

强度均比相应的人工林的大,说明格氏栲天然林土壤有机质分解能力和腐殖质再合成强度均比人工林的大,土壤营养贮量和养分供应能力亦比人工林的强,天然林土壤肥力明显比人工林的高。

4.2 格氏栲人工林土壤各类指标的根际效应(R/S 值)比天然林的明显,这与人工林土壤条件相对较差有关。

4.3 格氏栲天然林和人工林根际是一个相对偏酸的环境,根际土有机质、全氮及交换性盐基离子总量均比全土大,但人工林根际土壤速效性氮、磷、钾存在一定程度亏缺现象,这与目前天然林和人工林林木生长速度及土壤中养分浓度差异有关。

4.4 格氏栲天然林经过120余年的演变,目前群落多样性和结构均比人工林复杂^①,天然林水源涵养、自我培肥能力均比人工林的优越。天然林根际土壤营养贮量与供应状况明显比人工林的好,这是目前格氏栲天然林地力较高的重要原因之一,目前应加强对日益减少的天然常绿阔叶林的保护并开展相应的研究,以保持和提高地带性常绿阔叶林多样性,充分发挥其改善环境的有益功能。

参 考 文 献

- 1 杨玉盛等. 格氏栲天然林水源涵养功能的研究. 自然资源学报, 1992, 7(3): 217~233
- 2 杨玉盛等. 人工阔叶林取代格氏栲天然林后土壤肥力变化的研究. 东北林业大学学报, 1993, 21(5): 14~21
- 3 杨玉盛等. 格氏栲天然林和人工林结构与持续地力的研究. 中国科协第二届青年学术年会论文集(农科分册). 北京: 中国科学技术出版社, 1995. 400~404
- 4 杨玉盛等. 细柄阿丁枫杉木混交林根际土壤生物学活性研究. 福建省科协第二届青年学术年会论文集. 福州: 福建科技出版社, 1995. 509~513
- 5 张福锁等. 根际动态过程与植物营养. 土壤学报, 1992, 29(3): 239~250
- 6 Lynch J M. *The Rhizosphere*. John Wiley Chichester, 1990
- 7 范晓晖, 刘芷宇. 根际 pH 环境与磷素利用研究进展. 土壤通报, 1992, 23(5): 238~240
- 8 Norton J M *et al.* Carbon-flow in the rhizosphere of ponderase pine seedlings. *Soil Biol. Biochem.* 1990, 22(4): 449~455
- 9 许曼丽, 刘芷宇. 土壤-根系微区养分状况的研究 I. 钾离子的富集与亏缺. 土壤学报, 1983, 20(3): 259~302
- 10 钦绳武, 刘芷宇. 土壤-根系微区养分状况的研究 VI. 不同形态肥料氮素在根际的迁移规律. 土壤学报, 1989, 26(2): 117~123
- 11 Bhat K K S *et al.* Diffusion of phosphate to plant roots in soil. *Plant and Soil*, 1976, 44: 63~72
- 12 Jung A K, B Seeling *et al.* Mobilization of different phosphate fractions in the rhizosphere. *Plant and Soil*, 1993, 155~156, 91~94
- 13 李振高等. 不同基因型小麦根际细菌及酶活性的动态. 土壤学报, 1993, 30(1): 1~8
- 14 (苏)哈兹耶夫著(郑洪元等译). 土壤酶活性. 北京: 科学出版社, 1980

落叶松落叶前后重金属元素 内外迁移循环规律研究*

余国营** 吴燕玉

(中国科学院沈阳应用生态研究所 陆地生态系统痕量物质生态过程开放实验室 沈阳 110015)

摘要 供试元素在落叶松各部位的含量和贮量顺序为 $Zn > Cu > As > Pb > Cd$, 并与环境中相应元素浓度呈正相关, 元素的迁移主要发生在叶和枝、干、根之间, 落叶时叶中6%的 Zn 迁移到枝、干中, 且贮量均有增加, 存在明显的内循环, 占总循环量的25%; Cu、Pb、Cd、As 主要为外循环, 其循环量占总贮量的20%~71%, 循环率分别为30%、68%、27%和23%。

