

# 深圳福田红树林无瓣海桑与海桑群落的重金属累积和循环

咎启杰<sup>1,2</sup>, 王勇军<sup>1</sup>, 王伯荪<sup>2</sup> (1. 广东内伶仃福田国家级自然保护区, 深圳 518040; 2. 中山大学生命科学院, 广州 510275)

摘要: 研究了深圳福田红树林无瓣海桑与海桑群落对重金属 Cu、Pb、Zn、Cr、Ni 元素的吸收、累积、分布和循环。结果表明, 该林地表层土壤(0~30cm) Cu、Pb、Zn、Cr、Ni 元素的储量关系为 Zn > Pb > Ni > Cr > Cu; 群落中 3 种植物对土壤中 5 种重金属元素富集能力的大小依次为海桑 > 无瓣海桑 > 秋茄。该群落 Cu、Pb、Zn、Cr、Ni 的现存累积量分别为: 23019.61、23429.65、117870.41、6835.79、12995.08 μg/m<sup>2</sup>; 年吸收量分别为: 6592.20、2664.77、24123.56、853.25、1990.86 μg/m<sup>2</sup>; 年归还量分别为: 3179.50、1300.64、8401.31、398.99、646.20 μg/m<sup>2</sup>; 年储存量分别为: 3413.07、1364.13、15722.25、454.25、1344.66 μg/m<sup>2</sup>; 周转期分别为: 8a、19a、15a、18a、21a。

关键词: 无瓣海桑; 海桑; 重金属; 累积; 循环

中图分类号: X173 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2002)04-08-0081

## Accumulation and Cycle of Heavy Metal in *Sonneratia apetala* and *S. caseolaris* Mangrove Community at Futian of Shenzhen, China

Zan Qijie<sup>1,2</sup>, Wang Yongjun<sup>1</sup>, Wang Bosun<sup>2</sup> (1. Neilingding Futian National Nature Reserve of Guangdong, Shenzhen 518040, China; 2. School of Life Sciences, Zhongshan University, Guangzhou 510275, China)

**Abstract:** The absorption, accumulation, distribution and cycle of Cu, Pb, Zn, Cr and Ni in *S. apetala* and *S. caseolaris* Mangrove Community at Futian Mangrove Nature Reserve of Shenzhen were studied. The results showed that the Cu, Pb, Zn, Cr and Ni contents in forest soil were increased from bottom to surface layer, and the storage of the five heavy metals in the surface layer (depth 0~30cm) was Zn > Pb > Ni > Cr > Cu. The concentration ability was *S. caseolaris* > *S. apetala* > *K. candell.* The existing accumulation of Cu, Pb, Zn, Cr and Ni in the community were respectively 23019.61 μg/m<sup>2</sup>, 23429.65 μg/m<sup>2</sup>, 117870.41 μg/m<sup>2</sup>, 6835.79 μg/m<sup>2</sup>, 12995.08 μg/m<sup>2</sup>. The annual absorption were 6592.20 μg/m<sup>2</sup>, 2664.77 μg/m<sup>2</sup>, 24123.56 μg/m<sup>2</sup>, 853.25 μg/m<sup>2</sup>, 1990.86 μg/m<sup>2</sup>, respectively. The annual return were 3179.50 μg/m<sup>2</sup>, 1300.64 μg/m<sup>2</sup>, 8401.31 μg/m<sup>2</sup>, 398.99 μg/m<sup>2</sup>, 646.20 μg/m<sup>2</sup>, respectively. The annual net retention accumulation of Cu, Pb, Zn, Cr and Ni in the community were 3413.07 μg/m<sup>2</sup>, 1364.13 μg/m<sup>2</sup>, 15722.25 μg/m<sup>2</sup>, 454.25 μg/m<sup>2</sup>, 1344.66 μg/m<sup>2</sup>. The turn over period of Cu, Pb, Zn, Cr and Ni were 8, 19, 15, 18 and 21 years.

**Keywords:** *Sonneratia apetala*; *S. caseolaris*; heavy metal; accumulation; cycle

深圳湾湿地生态系统是华南地区具有国际意义的重要生态系统之一, 其中以香港一侧的米埔和深圳一侧的福田 2 个红树林自然保护区为核心, 为许多珍稀和濒危生物提供栖息、觅食、繁殖场所, 特别是大量的候鸟<sup>[1,2]</sup>。随着深港两岸发展, 大量泥沙和未经处理的废水排入深圳湾, 造成淤积和生态环境的污染。为了增加福田红树林自然保护区生物多样性, 提高生态环境质量, 确保深圳湾湿地生态系统的稳定和可持续发展, 20 世纪 90 年代初, 在福田红树林保

