叶 $\times 4$ ^①	174.4	20.0	245.5	95.2	46.8	23.2	1 808.8	409.2	58.8	0.208	1.904	37.28	1.904	2.380
	枝	37.6	5.1	1.87	46.7	7.0	3.3	887.3	186.8	21.9	0.075	0.186	19.05	0.467	1.214
	干	47.5	9.2	26.89	52.5	11.5	2.9	754.2	475.4	30.5	0.262	0.655	18.03	1.639	4.918
	根	52.9	27.6	32.52	53.2	13.9	8.7	3 039.6	133.5	27.9	0.813	0.148	14.04	1.770	137.8
	总和 ^②	312.4	61.9	323.6	247.6	79.2	38.1	6 489.9	1 204.9	139.1	1.358	2.893	88.44	5.780	146.3
柳 树	叶 $\times 5$ ^③	152.5	11.0	48.9	55.0	16.5	22.5	1 045.0	261.0	54.0	0.710	0.110	38.85	2.475	1.375
	枝	23.9	3.8	9.7	38.3	6.5	6.7	383.5	145.7	25.9	0.529	0.153	16.33	2.301	0.997
	干	30.3	4.7	14.2	77.9	9.7	5.5	751.6	375.8	22.3	0.223	0.557	0.83	8.352	3.619
	根	57.9	6.7	31.4	75.3	18.1	18.5	2 108.4	105.4	31.2	2.695	0.151	24.17	7.15	135.5
	总和	264.6	26.3	104.3	246.5	50.8	53.2	4 288.5	887.9	133.4	4.157	0.970	80.18	20.28	141.5
榆 树	叶 $\times 5$	250.5	16.7	120.2	88.0	34.0	12.5	836.0	343.0	74.5	0.415	0.175	35.40	5.28	2.20
	枝	31.3	3.2	10.9	45.6	7.3	2.2	593.4	246.5	10.7	0.210	0.182	27.02	0.45	1.18
	干	35.7	8.1	26.3	81.2	13.5	1.9	234.5	281.4	7.7	0.144	0.361	11.55	3.60	4.51
	根	51.6	7.3	48.5	74.3	36.6	5.7	2 477.0	190.1	34.5	0.927	0.201	20.03	2.86	24.30
	总和	369.1	35.3	205.7	289.1	91.4	22.3	4 140.9	1 061.0	127.4	1.696	0.919	94.00	12.20	32.20
刺 槐	叶 $\times 5$	354.2	27.4	100.4	124.5	48.5	26.5	2 116.5	616.0	107.5	0.720	0.250	83.90	4.355	3.11
	枝	132.6	9.9	19.8	83.2	12.4	3.5	1 830.4	349.4	6.3	0.383	0.333	55.08	3.827	2.16
	干	92.7	6.5	23.3	39.8	17.0	2.3	1 365.6	440.9	3.7	0.228	0.569	8.25	5.692	7.11
	根	221.0	27.9	71.3	89.9	27.9	7.0	2 120.4	198.9	100.0	1.012	0.266	6.49	10.14	172.84
	总和	800.5	71.8	214.8	337.4	105.9	39.3	7 432.9	1 605.2	217.5	2.343	1.418	163.72	24.01	185.20
		500.3	44.8	134.3	210.9	66.2	24.3	4 645.5	1 003.2	135.9	1.464	0.886	102.32	15.01	115.77

①为 4 a 树叶之和;②后行 N~S 的单位为 kg/hm²,Fe~Cr 为 g/hm²;③为 5 a 树叶之和。

从表 2 和表 3 看出,2 m 深粉煤灰层中 N 储量为 488 kg/hm²,而 4 年生的杨树人工林从“土壤”中吸收的总 N 量是 195.2 kg/hm²;柳树、榆树和刺槐 5 年生人工林吸收的相应数值是:220.4、307.46 和 500.3 kg/hm²。说明,在极度缺乏 N 素的粉煤灰“土壤”上生长的树木,必须依赖施肥或其它补 N 措施(如压青、生物固 N 等)才能维持正常生长,否则生长量增长缓慢,以致停顿。4~5 年生人工林对 P 的吸收为 21.93~44.87 kg/hm²,而 P 在粉煤灰层中为 5 368 kg/hm²,相当于吸收量的 245~120 倍,与正常土壤相比,粉煤灰中有效 P 较贫瘠^[8],也需靠施肥补充。K、Ca、Mg、S 等大量元素在粉煤灰中含量较充足,可不施或少施,施肥试验的结果将