关键词: 落叶松, 重金属, 迁移, 循环。

TRANSFER AND CYCLING OF HEAVY METALS IN AND OUT OF THE LARCH TREES (*Larix olgensis* var. *koreana* Nakai) BEFORE AND AFTER LEAF FALLEN

Yu Guoying Wu Yanyu

(Laboratory of Ecological Process of Trace substance in Terrestrial Ecosystem,
Institute of Applied Ecology, Academia Sinica, Shenyang, 10015, China)

Abstract The measured content and storage of trace elements in each parts of larch trees was $Zn > Cu > As > Pb > Cd$, which has positive correlations with that in soil. During the leaf-falling period, a about 6% of Zn in leaves was transferred to trunk, branch and root. A general increase in Zn storage was observed demonstrating an obvious internal cycling rate Zn of 25% of the gross cycling. The cycling of Cu, Pb, Cd and As were almost external, and varied from 20%~71% of gross storage in trees and their cycling rates were 30%, 68%, 27% and 23% respectively.

Key words: larch, heavy metals, transfer, cycling.

随着采矿、冶炼、制造加工业的迅速发展, 大量废弃的重金属不断进入土壤-植物系统, 并经食物链, 直接威胁人类的健康。因此, 重金属污染与防治问题引起了人们的广泛关注。国内外学者纷纷对重金属在作物、蔬菜等经济作物体内吸收积累、转化、生态效应等开展了广泛的研究^[1~3]。但这些研究的对象主要草本

* 国家自然科学基金和中国科学院重点资助课题。

** 在中国科学院水生生物研究所从事博士后研究。

收稿日期: 1995-11-18, 修改稿收到日期: 1996-08-07。

植物,尤以1年生草本植物为主,而木本植物的重金属污染生态学研究较为少见。

木本植物尤其是高大乔木,它们的生物产量高,占有很大空间,有巨大的根、茎、叶面积作用于环境,并对污染物有一定的吸收积累、转化和降解作用,且积累的污染物不会在短期内释放到环境中,同时大部分林木以生产木材和绿化为主要目的,不进入食物链而对人体产生伤害。故污水和污泥的林地利用日趋广泛,林木尤其是落叶乔木对许多营养元素具有循环再利用的功能,也是森林生态系统养分免遭损失的重要机制之一。

本文针对重金属元素进入该系统后,其吸收积累和内外循环的关系进行研究。利用沈阳生态站小区试验,以落叶松为供试树种,通过调查分析其落叶前后的生物量、供试元素含量、贮量及变化,深入探讨重金属在木本植物体内的迁移积累过程和内外循环规律,为污泥和污水的林地利用进行可行性分析。

1 材料与分析

1.1 试验条件

该研究在中国科学院沈阳生态试验站进行的,落叶松生长呈现明显的季节性,春季4、5月间,树木萌发新枝新叶,7月处于生长顶峰,8月以后逐渐转入生长停滞阶段,10月严霜以后大部分针叶凋落,树木转入休眠阶段。因此8月下旬到10月下旬可视为树木生长盛季进入休眠阶段的转换期,这期间将发生最为活跃的营养内外循环过程。供试土壤为草甸棕壤^[4]。

1.2 材料与设计

供试树种为落叶松(*Larix olgensis* var. *koreana* Nakai),试验设两种处理,即对照组和处理组,投加浓度如表1,其中不包括其背景含量(Cd 0.175, Pb 19.8, Cu 19.74, Zn 56.93, As 8.23 mg/kg),处理组浓度为土壤中各元素临界含量的3倍,属重污染级。该处理是在1992年进行的,将供试小区耕作层土壤翻起,按设计浓度投加污染物,拌匀、铺开,平衡15d以后,种植落叶松树苗,管理。