护区内引种栽培无瓣海桑 (*Sonneratia apetala* Buch.-Ham.)、海桑 (*S. caseolaris* (L.) Engl.), 并迅速成林<sup>[3]</sup>。本文对无瓣海桑加海桑人工林群落的铜、铅、锌、铬、镍元素的吸收、累积和循环进行研究, 以探讨深圳湾红树林污染物在泥

基金项目: 国家“九五”科技攻关项目(96-007-03-04); 国家自然科学基金重大项目(39899370); 国家自然科学基金项目(30070144); 深圳市科技局项目(99-1-33)

作者简介: 咎启杰(1968~), 男, 博士生, 助理研究员, 主要从事红树林生态系统的保护研究及森林生态研究。

收稿日期: 2001-06-06; 修订日期: 2001-09-17

滩的存留及人工林对重金属污染物的吸收、积累等动态,进而为福田红树林生态系统的保护和管理提供科学依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究地概况

深圳福田红树林自然保护区(22°32' N, 114°03' E)属于亚热带季风气候,年平均气温 22℃,极端高温 38.7℃(7月),极端低温 0.2℃(1月),年降雨量 1927 mm,但分布不均,干湿季节交替明显,雨量多集中在 5~9月,年均相对湿度 79%。该区海域属深圳湾东部中段,潮汐

属不规则半日潮,平均潮差 1.9 m。该区土壤基质为花岗岩及砂页岩,地带性土壤为赤红壤,种植人工林的土壤为淤粘海泥,脚踩泥深度约 40 cm 以上,林地土壤理化性质如表 1。群落林龄平均为 5 a,林高 6~7 m,主要由人工种植的无瓣海桑、海桑、秋茄(*Kandelia candel* (L.) Druce)组成,伴有少量的桐花树(*Aegiceras corniculatum* (L.) Blanco)。无瓣海桑、海桑和秋茄的密度分别为:457 株/hm<sup>2</sup>, 319 株/hm<sup>2</sup>, 5050 株/hm<sup>2</sup>,乔木层分 2 层,上层为无瓣海桑和海桑,下层为秋茄<sup>[3]</sup>。

表 1 林地土壤的理化性质

Table 1 Physical and chemical feature of soil in Forest

土壤深度/cm	pH	盐度/%	容重/g·cm <sup>-3</sup>	有机质/%	全 N/%	全 P/%	全 K/%
表层(0~30)	6.01	25.53	0.784	27.48	1.27	0.90	23.16
中层(30~60)	7.94	8.37	0.817	11.13	0.54	0.50	24.82
底层(60~90)	8.29	8.15	0.912	7.50	0.41	0.31	27.87

### 1.2 取样与分析

1999年11月,在无瓣海桑加海桑林中,选取一块 40 m × 40 m 样地进行采样调查分析<sup>[4]</sup>。

土壤按分层采样法,分别采 0~30 cm、30~60 cm、60~90 cm 的土样,经过自然风干后,过 100 目尼龙筛备用。植物样品采集后按不同种、不同器官组分分别于 60℃ 下烘干,经研钵磨碎过 100 目尼龙筛备用。土壤和植物样品经 HNO<sub>3</sub>-HClO<sub>4</sub> 消化后,用 ICP 光谱仪测定 Cu、Pb、Zn 元素含量,用石墨炉法测定 Cr、Ni 的含量。土壤盐度用 AgNO<sub>3</sub> 滴定法,土壤 pH 用电位法测定,水土比为 5:1<sup>[5]</sup>。

根据土壤容重计算每 m<sup>2</sup> 表层土壤(0~30 cm)重量与土壤元素含量的乘积即为每 m<sup>2</sup> 林地土壤中元素储量。群落凋落物、生物量和年净增长量的测定方法及结果已有报道<sup>[4]</sup>,根据群落各组分的现存生物量<sup>[4]</sup>与植物体相应组分元素含量的乘积,求得群落元素的现存累积量。年归还量则根据凋落物生物量<sup>[4]</sup>与凋落物中元素含量的乘积求得。

## 2 结果与讨论

### 2.1 群落土壤 Cu、Pb、Zn、Cr、Ni 含量及植物

### 的富集系数

深圳福田无瓣海桑加海桑林不同层次土壤中 Cu、Pb、Zn、Cr、Ni 的含量均为表层 > 中层 > 底层(表 2)。上层含量最高,可能在于生境受污染之故。该林区土壤的 5 种重金属元素含量比深圳福田 56 年白骨壤林地土壤的相应重金属含量要高<sup>[6]</sup>,也比福建九龙江口浮宫秋茄林和广西英罗港红海榄林地土壤的相应重金属元素含量要高<sup>[7,8]</sup>,主要是因为红树林区积累重金属元素的高低与其生境变化密切相关,也与深圳湾受深港两地城市排放重金属元素污染有关。

