

# 广西马尾松人工林对重金属元素的吸收、累积及动态

方 晰, 田大伦, 项文化, 蔡宝玉

(中南林学院生态研究室, 湖南株洲 412006)

**摘 要:** 探讨了广西马尾松人工林对重金属 Cu、Zn、Mn、Pb、Ni、Cd 元素的吸收、累积及动态。结果表明: 马尾松林地土壤层(0~60 cm)中重金属元素 Cu、Zn、Mn、Pd、Ni、Cd 的平均含量, 分别为 23.02, 24.46, 235.46, 5.93, 8.45 和 0.14 mg·kg<sup>-1</sup>, 储量大小依次为 Mn>Zn>Cu>Ni>Pb>Cd。马尾松林不同组分中, 重金属元素的含量范围分别为 Cu 2.97~13.47, Zn 12.09~42.93, Mn 143.14~751.78, Pd 2.87~25.12, Ni 0.19~25.05 和 Cd 0.16~1.24 mg·kg<sup>-1</sup>, 对土壤 6 种重金属元素富集能力的大小依次为 Cd>Mn>Pb>Zn>Ni>Cu。马尾松林中, 重金属元素的总储量为 39.791kg·hm<sup>-2</sup>, 其中 Mn、Zn、Pb、Cu、Cd、Ni 元素的储量分别为 34.047, 3.351, 1.226, 0.874, 0.245, 0.084 kg·hm<sup>-2</sup>, 各组分中重金属元素储量的空间分布为干>皮>根>叶>枝。Cu、Zn、Mn、Pd、Ni、Cd 的周转期分别为 13.9、7.0、3.1、20.4、2.1、12 a, 流动系数为 Ni>Mn>Zn>Cd>Cu>Pb。

**关键词:** 广西; 马尾松人工林; 重金属元素; 吸收; 累积及动态

**中图分类号:** Q945.12 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3142(2004)05-0437-06

## Absorption, accumulation and dynamic of heavy metal elements in *Pinus massoniana* plantation in Guangxi

FAND Xi, TIAN Da-lun, XIANG Wen-hua, CAI Bao-yu

(Research Section of Ecology, CSFU, Zhuzhou 412006, China)

**Abstract:** The absorption, accumulation and dynamic of heavy metal Cu, Zn, Mn, Pb, Ni, Cd elements were studied in *Pinus massoniana* plantation at Lufeng Forestry Farm in Guangxi Autonomous Region. The results indicated that in the soil (0~60 cm) of the forest, the average contents of heavy metal Cu, Zn, Mn, Pb, Ni, Cd elements were 23.02, 24.46, 235.46, 5.93, 8.45 and 0.14 mg·kg<sup>-1</sup>, respectively, the storage of them was in the order as Mn>Zn>Cu>Ni>Pb>Cd. In different parts of the plant the contents of the elements were; Cu 2.97~13.47, Zn 12.09~42.93, Mn 143.14~751.78, Pb 2.87~25.12, Ni 0.19~25.05 and Cd 0.16~1.24 mg·kg<sup>-1</sup>. The concentration ability of Cu, Zn, Mn, Pb, Ni, Cd elements was in the rank as Cd>Mn>Pb>Zn>Ni>Cu. The existing accumulation of Mn, Zn, Pb, Cu, Cd, Ni elements in standing corps of the plantation were respectively 34.047, 3.351, 1.226, 0.874, 0.245, 0.084 kg·hm<sup>-2</sup>, the spatial distribution sequence of heavy metal elements pool amounts in different components ranked as trunk>bark>root>leaf>branch. The turnover period was Cu 13.9, Zn 7.0, Mn 3.1, Pb 20.4, Ni 2.1, Cd 12 (a). The flow coefficients were Ni>Mn>Zn>Cd>Cu>Pb.