1.3 研究方法

1994年分别于落叶松(5龄)落叶前后的8月下旬和11月上旬选择长势相同的标准树5株,伐倒后分根材、根皮、干材、干皮、枝材、枝皮和叶7部分实行全株解剖,测定各部位的生物量鲜重和干重(60℃, 8h 烘干),取样测定供试元素的含量(湿法消化,日立180-80原子吸收分光光度计测定),并利用以下公式计算各部位落叶前后的元素贮量:

落叶前某部位元素贮量=8月份该部位干重×8月份该部位元素含量

落叶后某部位元素贮量=11月份该部位干重×11月份该部位元素含量

上述计算中,对照组落叶前后的生物量、处理组落叶后的生物量均为实测值,处理组落叶前的生物量是通过回归方程得到的^[5],其回归方程如下:(式中 x 为胸径)

$$\text{根重 } y = 2.2448x^{2.593} \quad r = 0.9661$$

$$\text{干重 } y = 1.4002x^{0.6448} \quad r = 0.9458$$

$$\text{枝重 } y = 0.1442x^{1.6112} \quad r = 0.9543$$

$$\text{叶重 } y = 0.966x - 8.56 \quad r = 0.9228$$

2 结果与讨论

2.1 生物量及分配

8月和11月供试落叶松单株生物量及各部位干重测定结果见表2。11月和8月单株生物量比较接近,表明处理组落叶前生物量的回归拟合效果较好,但8月份的鲜重明显高于11月份之鲜重,显然是由8月份树木含水量较高所致。

两实验组生物量的 t 检验结果表明,供试浓度对落叶松生长没有显著影响。在生物量分配上主干(包括皮和材)占单株总重的40%,枝重占30%,根重占20%,叶重约10%。同时发现落叶前后各部位干重占全株

表1 试验设计

Table 1 The design of experiment (mg/kg)

| 元素 Elements | Cd | Pb | Cu | Zn | As |
|--------------|-----|-----|-----|-----|----|
| 对照 CK | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 处理 Treatment | 1.5 | 300 | 100 | 200 | 30 |

总干重的比率基本相近,但如果仔细检查皮/材比率可知,11月组明显高于8月组,其机理可能是落叶时有较多的营养物质自叶中输入皮层。

表2 供试树木各部位的生物量(kg)

Table 2 Biomass of different parts of tested trees

| 时间 Date 月-日 | 处理 Treat | 均重 Average wt. | 根重 Root core | 根皮 Root bark | 干材 Trunk wood | 干皮 Trunk bark | 枝材 Branch core | 枝皮 Branch core | 叶 Leaves | 总重 Total wt. |
|-------------------|--------------|-------------------|--------------------|--------------------|---------------------|---------------------|----------------------|----------------------|-------------|--------------------|
| 08-17 | 对照 CK | 鲜重 Fresh wt. | 2.84 | 1.04 | 7.08 | 1.13 | 5.76 | 2.84 | 5.73 | 26.42 |
| | | 干重 Dry wt. | 1.47 | 0.43 | 3.12 | 0.52 | 2.71 | 1.27 | 1.39 | 10.91 |
| | | 占总干重% of total | 13.5 | 3.9 | 28.6 | 4.8 | 24.8 | 11.6 | 12.7 | 100 |
| | 处理 Treat. | 鲜重 Fresh wt. | 3.8 | 1.1 | 8.12 | 1.28 | 3.94 | 2.2 | 4.1 | 25.54 |
| | | 干重 Dry wt. | 1.86 | 0.53 | 3.57 | 0.52 | 1.83 | 0.99 | 1.1 | 10.5 |
| | | 占总干重% of total | 17.7 | 5.1 | 34 | 5 | 17.4 | 9.5 | 11.3 | 100 |
| 11-07 | 对照 CK | 鲜重 Fresh wt. | 1.98 | 0.73 | 5 | 0.8 | 2.81 | 1.39 | 2.7 | 15.4 |
| | | 干重 Dry wt. | 1.12 | 0.51 | 2.97 | 0.48 | 1.63 | 0.81 | 1.03 | 9.25 |
| | | 占总干重% of total | 12.1 | 5.5 | 38.4 | 6.2 | 19.9 | 10 | 8.9 | 100 |
| | 处理 Treat. | 鲜重 Fresh wt. | 2.12 | 0.78 | 6.11 | 1.05 | 3.82 | 1.88 | 1.8 | 17.5 |
| | | 干重 Dry wt. | 1.39 | 0.54 | 3.63 | 0.59 | 2.22 | 0.92 | 0.8 | 10.12 |
| | | 占总干重% of total | 13.7 | 5.3 | 37 | 6.8 | 21.9 | 9.1 | 6.2 | 100 |