根据土壤元素含量,再结合土壤容重计算,该群落土壤中 5 种元素储量大小依次为:Zn > Pb > Ni > Cr > Cu。

植物对土壤元素的吸收富集能力可以用富集系数表示,富集系数=(植物体内某元素的含量)/(该元素在土壤中含量)。富集系数与多种因素有关,从本质而言,植物对土壤元素的吸附能力与植物对元素的需求有关,也与土壤中该元素的含量及存在形式有关,而元素的存在形态因不同因素而不同。由表 3 可知,富集系数随着植物种类、植物体内部位的不同而不同,比较

5 种元素在植物体内各部位富集系数,可以看出最高,树干、老枝或树皮的富集系数较低.3 种出 Cu、Pb、Zn、Cr 都是细根或中根的富集系数植物的 Ni 富集系数最高和最低的部位各不相同

表 2 林地土壤 5 种元素含量及储量

Table 2 The content and pool amount of 5 elements in soil

土壤深度/c m Depth of soil	元素含量/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ elements contents					元素储量/ $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ Pod amount of elements				
	Cu	Pb	Zn	Cr	Ni	Cu	Pb	Zn	Cr	Ni
表层(0~30) Surface layer	45.58	69.92	125.08	58.04	62.8	10.72	16.45	29.42	13.65	14.77
中层(30~60) Mid-layer	25.14	56.41	95.41	34.2	49.94	6.16	13.83	23.29	8.38	12.24
底层(60~90) Bottom layer	10.69	51.92	81.76	23.81	33.58	2.92	14.02	22.37	6.51	9.19

表 3 3 种植物的富集系数(0~30cm 表层土壤)

Table 3 Accumulation index of 3 species (soil depth 0~30cm)

种	组分	Cu	Pb	Zn	Cr	Ni
无瓣海桑 <i>S. apetala</i>	叶 Leaf	0.104	0.056	0.164	0.018	0.052
	幼枝 Twig	0.070	0.031	0.093	0.009	0.025
	老枝 Perennial branch	0.042	0.018	0.047	0.008	0.025
	枯枝 Dead branch	0.078	0.031	0.118	0.009	0.032
	树干 Trunk	0.027	0.025	0.058	0.009	0.007
	树皮 Bark	0.068	0.048	0.114	0.025	0.074
	花果 Flower and Fruit	0.097	0.042	0.125	0.017	0.044
	呼吸根 Pneumatophere	0.122	0.060	0.231	0.025	0.064
	粗根 Big root	0.059	0.041	0.115	0.024	0.024
	中根 Mid root	0.069	0.057	0.236	0.027	0.040
	细根 Fine root	0.217	0.338	0.637	0.050	0.062
	加权平均 Weight average	0.087	0.065	0.187	0.020	0.039
海桑 <i>S. caseolaris</i>	叶 Leaf	0.147	0.048	0.268	0.017	0.038
	幼枝 Twig	0.211	0.042	0.135	0.017	0.031
	老枝 Perennial branch	0.101	0.030	0.065	0.008	0.025
	枯枝 Dead branch	0.216	0.043	0.113	0.009	0.039
	树干 Trunk	0.079	0.019	0.047	0.009	0.013
	树皮 Bark	0.188	0.074	0.124	0.026	0.071
	花果 Flower and Fruit	0.182	0.041	0.144	0.017	0.037
	呼吸根 Pneumatophere	0.130	0.089	0.168	0.036	0.073
	粗根 Big root	0.083	0.056	0.101	0.017	0.026
	中根 Mid root	0.148	0.114	0.203	0.045	0.066
	细根 Fine root	0.273	0.313	0.310	0.078	0.058
	加权平均 Weight average	0.158	0.079	0.199	0.027	0.045
秋茄 <i>Kandelia candel</i>	叶 Leaf	0.076	0.024	0.411	0.017	0.038
	幼枝 Twig	0.071	0.035	0.100	0.008	0.024
	老枝 Perennial branch	0.044	0.035	0.061	0.008	0.024
	枯枝 Dead branch	0.048	0.041	0.078	0.008	0.036
	树干 Trunk	0.031	0.012	0.055	0.009	0.019
	树皮 Bark	0.058	0.028	0.138	0.016	0.059
	胚轴 Hypocotyl	0.058	0.017	0.127	0.012	0.018
	粗根 Big root	0.064	0.044	0.194	0.018	0.039
	中根 Mid root	0.091	0.097	0.507	0.026	0.057
	细根 Fine root	0.089	0.260	0.674	0.061	0.052
	加权平均 Weight average	0.059	0.051	0.148	0.015	0.034

同.比较 5 元素在植物体内的富集系数及加权平均值,可以看出,海桑富集能力最大,无瓣海桑次之,秋茄最小.3 种植物对 5 元素的富集系数的大小序列都是:Zn > Cu > Pb > Ni > Cr,说明 3 种植物对 Zn、Cu 的富集能力较大,对 Ni、Cr 的富集能力最小.