**Key words:** Guangxi; *Pinus Massoniana* plantation; Heavy metal element; Absorption; Accumulation and dynamic

收稿日期: 2003-09-10 修订日期: 2003-12-24

基金项目: 国家科技部基础研究重大项目(2102); 国家科技部重点野外科学观测试验站(2000-076); 国家林业局重点项目(2001-07、2001-29)项目资助。

作者简介: 方晰(1968-), 女, 广西邕宁人, 副教授, 在读博士生, 从事生态学教学和森林生态学研究。

土壤重金属污染与防治问题引起了人们的广泛关注。在防治方法上,除必须采取的工业治理措施外,还应充分发挥绿色植物对土壤重金属污染的自净作用。近十几年来,国内外学者对重金属元素在植物体内吸收、累积、转化等开展了广泛的研究(Lepp,1981;余国营,1992;王新等,1994;马远宏等,1995)。但多以草本植物或农作物,尤其是以一年生草本植物为主要研究对象。相比之下,关于木本植物(特别是造林用材树种、观赏绿化树种或经济林树种)与重金属元素关系的研究只有零星分散的报道(Lepp,1981;余国营等,1998;William,1981)。马尾松(*Pinus massoniana* Lamb.)是我国松类中分布最广,数量最多的主要用材、薪炭材和造纸材树种,并具有耐干旱贫瘠,适应能力强,生长迅速,造林成本低和成林容易等优点,是我国南方低山丘陵荒山绿化的先锋树种和飞播造林的主要树种(中国树木志编委会主编,1981),其经济意义、环境效能及美学价值,均为人们所公认。对马尾松的生物学特性、

马尾松林的生产力与密度调控以及养分循环的特征已有学者进行了研究(中国树木志编委会主编,1981;田大伦,1989;李飞等,1996;周晓峰,1999;项文化等,2002)。本文旨在研究马尾松林对重金属元素Cu、Zn、Mn、Pb、Ni、Cd的吸收、累积及动态,探讨木本植物对土壤重金属元素的吸收、累积规律,为治理污染土壤的林业生态工程及城镇绿化树种选择,提供科学理论依据。

## 1 试验地自然概况

试验地设在广西禄峰山林场,地理坐标为109°40'E,23°45'N,年平均气温为21.1℃,年降水量为1418.5mm,相对湿度76%左右。土壤为第四纪红壤上发育的轻粘性红壤,土层厚达>1m,坡度<10°。在试验区内选择直播造林,未经人工抚育的23年生马尾松林分内设置面积为0.067hm<sup>2</sup>的固定样地4块。试验林分特征见表1。

表1 马尾松人工林的林分特征

Table 1 The stands features of the *Pinus massoniana* plantations

林龄 (a)	密度 (株·hm <sup>-2</sup> )	平均胸径 (cm)	平均树高 (m)	林分生物量(t·hm <sup>-2</sup> )					林分生产力 (t·hm <sup>-2</sup> a <sup>-1</sup> )	
				树叶	树枝	树皮	树干	树根		合计
23	1635	19.0	14.7	4.3	7.8	26.2	127.7	20.6	186.6	8.1

## 2 研究方法

### 2.1 林分生物量和净生产力的测定

林分生物量和年净生产力的测定采用标准地——标准木——分级分层切割法(刘茜,1996)。

### 2.2 年凋落物量的测定

在固定样地内,随机设置1m×1m的尼龙网收集器5个,每月收集凋落物1次,按组分(叶、小枝、皮、果、有机碎屑)测定干重。

### 2.3 分析样品的采集及分析测定方法

在测定生物量的同时,按层次分干、皮、叶(分当年生叶和老叶)、枝(分当年生枝和老枝)、根(分0.2cm、0.2~0.5cm、>0.5cm、根头),采集6株标准木的分析样品,对样品逐一进行化学分析,取6株标准木分析结果的平均值作为最终结果。

年凋落物按组分把各月份的凋落物混合,取混合样测定作为最终结果;死地被物按未分解、半分解、已分解3个层次在5个1m×1m的小样方中分别取样,再按未分解、半分解、已分解3个层次把5

个小样方中所取的样品分别混合,取混合样测定作为最终结果。在固定样地内,按0~15cm、15~30cm、30~45cm、45~60cm分层随机采集土样,重复3~4次,取混合样测定作为土壤的最终测定结果。同时测定容重,根据容重估算各层单位面积土壤的重量。

植物、土壤样品中的重金属Cu、Zn、Mn、Pd、Ni、Cd的含量测定采用干式灰化法, Hp3510原子吸收分光光度计测定(中国科学院南京土壤研究所微量元素组编,1979)。

## 3 结果与分析

### 3.1 林地土壤重金属元素的含量及储量

3.1.1 林地土壤重金属元素的含量 土壤中重金属元素的含量,既与母岩及成土母质有密切的关系,又受到局部环境质量状况、地形和生物地球化学循环的深刻影响。分析结果(表2)表明,广西武宣县马尾松林地土壤层(0~60cm)中重金属元素Cu、Zn、Mn、Pd、Ni、Cd的平均含量,分别为23.02,24.46,