2.2 元素含量

落叶前后各部位的元素含量测定结果见表3。比较对照组与处理组可知,植物体内各部位的元素含量均与土壤中元素投加浓度呈正相关($r=0.9856$),不同元素在各部位的含量存在差异。供试元素在不同部位分配的大小顺序为;Cd:根>枝>干>叶,Pb:叶>枝皮>干皮>根皮>枝材>根材>干材,Cu:根皮>叶>干皮>枝皮>枝材>干材>根材,Zn:叶>枝皮>干皮>根皮>根材>枝材>干材,As:干材>枝>叶>根>干皮。

表3 落叶前后落叶松各部位单位生物量元素贮量(mg/kg)

Table 3 Concentration of heavy metals in different parts of larch

| 样品 Sample | 落叶前 Before leaf fallen | | | | | 落叶后 After leaf fallen | | | | | |
|--------------|------------------------|------|-------|------|-------|-----------------------|------|-------|-------|------|------|
| | Cd | Pb | Cu | Zn | As | Cd | Pb | Cu | Zn | As | |
| 对照 | 根材 Root core | 0.36 | 0.42 | 1.65 | 27.77 | 1.85 | 0.79 | 0.43 | 8.05 | 18.5 | 2.49 |
| | 根皮 Root bark | 1.91 | 4.55 | 9.59 | 32.01 | 2.01 | 1.58 | 3.31 | 9.87 | 26.4 | 1.15 |
| | 干材 Trunk wood | 0.42 | 0.44 | 2.47 | 11.28 | 1.18 | 0.57 | 2.43 | 3.92 | 24.6 | 1.64 |
| | 干皮 Trunk bark | 0.81 | 8.8 | 7.46 | 38.27 | 3.09 | 1.47 | 5.65 | 6.41 | 39.4 | 2.49 |
| | 枝材 Branch wood | 1.01 | 0.92 | 3.15 | 15.71 | 2.77 | 0.61 | 1.92 | 9.65 | 18.8 | 1.87 |
| | 枝皮 Branch bark | 1.51 | 18.7 | 0.86 | 42.39 | 1.36 | 2.24 | 25 | 11.72 | 50.3 | 1.56 |
| | 叶 Leaves | 0.37 | 24.44 | 8.35 | 47.62 | 1.66 | 1.83 | 46.86 | 11.75 | 54.8 | 5.27 |
| 处理 | 根材 Root core | 2.18 | 4.05 | 10.3 | 75.2 | 2.36 | 2.18 | 6.54 | 11.63 | 42.1 | 2.33 |
| | 根皮 Root bark | 2.44 | 2.94 | 9.81 | 49.02 | 2.52 | 3.32 | 1.88 | 9.02 | 31.8 | 2.82 |
| | 干材 Trunk wood | 0.84 | 0.88 | 9.79 | 32.15 | 2.97 | 0.84 | 0.78 | 11.56 | 25.7 | 2.63 |
| | 干皮 Trunk bark | 1.99 | 1.46 | 6.79 | 24.9 | 2.13 | 1.84 | 4.59 | 7.21 | 33.5 | 3.37 |
| | 枝材 Branch wood | 0.94 | 1.23 | 5.88 | 21.77 | 2.34 | 0.84 | 0.72 | 7.77 | 23.7 | 2.73 |
| | 枝皮 Branch bark | 17.6 | 10.8 | 8.77 | 50.6 | 1.94 | 2.11 | 16.02 | 10.23 | 58.1 | 3.27 |
| | 叶 Leaves | 1.12 | 8.33 | 7.06 | 55.65 | 2.09 | 1.73 | 31.01 | 12.79 | 81.4 | 4.22 |