## 2.2 群落植物体内不同部位 Cu、Pb、Zn、Cr、Ni 的含量

该群落中无瓣海桑、海桑、秋茄不同部位 5

元素含量分析结果表明(表 4):各元素在同一植物的不同部位含量不同,而同种元素在不同植物的相同部位含量也不同.如 3 种植物不同部位的 Cu 含量多少排序为,无瓣海桑:细根 > 呼吸根 > 叶 > 花果 > 枯枝 > 幼枝、中根、树皮 > 粗根 > 老枝 > 树干;海桑:细根 > 枯枝 > 幼枝 > 树皮 > 花果 > 叶、中根 > 呼吸根 > 老枝 > 树干 > 粗根;秋茄:细根、中根 > 叶、幼枝 > 粗根、胚轴、树皮 > 老枝、枯枝 > 树干.再如 3 种植物

表 4 5 种元素在植物体不同部位的含量

Table 4 The content of 5 elements in different fractions of mangrove plant

种	组分	元素含量/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$				
		Cu	Pb	Zn	Cr	Ni
无瓣海桑 <i>S. apetala</i>	叶 Leaf	4.76	3.92	20.55	1.02	3.27
	幼枝 Twig	3.20	2.13	11.57	0.50	1.60
	老枝 Perennial branch	1.90	1.24	5.85	0.49	1.55
	枯枝 Dead branch	3.55	2.13	14.73	0.50	2.00
	树干 Trunk	1.23	1.75	7.29	0.51	0.41
	树皮 Bark	3.11	3.32	14.20	1.45	4.67
	花果 Flower and Fruit	4.42	2.94	15.68	0.98	2.75
	呼吸根 Pneumatophere	5.56	4.16	28.86	1.46	3.99
	粗根 Big root	2.70	2.83	14.38	1.42	1.52
	中根 Mid root	3.13	3.98	29.52	1.55	2.49
	细根 Fine root	9.88	23.61	36.63	2.91	3.88
加权平均 Weight average	3.85	4.52	16.01	1.01	2.36	
海桑 <i>S. caseolaris</i>	叶 Leaf	6.72	3.35	33.49	0.98	2.36
	幼枝 Twig	9.63	2.92	16.88	0.98	1.96
	老枝 Perennial branch	4.59	2.10	8.12	0.49	1.58
	枯枝 Dead branch	9.84	3.04	14.16	0.51	2.44
	树干 Trunk	3.61	1.30	5.83	0.51	0.81
	树皮 Bark	8.56	5.16	15.46	1.51	4.43
	花果 Flower and Fruit	8.30	2.86	18.04	0.96	2.30
	呼吸根 Pneumatophere	5.94	6.22	21.03	2.08	4.60
	粗根 Big root	3.78	3.88	12.57	1.01	1.62
	中根 Mid root	6.77	7.99	25.35	2.59	4.16
	细根 Fine root	12.43	21.91	38.71	4.52	3.62
加权平均 Weight average	7.07	5.05	18.96	1.45	2.70	
秋茄 <i>Kandelia candel</i>	叶 Leaf	3.46	1.710	51.410	0.999	2.40
	幼枝 Twig	3.24	2.453	12.457	0.478	1.53
	老枝 Perennial branch	2.02	2.422	7.619	0.472	1.51
	枯枝 Dead branch	2.20	2.848	9.812	0.476	2.29
	树干 Trunk	1.43	0.859	6.824	0.502	1.21
	树皮 Bark	2.62	1.965	17.277	0.919	3.69
	胚轴 Hypocotyl	2.65	1.174	15.867	0.465	1.12
	粗根 Big root	2.93	3.078	24.217	1.028	2.47
	中根 Mid root	4.14	6.807	63.453	1.492	3.59
	细根 Fine root	4.04	18.194	84.310	3.545	3.25
	加权平均 Weight average	2.77	4.051	27.375	1.028	2.26