235.46, 5.93, 8.45 和 0.14 mg · kg<sup>-1</sup>, 大小顺序为: Mn > Zn > Cu > Ni > Pb > Cd。在垂直分布上, 6 种重金属元素的含量分布规律基本上相同, 都是从土壤表层向下逐渐下降, 但下降的幅度都不大。

表 2 马尾松林地土壤中重金属元素的含量

Table 2 Heavy metal elements content in the *Pinus massoniana* forest-land soil (mg · kg<sup>-1</sup>)

土壤层次 (cm)	Cu	Zn	Mn	Pb	Ni	Cd
0~15	23.78	25.68	236.86	6.34	9.16	0.16
15~30	23.76	24.25	230.37	6.16	8.51	0.15
30~45	22.34	23.78	229.87	5.72	8.48	0.13
45~60	22.21	23.69	244.72	5.48	7.65	0.11
平均值	23.02	24.46	235.46	5.93	8.45	0.14
广西区平均值	20.79	46.43	172.57	18.82	15.16	0.0617
全国平均值	22.6	74.2	583	26.0	26.9	0.097

与广西区土壤重金属元素平均含量(中国环境监测总站, 1990)比较, 该林场的马尾松林地土壤重金属元素 Cu、Mn、Cd 含量明显高于背景值, 特别是 Cd 高出 2 倍之多, 而 Zn、Ni、Pd 的含量低于背景值。与全国土壤重金属元素平均含量(中国环境监测总站, 1990)相比, 广西武宣县禄峰山林场马尾松林地土壤除了 Cu 和 Cd 的含量略高于全国平均水平外, Zn、Mn、Pd、Ni 元素的含量都明显低于全国平均水平。

3.1.2 林地土壤重金属元素的储量 根据土壤各层的容重及其相应的重金属元素含量计算出林地土壤

重金属元素的储量(表 3)。由表 3 可知, 马尾松林地土壤中, 6 种重金属元素的总储量为 2 318.372 kg · hm<sup>-2</sup>, 主要分布在土壤下层(15~60 cm)中, 下层土壤中的各层储量均比土壤表层(0~15 cm)的储量要高。土壤层(0~60 cm)中重金属元素 Cu、Zn、Mn、Pd、Ni、Cd 的储量分别为 179.419, 189.500, 1836.637, 46.093, 65.664, 1.065 kg · hm<sup>-2</sup>, 大小排列的顺序为: Mn > Zn > Cu > Ni > Pb > Cd, 储量最大的 Mn 元素的储量是储量最小的 Cd 元素储量的 1 724.54 倍。

表 3 马尾松林地土壤中重金属元素的储量

Table 3 Heavy metal elements storage in the *Pinus massoniana* forest-land soil

土壤层次 (cm)	土壤容重 (g · cm <sup>-3</sup> )	Cu	Zn	Mn	Pb	Ni	Cd	合计 Total
		(kg · hm <sup>-2</sup> )						
0~15	1.099	39.203	42.335	390.483	10.452	15.101	0.264	497.838
15~30	1.400	49.899	50.928	483.802	12.937	17.872	0.315	615.753
30~45	1.343	45.006	47.907	463.096	11.524	17.084	0.262	584.879
45~60	1.360	45.311	48.330	499.256	11.180	15.607	0.224	619.902
合计	—	179.419	189.500	1836.637	46.093	65.664	1.065	2318.372

### 3.2 马尾松不同器官中重金属元素的含量

根据马尾松不同器官重金属元素含量的分析结果(表 4)表明, 植物体不同部位及不同元素的含量大都存在着明显的差异, Cu、Zn、Mn、Pd、Ni、Cd 的含量范围分别为 2.97~13.47, 12.09~42.93, 143.14~751.78, 2.87~25.12, 0.19~25.05, 0.16~1.24 mg · kg<sup>-1</sup>, 变异系数在 0.03~0.78 之间。树叶、树枝中, 各元素的含量排序为 Mn > Zn > Ni > Cu > Pb > Cd, 树皮中为 Mn > Zn > Cu > Pb > Ni > Cd, 树干、树根中为 Mn > Zn > Pb > Cu > Ni > Cd。从整体水平看, 其分布基本规律如下: Cu: 根 > 叶 > 枝 > 皮 > 干; Zn、Mn: 叶 > 枝 > 皮 > 根 > 干; Pb: 根 > 干 > 叶 > 枝 > 皮; Ni: 叶 > 枝 > 皮 = 干 = 根; Cd:

根 > 枝 > 叶 > 皮 > 干。

这表明, 不同重金属元素在马尾松植物体内的移动能力是不同的。显然, Mn、Zn、Ni 元素在马尾松植物体内是比较容易移动的, 根部吸收后能很快地输送到植物体的各个器官, 使得根部的含量明显低于叶和枝, 而 Pb、Cd 刚好相反, 根部吸收后却累积在根部, Cu 处于两者之间。6 种重金属元素在树干中的含量都较低。有研究表明, Cd 元素在植物体内易于形成稳定螯合物, 其移动比例较小, 90% 以上停留在根部内, 而 Mn、Zn 元素在植物体内却不大稳定, 约 50% 以上向地上部分移动(许嘉琳等, 1995)。

### 3.3 马尾松林对重金属元素的富集能力

植物对土壤元素的吸收富集能力可以用富集系

数来表示,富集系数=(植物体内某元素含量)/(该元素在土壤中的含量)。植物对土壤元素的吸收富集能力与该元素在土壤中的存在形态有关。关于重金属元素在土壤中存在形态的划分,国内外学者曾经做过广泛的研究(蔡志全,2001)。由于土壤重金属元素的有效态含量是一个动态过程,且提取方法有较大的差异,测定误差较大。在此用 Cu、Zn、Mn、Pd、Ni、Cd 的全量表示。马尾松根系生物量主要分布于 0~60 cm 土层中(中国树木志编委会主编,1981),因而在此采用四层土壤的加权平均计算土壤的含量,从而计算马尾松各器官的富集系数。

由表 4 可知,同一植物,富集系数随着重金属元

素种类、植物体内器官不同而不同。比较 6 种重金属元素在马尾松体内富集系数的平均值以及各器官的富集系数,可看出马尾松对 6 种重金属元素的总平均富集能力为 1.37;马尾松对不同重金属元素的富集能力不一样,对 Cd 的富集能力最强,富集系数为 2.98,而对 Cu 的富集能力最小,为 0.32,仅为 Cd 富集系数的 10.7%,总的趋势为: Cd>Mn>Pb>Zn>Ni>Cu。不同器官对同一种重金属元素的富集能力存在着一定的差异,其基本变化规律与各重金属元素在不同器官中的含量分布规律相同。从整体来看,不同器官对重金属元素的富集能力由大到小依次排列为:叶>根>枝>皮>干。

表 4 马尾松各器官中重金属元素的含量

Table 4 Heavy metal elements content of different organs in *Pinus massoniana*

器官	生物量 (t·hm <sup>-2</sup> )	重金属元素的含量 (mg·kg <sup>-1</sup> )						
		Cu	Zn	Mn	Pb	Ni	Cd	
树叶	—	8.71(0.40)	41.62(0.10)	751.78(0.60)	5.07(0.38)	25.05(0.47)	0.38(0.57)	
树枝	—	7.14(0.36)	36.56(0.22)	312.80(0.27)	4.03(0.32)	15.07(0.78)	0.63(0.29)	
树皮	—	4.97(0.13)	30.35(0.26)	232.86(0.14)	2.87(0.25)	0.32(0.60)	0.29(0.74)	
树干	—	2.97(0.08)	12.09(0.15)	143.14(0.46)	5.59(0.33)	0.35(0.20)	0.16(0.20)	
树根	细根	0.157	11.30(0.25)	42.93(0.04)	527.36(0.38)	20.16(0.16)	4.27(0.53)	0.77(0.25)
	粗根	0.23	10.47(0.26)	42.33(0.03)	449.35(0.34)	25.12(0.23)	3.77(0.48)	1.07(0.21)
	大根	0.837	7.98(0.24)	39.62(0.09)	414.62(0.28)	16.48(0.17)	1.93(0.27)	1.24(0.54)
	根头	19.38	13.47(0.20)	25.68(0.18)	178.50(0.35)	11.87(0.33)	0.19(0.47)	0.60(0.32)
平均	—	13.20	26.58	193.87	18.63	0.33	0.63	

注:括号内的数字为变异系数,树根中各元素含量的平均值是各元素在根部的总贮量的平均含量。

表 5 马尾松不同器官对土壤中重金属元素富集系数

Table 5 Heavy metal elements accumulation index of different organs in *Pinus massoniana*