比较落叶前后各部位的元素含量,可以发现几乎所有元素的含量均发生了变化。落叶后根皮和枝材中的Cd明显减少,根材、干皮、枝皮中Cd略有增加,干材中变化不大;Pb在根皮、干皮中减少,干材、枝皮、枝材中增加;根皮和干皮中的Cu向根材、干材和枝中转移;Zn主要发生在由地下部分向地上部分迁移;As

是由根和干材中向干皮和枝中转移。落叶中所有供试元素含量均高于生长叶中元素含量。

供试的5种元素在落叶松各解剖部位含量的大小顺序为 $Zn > Cu > As > Pb > Cd$ 。

2.3 元素贮量

根据树木各部位干重和元素含量并按前述计算方法,分别得到落叶松各部位的元素贮量(表4)。对于生长的落叶松来说,对照组 Cd 的贮藏库主要是根皮和枝,约为总贮量的70%,处理组 Cd 也多分布于根(皮、材)和枝叶中;Pb 多积累在叶、枝皮和根中(这可能与针叶树开放式呼吸有关,黄会^[6]也报道了类似结果,同时也不排除在落叶松中存在着有利于 Pb 螯合运输的机制);Cu 在低浓度处理时主要分布在根皮、干皮、枝皮和叶中,约占全树的80%,在高浓度处理时,根材、干材和枝材中的 Cu 显著增加,叶中贮量变化不大;Zn 在两组处理中均主要分别于叶、枝皮和根内;As 在植株各部位的含量比较均匀,贮量与生物量的大小顺序一致。伴随冬天的到来,各元素在体内的分布也发生了变化,对照组叶、干材、干皮、根材中的 Cd 均有增加,处理组枝皮中的 Cd 贮量下降,向干皮和叶等部位输送;落叶时叶和枝皮中的 Pb 贮量增加;落叶后 Cu 贮量除对照组干皮和处理组根皮有所下降外,其余各部位均明显增加,由此可以看出,到了8月以后树木的生长虽然出现停滞,而植物根系与土壤溶液之间仍然存在着活跃的元素交换,表现为元素的吸收和转运;Zn 则表现为根中的贮量减少,干皮、枝皮和叶中贮量增加;As 在落叶后主要贮藏于叶、枝皮、干皮以及根中。

由此看出,叶是供试元素的重要贮藏库,也是落叶前后元素迁移和再分配的重要场所。Cd、Pb、Cu、As 4种元素在落叶中的贮量明显大于生长叶的贮量,且处理组大于对照组。只有 Zn 元素在落叶中的贮量小于生长叶的贮量,说明在叶的凋落过程中,一部分 Zn 又回到了植物体内,参与了营养元素的循环利用和再分配机制。

表4 落叶前后落叶松各部位元素贮量(mg)