的细根对 Ni、Zn 的含量多少排列分别为:无瓣海桑 > 海桑 > 秋茄,秋茄 > 海桑 > 无瓣海桑.3 种植物均是细根的 Cu、Pb、Zn、Cr、Ni 的含量最高,且根部对 5 元素的含量均为细根 > 中根 > 粗根.这主要是因为细根是植物的主要吸收器官,可能吸收的重金属元素大部分仍留于根部的外皮层,因此,其含量显著高于其它部位.无瓣海桑、海桑的呼吸根对 5 元素含量也显著高于地上部分其它部位,可能是由于呼吸根在涨潮中从海水吸收了 5 元素,增加了元素含量.树干材和多年生枝的 Cu、Pb、Zn、Cr、Ni 的含量明显较低,这与福田 56 年白骨壤红树林研究结果一致<sup>[6]</sup>,这可能与树干材含机械成分较高,不易累积重金属元素有关.从 3 种植物各部位元素

含量的加权平均值看,Cu、Pb、Zn、Cr、Ni 在 3 种植物各部位的含量的加权平均值大小排列为,无瓣海桑:Pb > Zn > Cu > Ni > Cr,海桑:Zn > Cu > Pb > Ni > Cr,秋茄:Zn > Pb > Cu > Ni > Cr.这说明不同植物体的器官对不同重金属的含量不同.

### 2.3 群落 Cu、Pb、Zn、Cr、Ni 的现存累积量及分布

群落的元素现存累积量是群落现存生物量中各元素的含量,反映了群落长期吸收而净存留在植物体中的元素量,可根据植物不同部位元素含量结合各组分现存生物量计算.从表 5 看,该群落 Cu、Pb、Zn、Cr、Ni 现存累积量分别为 23019.61、23429.65、117870.41、

表 5 林地 5 种元素的现存累积量及分布

Table 5 Pod amount and distribution of 5 elements in forest

种	组分	元素量/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$				
		Cu	Pb	Zn	Cr	Ni
无瓣海桑	叶 Leaf	718.11(9.48)	590.83(7.53)	3098.19(7.37)	153.51(5.95)	492.36(9.45)
<i>S. apetala</i>	枝 Branch	2136.93(28.21)	1412.96(18.01)	7185.96(18.02)	428.30(16.62)	1372.38(26.33)
	树干 Trunk	1265.88(16.71)	1703.43(21.71)	7101.18(17.18)	497.98(19.32)	399.55(7.66)
	树皮 Bark	678.91(8.97)	724.33(9.23)	3099.86(7.77)	317.41(12.31)	1018.59(19.54)
	花果 Flower and Fruit	5.300(0.07)	3.52(0.04)	18.82(0.05)	1.18(0.05)	3.30(0.06)
	根 Root	2769.08(36.56)	3412.339(43.48)	19374.82(48.58)	1179.17(45.75)	1926.95(36.96)
	总量 Total	7574.20(100)	7847.40(100)	39878.83(100)	2577.54(100)	5213.08(100)
海桑	叶 Leaf	462.94(4.85)	231.09(3.24)	2307.32(10.7)	67.5223.93)	162.47(4.92)
<i>S. caseolaris</i>	枝 Branch	3681.42(38.57)	1353.55(19.02)	6477.23(30.04)	381.68(22.19)	962.73(29.14)
	树干 Trunk	1728.35(18.11)	2246.86(31.54)	2792.47(12.95)	242.32(14.09)	388.87(11.77)
	树皮 Bark	432.38(4.53)	260.33(3.65)	780.93(3.62)	76.05(4.42)	223.72(6.77)
	花果 Flower and Fruit	89.64(0.94)	30.88(0.43)	194.79(0.91)	10.31(0.59)	24.81(0.75)
	根 Root	3149.70(33.00)	2999.90(42.12)	9009.75(41.78)	942.26(54.78)	1541.23(46.65)
	总量 Total	9544.43(100)	7122.61(100)	21562.49(100)	1720.16(100)	3303.82(100)
秋茄	叶 Leaf	582.65(9.87)	287.62(3.40)	8647.16(15.32)	168.03(6.62)	404.35(9.03)
<i>Kandelia candel</i>	枝 Branch	1326.49(22.48)	1095.63(12.95)	3972.64(7.04)	196.26(7.73)	632.06(14.11)
	树干 Trunk	814.38(13.80)	625.57(7.40)	3880.81(6.88)	285.49(11.25)	687.59(15.35)
	胚轴 Hypocotyl	41.14(0.70)	18.20(0.24)	245.94(0.44)	7.21(0.28)	17.36(0.39)
	根 Root	3136.33(53.15)	6432.62(76.04)	39682.55(70.32)	1881.12(74.12)	2736.90(61.12)
	总量 Total	5900.98(100)	8459.65(100)	56429.10(100)	2538.10(100)	4478.18(100)
林地总量 Sum		23019.61(300)	23429.65(300)	117870.41(300)	6835.79(300)	12995.08(300)