器官	Cu	Zn	Mn	Pb	Ni	Cd	平均值
树叶	0.38	1.70	3.19	0.85	2.96	2.71	1.97
树枝	0.31	1.49	1.33	0.68	1.78	4.50	1.68
树皮	0.22	1.24	0.99	0.48	0.04	2.07	0.84
树干	0.13	0.49	0.61	0.94	0.04	1.14	0.56
树根	0.57	1.07	0.82	3.46	0.04	4.50	1.74
均值	0.32	1.20	1.39	1.28	0.97	2.98	1.37

### 3.4 马尾松林分中 6 种重金属元素的现存储量与分配

林分元素现存储量是指累积在林分现存生物量中各元素的总量,反映了林分长期吸收而净存留累积在植物体中的重金属含量。林分的元素现存储量与分配主要决定于林分生物量的积累(现存量)及其各组分中元素的含量。根据各组分的生物量及其相应的重金属元素含量计算,结果(表 6)表明,在马尾松林中,6 种重金属元素的总积累量为 39.791 kg·hm<sup>-2</sup>,Mn、Zn、Pb、Cu、Cd、Ni 元素的积累量分别为

34.047,3.351,1.226,0.874,0.245,0.084 kg·hm<sup>-2</sup>,其中地上部分分别为 30.053,2.803,0.843,0.602,0.238,0.035 kg·hm<sup>-2</sup>,各占总积累量的 88.27%,83.65%,68.76%,68.88%,97.14%,72.92%,地下部分分别为 3.994,0.548,0.384,0.272,0.007,0.013 kg·hm<sup>-2</sup>,各占总积累量的 11.73%,16.35%,31.24%,31.12%,2.86%,27.08%。

从表 6 可以看出,林分的生物量与重金属元素的累积量在各组分中分配上的差异。树干是最大的积累部位,各组分的重金属元素积累量的空间分布为:干>皮>根>叶>枝,基本上与生物量在各组分的分配成比例关系。树干(去皮)的生物量占林分总生物量的 68.4%,其重金属元素积累量占整个林分的重金属元素积累量的 52.6%,而可归还的叶、枝中,重金属元素储量分别只占总积累量的 9.0%和 7.4%。即重金属元素被树木吸收后,绝大多数积累在树木不易移动的部位中,从而减少了重金属元素向次级消费者转移的可能性,污染环境的作用下降。

据已有报道,在不同年龄的马尾松林中,大量营养元素(N、P、K、Ca、Mg)在树干中的积累量仅占林分总积累量的 23%~45%(项文化等,2002)。由此可见,如果在重金属元素污染的土壤上营造以用材林为主的林业生态工程,采伐时仅利用干材部分,其它的部分留在林地中让其自然分解,干材部分可以长

期储存其中的重金属元素。这样不仅可以降低土壤环境中的重金属元素污染,避免重金属元素通过食物链而对人体健康造成危害,而且也避免了其再向环境中扩散。同时,造成的养分输出不大,对林地生产力影响较小。但值得注意的是林木采伐后,环境条件改变对养分循环的途径和速率所产生的影响。

表 6 马尾松人工林分中重金属元素的现存累积量与空间分布

Table 6 Storage and spatial distribution of heavy metal elements in *Pinus massoniana* plantation

组分	生物量 (t · hm <sup>-2</sup> )	(kg · hm <sup>-2</sup> )						合计 Total
		Cu	Zn	Mn	Pb	Ni	Cd	
树叶	4.3(2.3)	0.037	0.179	3.233	0.022	0.108	0.002	3.581(9.0)
树枝	7.8(4.2)	0.056	0.285	2.440	0.031	0.118	0.005	2.935(7.4)
树皮	26.2(14.0)	0.130	0.795	6.101	0.075	0.008	0.008	7.117(17.9)
树干	127.7(68.4)	0.379	1.544	18.279	0.714	0.004	0.020	20.940(52.6)
树根	20.6(11.0)	0.272	0.548	3.994	0.384	0.007	0.013	5.218(13.1)
合计	186.6(100)	0.874	3.351	34.047	1.226	0.245	0.048	39.791(100)

注: 括号内的数据为百分数(%)

表 7 马尾松林 6 种重金属元素的吸收系数、利用系数和循环系数

Table 7 Absorption coefficient, utilization coefficient and cycle coefficient of six heavy Elements in *Pinus massoniana* plantation