Table 4 Amount of heavy metals in different parts of larch

| 样品 Sample | 落叶前 Before leaf fallen | | | | | 落叶后 After leaf fallen | | | | |
|------------------|------------------------|-------|-------|-------|------|-----------------------|------|------|------|------|
| | Cd | Pb | Cu | Zn | As | Cd | Pb | Cu | Zn | As |
| 根材 Root core | 0.17 | 0.2 | 0.78 | 13.1 | 0.87 | 0.88 | 0.48 | 9.02 | 20.7 | 2.79 |
| 根皮 Root bark | 0.83 | 1.96 | 4.12 | 13.7 | 0.86 | 0.81 | 1.69 | 5.03 | 13.5 | 0.59 |
| 干材 Trunk wood | 1.31 | 1.37 | 7.71 | 35.2 | 3.68 | 1.69 | 7.22 | 11.6 | 72.9 | 4.87 |
| 对照 干皮 Trunk bark | 0.42 | 4.58 | 3.89 | 19.9 | 1.61 | 0.71 | 2.71 | 3.08 | 18.9 | 1.2 |
| 枝材 Branch wood | 2.82 | 2.63 | 8.53 | 42.6 | 7.51 | 0.99 | 3.13 | 15.7 | 30.7 | 3.05 |
| 枝皮 Branch bark | 1.92 | 23.8 | 8.71 | 53.8 | 1.73 | 1.81 | 20.3 | 9.49 | 40.8 | 1.26 |
| 叶 Leaves | 0.51 | 33.97 | 11.61 | 66.2 | 2.31 | 1.88 | 48.3 | 12.1 | 56.6 | 5.43 |
| 根材 Root core | 4.05 | 7.53 | 19.1 | 139.8 | 4.43 | 1.64 | 0.75 | 16.2 | 58.5 | 3.24 |
| 根皮 Root bark | 1.29 | 1.56 | 5.2 | 26 | 1.34 | 0.71 | 1.02 | 4.87 | 17.2 | 1.52 |
| 干材 Trunk wood | 3 | 3.14 | 34.95 | 115 | 10.6 | 3.05 | 2.83 | 42 | 93.4 | 9.5 |
| 处理 干皮 Trunk bark | 1.03 | 0.77 | 3.53 | 12.9 | 1.11 | 0.73 | 2.71 | 4.24 | 22.7 | 1.96 |
| 枝材 Branch wood | 1.72 | 2.34 | 10.8 | 39.8 | 4.28 | 1.86 | 1.6 | 17.3 | 52.7 | 6.06 |
| 枝皮 Branch bark | 1.75 | 10.72 | 8.68 | 56.1 | 1.92 | 1.94 | 14.7 | 9.41 | 59.4 | 3.01 |
| 叶 Leaves | 1.35 | 60 | 18.47 | 167 | 2.57 | 2.14 | 45 | 21.1 | 128 | 4.09 |

2.4 植物体内的元素迁移

表5~表8分别列出了落叶松叶、根、干、枝4部分落叶前后元素的贮量和变化。对植株针叶来说,对照组落叶中 Cd、Pb、Cu、As 贮量比生长叶分别增加了268%、42%、4.2%和134%,Zn 减少了8.3%;处理组落叶中这4种元素也依次增加了58.5%、8.3%、14.7%和58.8%,Zn 减少了23.6%(表5)。供试元素在植株根中的贮量随叶的凋落发生了如下变化:对照组所有元素均增加,Cd、Pb、Cu、Zn、As 分别增加了69%、4.6%、186.7%、27.7%和153.2%,处理组 Cd 元素增加了56.4%,而 Pb、Cu、Zn、As 分别减少了80.5%、13.5%、24.2%和17.5%(表6)。对于树干,对照组供试元素均增加,Cd、Pb、Cu、Zn、As 分别增加了38.7%、66.9%、27%、66.7%和52.6%,处理组 Cd、Pb、Cu、Zn 也呈增加趋势,分别增加了62.8%、41.7%、20%和27.4%。

只有 As 略有减少(表7)。枝是植株生长点的着生部位,即使落叶后仍需孕育新的叶芽、花芽、枝芽,势必存在着活跃的物质迁移和交换,对照组枝 Cd、Pb、Zn、As 分别减少了40.9%、11.9%、25.8%和31.7%,只有 Cu 增加了46.2%;处理组各元素贮量均增加,Cd、Pb、Cu、Zn、As 分别增加了49.7%、25.1%、37.1%、18%和46.3%。