6835.79、12995.08 $\mu\text{g}/\text{m}^2$ 。从种群各器官的 Cu、Pb、Zn、Cr、Ni 累积分布看,根部 Cu、Pb、Zn、Cr、Ni 累积量最大,分别占群落现存累积量的 39.3%、54.8%、57.8%、58.6%、47.8%;枝和树干材次之,叶、花果、幼枝等较细嫩的部分均占很少的储存比。Cu、Pb、Zn、Cr、Ni 存储于根、树干材和多年枝等不易被次级消费者取食的器官,减少了向次级消费者提供重金属污染物的可能性,对环境具有一定的净化作用。表 5 也可以看出,不同植物累积 Cu、Pb、Zn、Cr、Ni 元素的量也不同,海桑对 Cu、无瓣海桑对 Cr 和 Ni、秋茄对 Pb 和 Zn 的累积最大,分别占群落总累积量的 41.5%、37.7%、40.1%、36.1%、47.9%;秋茄对 Cu、海桑对 Pb、Zn、Cr 和 Ni 的累积量最小。这表明不同植物对重金属的累积

特性不同。

## 2.4 群落 Cu、Pb、Zn、Cr、Ni 的生物循环

(1) 群落 Cu、Pb、Zn、Cr、Ni 的年存留量  
年存留量是一年内群落净累积在植物体内的元素总量,据测定的群落年净增长量和测定的各元素含量来计算<sup>[4]</sup>,结果见表 6。群落 Cu、Pb、Zn、Cr、Ni 的年存留量分别为:3413.07、1364.13、15722.25、454.25、1344.66 $\mu\text{g}/\text{m}^2$ 。Cu、Pb 在海桑植物体内年存留量最大,Zn、Cr、Ni 在无瓣海桑植物体的年存留量最大;Cu、Cr 在秋茄植物体内年存留量最小,Zn、Ni 和 Pb 分别在海桑和无瓣海桑植物体内年存留量最小。从表 6 看,Cu、Pb、Zn、Cr、Ni 在植物体各部位的年存留量均以根部的存留量最大,其次是枝和树干材,其它部分的年存留量所占的比例较少。

表 6 林地 5 元素的年存留量

Table 6 The yearly net retention accumulation of 5 elements in forest

种	组分	元素量/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$				
		Cu	Pb	Zn	Cr	Ni
无瓣海桑	叶 Leaf	101.19(9.68)	37.00(8.38)	379.64(7.84)	10.30(5.85)	46.25(8.96)
<i>S. apetala</i>	枝 Twig	268.36(25.66)	78.56(17.79)	755.96(15.61)	28.89(16.4)	129.52(25.07)
	树干 Trunk	157.18(15.03)	48.94(11.08)	766.72(15.83)	29.44(16.71)	33.07(6.40)
	树皮 Bark	140.11(13.40)	66.43(15.04)	556.27(11.49)	31.19(17.70)	140.25(27.13)
	花果 Flower and Fruit	0.22(0.02)	0.07(0.01)	0.68(0.02)	0.02(0.01)	0.09(0.01)
	根 Root	378.67(36.21)	210.66(47.7)	2382.90(49.21)	76.34(43.33)	167.52(32.43)
	总计 Total	1045.73(100)	441.65(100)	4842.16(100)	176.19(100)	515.60(100)
海桑	叶 Leaf	89.70(5.65)	19.90(4.30)	388.75(11.35)	6.23(4.22)	20.99(5.20)
<i>S. caseolaris</i>	枝 Twig	559.72(35.28)	100.60(21.74)	858.16(25.05)	27.99(8.94)	110.04(27.27)
	树干 Trunk	336.36(21.20)	53.85(11.64)	472.56(13.79)	22.46(15.19)	50.45(12.50)
	树皮 Bark	84.34(5.32)	22.57(4.88)	132.45(3.87)	7.06(4.78)	29.09(7.21)
	花果 Flower and Fruit	17.43(1.10)	2.67(0.57)	32.94(0.96)	0.96(0.64)	3.22(0.79)
	根 Root	498.88(31.45)	263.14(56.87)	1540.78(44.98)	83.10(56.23)	189.78(47.03)
	总计 Total	1586.42(100)	462.73(100)	3425.65(100)	147.80(100)	403.57(100)
秋茄	叶 Leaf	55.08(7.06)	12.08(2.63)	710.80(9.54)	7.56(5.81)	25.48(6.00)
<i>Kandelia</i>	枝 Twig	103.48(13.25)	49.27(0.72)	341.61(4.58)	10.31(7.91)	46.30(10.91)
<i>candell</i>	树干 Trunk	86.85(11.12)	23.16(5.03)	359.89(4.83)	14.50(11.31)	48.88(11.52)
	胚轴 Hypocotyl	5.44(0.69)	1.07(0.23)	28.29(0.38)	0.45(0.34)	1.53(0.36)
	根 Root	530.06(67.88)	374.18(81.39)	6013.85(80.67)	97.45(74.81)	302.29(71.21)
	总计 Total	780.92(100)	459.75(100)	7454.44(100)	130.27(100)	424.49(100)
林地总量		3413.70(300)	1364.13(300)	15722.25(300)	454.26(300)	1344.66(300)