元素	现存贮量 (kg · hm <sup>-2</sup> )	年吸收量 (kg · hm <sup>-2</sup> )	年存留量 (kg · hm <sup>-2</sup> )	年归还量 (kg · hm <sup>-2</sup> )	表土贮量 (kg · hm <sup>-2</sup> )	吸收系数	利用系数	循环系数	周转期 (a)
Cu	0.874	0.101	0.038	0.063	89.102	0.001	0.116	0.624	13.9
Zn	3.351	0.625	0.144	0.481	93.263	0.007	0.187	0.770	7.0
Mn	34.047	12.410	1.476	10.934	874.285	0.014	0.364	0.881	3.1
Pb	1.226	0.113	0.052	0.060	23.389	0.005	0.092	0.531	20.4
Ni	0.245	0.131	0.013	0.118	32.973	0.004	0.535	0.901	2.1
Cd	0.048	0.006	0.002	0.004	0.579	0.010	0.125	0.667	12

注: 年吸收量=年存留量+年归还量; 吸收系数=年吸收量/表土贮量; 利用系数=年吸收量/现存贮量; 循环系数=年归还量/年吸收量。

### 3.6 马尾松林中重金属元素的流动与迁移

3.6.1 重金属元素的流动系数 可以从元素的林分现存储量、吸收量和归还量(本次研究未将降水淋溶归还计算在内,仅计算了林分凋落物的归还,结果比实际偏低)以及表土(0~30 cm)中该元素贮量之间的关系,计算元素的流动系数即吸收系数、利用系数和循环系数(陈灵芝等,1983;拉夏埃尔,1982),从而揭示林分及其生境中相对的循环指标。从表 7 可以看出,马尾松林 Mn、Zn、Pb、Cu、Cd、Ni 元素的吸收系数排列顺序为 Mn>Cd>Zn>Pb>Ni>Cu,利用系数大小依次为 Ni>Mn>Zn>Cu>Cd>Pb,循环系数大小依次为 Ni>Mn>Zn>Cd>Cu>Pb。这表明该林分的这 6 种重金属元素的流动性为 Ni>Mn>Zn>Cd>Cu>Pb。与周转期分析 Ni 2.1 年快于 Mn 3.1 年快于 Zn 7.0 年快于 Cd 12 年快于 Cu 13.9 年快于 Pb 20.4 年规律相一致。

3.6.2 重金属元素的迁移 了解元素在植物体与环境之间的交换与迁移,有利于因地制宜地开发土壤肥力,同时,也可以了解植物对土壤中的元素选择吸收的规律(中国科学院南京土壤研究所,1990)。根据《中国土壤》(中国科学院南京土壤研究所,1990)中的元素迁移公式,计算出马尾松林中重金属元素的生物吸收率、生物归还率和生物分解率。

表 8 表明,6 种重金属元素的生物吸收率大小排列次序为: Mn>Ni>Cd>Zn>Pb>Cu,说明了植物对某种元素的吸收率与该元素在土壤中的含量关系不密切,与重金属元素本身的性质有很大的关系;生物归还率为: Mn>Zn>Cd>Ni>Pb>Cu,生物分解率为: Ni>Mn>Zn>Cd>Cu>Pb。可见,在马尾松人工林生态系统中,马尾松林与环境之间, Ni、Mn 的交换能力是最强、其移动性大,地面死地被物中的 Ni、Mn 能较快地进入再循环,其次是 Zn、

Cd,再次是 Cu、Pb。这与上述的流动性的变动情况是一致的。

#### 4 结 论

马尾松林地土壤中,6种重金属元素的含量分布规律基本上相同,都是从土壤表层向下逐渐下降,但下降的幅度都不大。从平均含量看,6种重金属元素在土壤中含量的排列顺序为:Mn>Zn>Cu>Ni>Pb>Cd。

Cu、Zn、Mn、Pd、Ni、Cd 在林木不同器官中的含量存在明显差异,含量范围分别为 2.97~13.47, 12.09~42.93,143.14~751.78,2.87~25.12,0.19~25.05,0.16~1.24 mg/kg,变异系数在 0.03~0.78 之间。

马尾松对 6 种重金属元素的总平均富集能力为 1.37,对不同重金属元素的富集能力不一样,总的趋势为: Cd>Mn>Pb>Zn>Ni>Cu。从整体来看,不同器官对重金属元素的富集能力由大到小依次排列为:叶>根>枝>皮>干。

表 8 重金属元素在马尾松林与外界之间的交换率

Table 8 Exchange ratio of heavy metal elements between the Pinus massoniana plantation and environments