另文报道。从吸收有毒害的重金属元素分析,4个树种有所差异,刺槐林对Pb的吸收量最多,为102.32 g/hm²,其它3树种为55.25~78.30 g/hm²,柳树林对Hg的吸收量最多,为3.462 g/hm²,而其它3树种为0.849~1.464 g/hm²。以粉煤灰层中含量最低的Hg(4.4 kg/hm²)估算,5年生柳树人工林,也只能吸收了总储量的0.079%,而其它重金属量远高于Hg,说明树木对粉煤灰中有毒重金属的净化作用是相当有限的,需要上千年的时间,才能从“土壤”中取走,达到完全净化的作用。

3 讨论

利用电厂排放的粉煤灰充填煤矿塌陷区营造各种人工林,对于恢复破坏了的原有的地貌,节省贮藏粉煤灰的费用,改善生态环境等优点都是毋庸置疑的事实,值得大力提倡。但是,时常见到一些不十分客观的报道或内部资料,片面地夸大了粉煤灰覆土造林的效果,只强调树木的生长量,不强调施肥的必要性,给人们造成一种误解,似乎粉煤灰覆田的立地条件比一般的林地条件还要好,这既不符合事实,也不利于推广应用。

本项研究证明,在树木根系分布层的粉煤灰中,含N量接近或达到4~5年生人工林从“土壤”中的摄取量,如果造林后不施肥,特别是追施N肥,则树木不能正常生长,粉煤灰中P和K的含量也不足,同样需要补施相应肥料。

至于树木可以净化粉煤灰中的有毒元素,如Hg、Pb、Cr、Cd等重金属,亦不能过分夸大其作用。虽然树木能够从粉煤灰中吸收积累这些元素,但其数量远非一朝一夕所能完成“净化”的功能,这是一个长期的、有益的效应。不同的树种对不同重金属的摄取量是不同的,因此,在处理树木的枯枝、落叶时,应慎重考虑这些因素,以免造成二次污染。

参 考 文 献

- 1 王廷敬,刘艳清,周树理. 煤矿塌陷区粉煤灰覆田刺槐造林和生长规律的研究. 安徽林业科技,1990,(1):26~28.
- 2 周树理. 煤矿塌陷区覆土造田育苗研究. 林业科技通讯,1988,(4):13~16.
- 3 王世绩,刘雅荣,刘建伟,等. 废矿区复垦造林技术的研究 I. 覆田立地的基本特征. 土壤通报,1994,25(6).
- 4 王文全,王世绩,刘雅荣,等. 粉煤灰覆田立地上杨、柳、榆、槐根系的分布和生长特点. 林业科学,1994,30(1):26~28.
- 5 刘雅荣,刘建伟,王世绩,等. 生长在粉煤灰复垦区杨、柳、榆、槐的生物量研究. 林业科学研究,1994,7(4):453~455.
- 6 严志才主编. 土地复垦. 北京:学苑出版社,1989. 79.
- 7 张万儒主编. 中国森林土壤. 北京:科学出版社,1986. 278~288.
- 8 刘寿坡,张瑛,朱占学. 杨树施肥林地土壤营养元素的消长变化. 见:刘寿坡主编. 黄泛平原资源利用研究. 北京:中国科学技术出版社,1992. 325~334.

The Accumulation of Poisonous Elements in *Populus* × *euramericana*, *Salix matsudana*, *Ulmus pumila* and *Robinia pseudoacacia* Growing on Coal Ash “Soil”

Wang Shiji Liu Yarong Liu Jianwei Zhou Shuli Qin Deren Leng Guoyou

Abstract The special “soil” type condition is formed by filling the collapsed area with coal ash from thermal power factory and covering 30 cm Chao soil onto the ash. In 1986~1987, *Populus* × *euramericana*, *Salix matsudana*, *Ulmus pumila* and *Robinia pseudoacacia* plantations were established on the site. Under intensive cultivation, they grew well. Biomass and 14 elements distribution and accumulation, in the trees were investigated in 1991. The result shows that most elements such as N, P, K, Ca, Mg were accumulated mainly in leaf, then root, bark and branch, their contents in trunk the least. Among the 4 species, *Robinia pseudoacacia* had the highest N content. The accumulation of the poisonous elements in tree was Hg mainly in root and bark, seldom in leaf and branch; Pb mainly in leaf and bark, seldom in trunk; Cd and Cr distributed evenly in all organs. The absorption of nutritive and poisonous elements was calculated by their 4~5 years biomass and element contents. The trees purification function was discussed based on the calculation.

Key words poplar, willow, elm, black locust, plantation, coal ash, mineral element

Wang Shiji, Professor, Liu Yarong, Liu Jianwei (The Research Institute of Forestry, CAF Beijing 100091), Zhou Shuli, Qin Deren, Leng Guoyou (Forestry Bureau of Huaibei Coal Mine).