(2) 群落 Cu、Pb、Zn、Cr、Ni 的年归还量  
 年归还量是指通过凋落物归还的元素总量。据  
 每月凋落物各组分含量和凋落物量<sup>[4]</sup>, 计算群  
 落 Cu、Pb、Zn、Cr、Ni 5 元素的年归还量分别为:  
 3179.5、1300.64、8401.31、398.99、646.20 $\mu\text{g}/$

$\text{m}^2$ (表 7)。群落中 3 种群对 5 种重金属元素的  
 年归还量大小排列为: Cu: 海桑 > 无瓣海桑 > 秋  
 茄; Pb 和 Cr: 无瓣海桑 > 海桑 > 秋茄; Zn 和 Ni:  
 秋茄 > 海桑 > 无瓣海桑。这说明不同植物对同  
 一元素的归还量不同。

表 7 群落 5 元素年归还量/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$   
 Table 7 The yearly return of 5 heavy metal elements in community

植物种	Cu	Pb	Zn	Cr	Ni
无瓣海桑 <i>S. apetala</i>	1141.66	638.12	2565.27	149.45	189.99
海桑 <i>S. caseolaris</i>	1389.38	461.11	1881.64	134.21	210.11
秋茄 <i>K. candel</i>	648.46	201.42	2954.40	115.33	246.10
合计	3179.50	1300.64	8401.31	398.99	646.20

(3) 群落 Cu、Pb、Zn、Cr、Ni 的年吸收量及  
 周转期 群落对元素的年吸收量为元素的年  
 存留量与年归还量之和<sup>[9]</sup>。由表 6、表 7 可得, 该  
 群落对 Cu、Pb、Zn、Cr、Ni 的年吸收量依次为  
 6592.20、2664.77、24123.56、853.25、  
 1990.86 $\mu\text{g}/\text{m}^2$ , 其中群落 Cu、Pb、Zn、Cr、Ni 存  
 留量分别占 51.8%、51.2%、65.2%、53.2%、  
 67.5%, 归还量分别占 48.2%、48.8%、  
 34.8%、46.8%、32.5%, 存留量均大于归还量。

落 Cu、Pb、Zn、Cr、Ni 元素吸收系数、利用系数  
 和循环系数见表 8。群落 5 种重金属元素的吸收  
 系数大小为: Zn > Cu > Pb > Ni > Cr, 利用系数  
 大小为 Cu > Zn > Ni > Pb、Cr, 循环系数大小为:  
 Cu、Pb > Cr > Ni、Zn。群落 5 元素的吸收系数、  
 利用系数和循环系数的大小排列不一致, 这可  
 能由于群落林龄较小及 3 种群对各元素的吸  
 收、累积和循环特征不同造成的。

表 8 群落 5 种重金属元素的吸收系数、  
 利用系数和循环系数

Table 8 Absorption coefficient, utilization coefficient and  
 cycle coefficient of 5 heavy metal in community

元素	吸收系数	利用系数	循环系数
Elements	Absorption coefficient	Utilization coefficient	Cycle coefficient
Cu	0.00062	0.2846	0.4823
Pb	0.00016	0.1137	0.4881
Zn	0.00082	0.2047	0.3483
Cr	0.00006	0.1248	0.4767
Ni	0.00013	0.1532	0.3246

某元素在群落现存量中的总量与年凋落物  
 中该元素的总量比值为该元素的周转期<sup>[10]</sup>。据  
 此计算该群落 Cu、Pb、Zn、Cr、Ni 的周转期分别  
 为 8a、19a、15a、18a、21a, 周转期长短顺序为 Ni  
 > Pb > Cr > Zn > Cu。与福田 56 年白骨壤红树  
 林<sup>[6]</sup>和福田秋茄、桐花树加白骨壤红树林群  
 落<sup>[11]</sup>相比, 相应重金属元素的周转期要短。这  
 主要是因为该人工林的群落林龄较小, 群落处  
 于成长期, 尚未达到成熟龄, 而元素的循环周期  
 与群落年龄有关, 年龄越大, 周转期越长<sup>[12]</sup>。