项目 Items	Cu	Zn	Mn	Pb	Ni	Cd
鲜叶含量(mg·kg <sup>-1</sup> )	8.71	41.62	751.78	5.07	25.05	0.38
落叶含量(mg·kg <sup>-1</sup> )	5.04	43.66	983.20	3.30	11.96	0.22
死地被物含量(mg·kg <sup>-1</sup> )	12.86	36.95	658.04	79.54	4.98	0.45
表层土壤含量(mg·kg <sup>-1</sup> )	23.77	24.97	233.62	6.25	8.84	0.16
生物吸收率	0.37	1.67	3.22	0.81	2.83	2.38
生物归还率	0.21	1.75	4.21	0.53	1.35	1.38
生物分解率	0.39	1.18	1.49	0.04	2.36	0.49

注:土壤表层的重金属元素的含量为 0~30 cm 土层的加权平均含量;生物吸收率=鲜叶中某元素含量/表土中相应元素含量;生物归还率=落叶中某元素含量/表土中相应元素含量;生物分解率=落叶中某元素含量/死地被物中相应元素含量。

在马尾松林中,6种重金属元素的总积累量为 39.791 kg·hm<sup>-2</sup>,Mn、Zn、Pb、Cu、Cd、Ni 元素的积累量分别为 34.047, 3.351, 1.226, 0.874, 0.245, 0.084 kg·hm<sup>-2</sup>。树干是最大的积累部位,各组分的重金属元素积累量的空间分布为:干>皮>根>叶>枝,基本上与生物量在各组分的分配成比例关系。即绝大多数重金属元素被吸收并积累在树木不易移动的部位。从而减少了重金属元素向次级消费者转移的可能性,当林木被采伐直接利用后,起到良好的环境净化作用。

在马尾松人工林生态系统中,林木与环境之间,Ni、Mn 的交换能力最强、流动性大,地面死地被物中的 Ni、Mn 能较快地进入再循环,其次是 Zn、Cd,再次是 Cu、Pb。

#### 参考文献:

- 马远宏,范瑜,胡维佳. 1995. 重金属在土壤——作物系统中的迁移分配规律的分析[J]. 江苏环境科技, (1): 8-10.  
中国树木志编委会主编. 1981. 中国主要树种造林技术[M]. 北京: 中国林业出版社, 85-102.  
中国科学院南京土壤研究所微量元素组编. 1979. 土壤和植物中微量元素分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 137-226.

- 中国环境监测总站. 1990. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社.  
中国科学院南京土壤研究所. 1990. 中国土壤[M]. 北京: 科学出版社, 499-500.  
许嘉琳,杨居荣. 1995. 陆地生态系统中的重金属[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 172-179.  
周晓峰. 1999. 中国森林与生态环境[M]. 北京: 中国林业出版社, 518-519.  
拉夏埃尔 W. (李博译). 1982. 植物生理生态学[M]. 北京: 科学出版社.  
Cai ZQ(蔡志全), Ruan HH(阮宏华), Ye JZ(叶镜中). 2001. A Preliminary Study on the Absorption and Accumulation in Oak (*Quercus variabilis*) Stand in Suburb of Nanking(栓皮栎林对城郊重金属元素的吸收和积累)[J]. *Journal of Nanjing Forestry University*(南京林业大学学报), 25(1): 18-22.  
Chen LZ(陈灵芝), Lindley DK. 1983. Nutrient Cycling in Hampsfell Bracken Grassland Ecosystem, England(英国 Hampsfell 的蕨菜草地生态系统的营养元素循环)[J]. *Acta Botanica Sinica*(植物学报), 25(1): 67-74.  
Li F(李飞), Chen YY(陈永瑞). 1996. A study on the Nutrient Cycling of the Mineral elements in the *Pinus massoniana* forest mixed with broad-leaved trees(人工马尾松阔叶混交林矿质营养循环的研究)[J]. *Scientia Silvae Sinicae*(林业科学), 35(3): 16-21.