### 3 结语

(4) 群落 Cu、Pb、Zn、Cr、Ni 的吸收系数、利  
 用系数和循环系数 在群落元素生物循环中,  
 可以从元素在群落中的现存量、吸收量和归还  
 量以及表土中该元素储量之间的关系求得元素  
 的吸收系数(年吸收量/表土储量)、利用系数  
 (年吸收量/现存量)和循环系数(年归还量/  
 年吸收量)<sup>[13,14]</sup>, 从而揭示群落及生境中相应  
 的元素利用情况和归还比例等循环特征。该群

深圳湾福田无瓣海桑加海桑人工林群落对  
 重金属 Cu、Pb、Zn、Cr、Ni 等元素具有吸收、累  
 积的功能, 且以海桑对 5 种重金属的富集能力  
 最大, 无瓣海桑次之, 秋茄最小。重金属污染物  
 通过富集于红树林植物体内, 减少了对于次级  
 消费者及生态环境的污染, 在某种程度上起到  
 了潜在净化污水的作用。红树林河口湾和红树  
 林湿地生态系统长期以来被认为是排放城镇生

活污水和工业废水的便利场所,但是,污水排放对红树林植物本身实际上是造成正面还是负面的影响,一直存在广泛的争论<sup>[15~18]</sup>,对红树林湿地生态系统中其它生物(如鸟类、底栖动物等)的长期影响如何,也尚无定论.深圳湾地处深圳和香港两个大都市之间,随着城市建设、工业发展、人口增长,深圳湾受城市生活废水排放及工业废物污染的压力和威胁越来越大,深圳湾重金属污染问题日益突出,作为国际重要湿地,特别是作为国际候鸟的栖息地,深圳湾应充分发挥红树林的净化功能,同时,严格禁止和控制未经处理的生活及工业废水直接排入深圳湾,以确保该湿地生态系统的稳定和可持续发展.

#### 参考文献:

- 1 王勇军,林鹏,宋晓军.深圳福田红树林湿地水鸟的周年动态.厦门大学学报(自然科学版),1998,37(1):122~129.
- 2 王勇军,曾启杰.深圳福田红树林陆鸟类变迁及保护研究.厦门大学学报(自然科学版),1999,38(1):137~144.
- 3 曾启杰,王勇军,廖宝文等.深圳福田无瓣海桑+海桑-秋茄人工林结构的研究.林业科学研究,2001,14(6):610~615.
- 4 曾启杰,王勇军,廖宝文等.无瓣海桑+海桑人工林的生物量及生产力研究.武汉植物学研究,2001,19(5):391~396.
- 5 中国科学院南京土壤研究所.土壤理化分析.上海:上海科学技术出版社,1978.62~72.
- 6 郑文教,林鹏.深圳福田白骨壤红树林 Cu、Pb、Zn、Cd 的累积及分布.海洋与沼泽,1996,27(4):386~393.
- 7 郑文教,郑逢中,连玉武等.福建九龙江口秋茄林铜铅锌锰元素的累积及动态.植物学报,1996,38(3):227~233.
- 8 郑文教,连玉武,郑逢中等.广西英罗港红海榄林重金属元素的累积及动态.植物生态学报,1996,20(1):20~27.
- 9 云南大学生物系.植物生态学.北京:科学出版社,1980.310~316.
- 10 Golley F B. 热带森林的生产量和矿质循环(李文华译,1982).植物生态学译丛,第4集.北京:科学出版社,1975.124~134.
- 11 章金鸿,李玫,潘南明.深圳福田红树林对重金属 Cu、Pb、Zn、Cd 的吸收、累积与循环.云南环境科学,2000,19(增):53~56.
- 12 张宏达,陈桂珠,刘治平等.深圳福田红树林湿地生态系统研究.广州:广东科技出版社,1998.46~47.
- 13 陈灵芝,D. K. Lindley. 英国 Hampsfell 的蕨菜草地生态系统的营养元素循环.植物学报,1983,25(1):67~74.
- 14 拉夏埃尔, W 著,李博译.植物生理生态学.北京:科学出版社,1982.159~161.
- 15 Nedwell DB. Sewage treatment and discharge into tropical coastal waters. Ecology, 1974,5(5):187~190.
- 16 Clough BF, Boto KG, Attiwill PM. Mangrove and sewage: a re-evaluation. In: Teas HJ ed. Biology and Ecology of Mangrove. Vol. S. Lancaster: Dr Junk W Publishers, 1983. 151~161.
- 17 Boto KG. Nutrients and mangrove. In: Connell DW, Hawker DW ed. Pollution in Tropical Aquatic Systems. Ann Arbor, London: CRC Press Inc, 1992. 129~145.
- 18 Breaux A, Farber S, Day J. Using natural coastal wetland systems for waste water treatment: an economic benefit analysis. J. Envir. Mgmt., 1995,44:285~291.