(下转第 455 页 Continue on page 455)

学农药施用的新技术的潮流在新西兰方兴未艾。截止 2003 年底,以下几方面的研究运用较有代表性。

2.4.1 选育抗病能力强的果树新品种 新西兰国家园艺所选育出的梨子新品种几乎能抵抗所有真菌感染病害,并开始在果园中试种,同时大力进行对其它种类果树抗病新品种的选育研究。

2.4.2 果园普遍采用病虫害综合防治措施 除了研究和应用高效低毒、易分解农药外,多数果园对害虫还采用黑光灯诱杀、化学剂诱杀、化学剂干扰雌雄害虫交配、释放害虫天敌等生态防治进行控制。

2.4.3 大型防虫网兴起 受其它作物如草莓、葡萄用防虫网防害虫的启发,新西兰一些果园开始搭建大型防虫网保护果园免遭昆虫和有害动物的侵袭。果园上张开的巨网将整个果园笼罩起来,只有出入口可以临时开关,一切昆虫、有害动物均被阻隔在巨网之外,切断了虫媒传播疾病感染果树的途径。大型防虫网的使用极大的减少了果园施用农药的次数和数量,是果园生产符合“绿色”产品要求的有力保障,但其投资庞大,目前主要在杂交桃、李、甜梅等果园采用。搭建大型的防虫网保护果园符合当代环保潮流,是一种具有积极探索意义的方法,但现阶段并非多数果园承受得起,其发展潜力仍有待观察。

### 3 新西兰果树栽培技术发展趋势预测

新西兰果树是靠国际市场生存的(Kerr 等,

2002),为在激烈的国际竞争中保持领先的地位,选育栽培更加优良的果树品种,扩大新品种水果出口量的比例将是新西兰今后长期坚持的方向。密植矮化、简化枝条定向牵引技术将成为新西兰果树栽培技术的主流。同时,对生产“绿色”水果,包括选育抗病品种、物理防虫、化学控制病虫害、生物方法控制病虫害的试验和推广将越来越受到重视和加强。新方法、新技术的不断出现,新西兰将形成一套更成熟有效的“绿色”水果生产技术系统。

#### 参考文献:

- Harold Bradford Tukey. 1978. Dwarfed Fruit Trees [M]. USA; USA Cornell University Press, 11-13.
- Kerr JP, Hewett EW, Aiken AG. 2002. New Zealand Horticulture Facts & Figures [M]. New Zealand; Martech Consulting Group Ltd Press, 16, 3-4, 3.
- ORourke Des. 2002a. World Kiwifruit Review [M]. USA; Belrose Press, 37-39.
- ORourke Des. 2002b. World Apple Review [M]. USA; Belrose Press, 39-40.
- ORourke Des. 2002c. World Pear Review [M]. USA; Belrose Press, 19-21.
- Rose Mannering. 1999. A History of Fruitgrowing in Hawke's Bay [M]. New Zealand; Publishing Solutions Limited Press, 1-2.

(上接第 442 页 Continue from page 442)

- Lepp NW. 1981. Effects of heavy metals pollution on plants [M]. London; Applied Science 1, 35-39.
- Liu Q(刘茜). 1996. Studies of the Biomass and Productivity of Different Age-group Pinus massoniana Plantation(不同龄组马尾松人工林生物量及生产力的研究)[J]. *Journal of Central South Forestry University* (中南林学院学报), 16(4):47-52.
- Tian DL(田大伦). 1989. Studies on nutrient elements cycling and density effect of pole stage of *Pinus massoniana* stand (马尾松林杆材阶段养分循环及密度关系的研究)[J]. *Scientia Silvae Sinicae* (林业科学), 25(2): 106-112.
- Wang X(王新), Wu YY(吴燕玉), Liang RL(梁仁禄), et al. 1994. Effects of various modifiers on migration and accumulation of heavy metals(各种改良剂对重金属迁移积累影响的研究)[J]. *Chinese journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 5(1): 89-94.

- William H Smith. 1981. Air Pollution and forests [M]. Springer-Verlag New York Inc.
- Xiang WH(项文化), Tian DL(田大伦). 2002. Nutrient cycling in pinus massoniana stands of different age classes(不同年龄阶段马尾松人工林养分循环的研究)[J]. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 26(1): 89-95.
- Yu GY(余国营), Wu YY(吴玉树), Wang HX(王焕校). 1992. Effects of the different cadmium compounds and their interaction on the Wheat (*Triticum aestivum* L.) (不同形态 Cd 及其与 Zn 的相互作用对小麦生理的影响)[J]. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2(2): 92-94.
- Yu GY(余国营), Wu YY(吴燕玉). 1998. Transfer and cycling of heavy metals in and out of the larch trees (*Larix olgensis* var. *koreana* Nakai) before and after leaf fallen (落叶松落叶前后重金属元素内外迁移循环规律研究)[J]. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 18(2): 203-209.