表5 落叶时松树叶片元素贮量及输入量

Table 5 Input of heavy metals from falling leaves of larch

| 类型 Type | 元素贮量及输入量(mg/株) Storage or input of elements | Cd | Pd | Cu | Zn | As |
|--------------|--|------|-------|-------|--------|-------|
| 对照 CK | 生长叶 Living leaves | 0.51 | 33.97 | 11.61 | 66.19 | 2.31 |
| | 落叶 Fallen leaves | 1.88 | 48.27 | 12.11 | 56.46 | 5.41 |
| | 元素输入量 Input of elements | 1.37 | 14.3 | 0.49 | -9.73 | 3.1 |
| | 占生长叶贮量(%)Input/storge | 268 | 42.1 | 4.2 | -14.7 | 134.2 |
| 处理 Treat. | 生长叶 Living leaves | 1.35 | 60.03 | 18.47 | 166.8 | 2.57 |
| | 落叶 Fallen leaves | 2.14 | 65.03 | 21.07 | 127.5 | 4.08 |
| | 元素输入量 Input of elements | 0.79 | 5.03 | 2.6 | -39.26 | 1.51 |
| | 占生长叶贮量(%)Input/storge | 58.5 | 8.3 | 14.7 | -23.54 | 58.75 |

表6 落叶时松树根部元素贮量及输入量

Table 6 Input of heavy metals in root from falling leaves of larch

| 类型 Type | 元素贮量及输入量(mg/株) Storage or input of elements | Cd | Pd | Cu | Zn | As |
|--------------|--|------|-------|-------|--------|-------|
| 对照 CK | 生长叶 Living leaves | 1 | 2.16 | 4.9 | 26.81 | 1.73 |
| | 落叶 Fallen leaves | 1.69 | 2.17 | 14.05 | 34.22 | 4.38 |
| | 元素输入量 Input of elements | 0.69 | 0.01 | 9.15 | 7.41 | 2.65 |
| | 占生长叶贮量(%)Input/storge | 69 | 0.46 | 186.7 | 27.67 | 153.2 |
| 处理 Treat. | 生长叶 Living leaves | 5.34 | 9.09 | 24.3 | 165.85 | 5.77 |
| | 落叶 Fallen leaves | 8.35 | 1.77 | 21.03 | 125.64 | 4.76 |
| | 元素输入量 Input of elements | 3.01 | -7.32 | -3.27 | -40.21 | -1.01 |
| | 占生长叶贮量(%)Input/storge | 56.4 | -80.5 | -13.5 | -24.24 | -17.5 |

表7 落叶时松树干元素贮量及输入量

Table 7 Input of heavy metals in trunk from falling leaves of larch

| 类型 Type | 元素贮量及输入量(mg/株) Storage or input of elements | Cd | Pd | Cu | Zn | As |
|--------------|--|------|------|-------|--------|-------|
| 对照 CK | 生长叶 Living leaves | 1.73 | 5.95 | 11.59 | 55.09 | 5.29 |
| | 落叶 Fallen leaves | 2.4 | 9.93 | 14.72 | 91.83 | 8.07 |
| | 元素输入量 Input of elements | 0.67 | 3.98 | 3.13 | 36.74 | 2.78 |
| | 占生长叶贮量(%)Input/storge | 38.7 | 66.9 | 27 | 66.7 | 52.6 |
| 处理 Treat. | 生长叶 Living leaves | 4.03 | 3.91 | 38.48 | 127.74 | 11.71 |
| | 落叶 Fallen leaves | 6.78 | 5.54 | 46.21 | 176.12 | 11.54 |
| | 元素输入量 Input of elements | 2.75 | 1.63 | 7.73 | 48.38 | -0.17 |
| | 占生长叶贮量(%)Input/storge | 68.2 | 41.7 | 20 | 37.9 | -1.5 |

表8 落叶时松树枝元素贮量及输入量

Table 8 Input of heavy metals in branch from falling leaves of larch

| 类型 Type | 元素贮量及输入量(mg/株) Storage or input of elements | Cd | Pd | Cu | Zn | As |
|--------------|--|-------|-------|-------|--------|-------|
| 对照 CK | 生长叶 Living leaves | 4.74 | 26.54 | 17.25 | 96.41 | 9.24 |
| | 落叶 Fallen leaves | 2.8 | 23.38 | 25.22 | 71.46 | 6.31 |
| | 元素输入量 Input of elements | -1.94 | -3.16 | 7.97 | -24.95 | -2.93 |
| | 占生长叶贮量(%)Input/storage | -40.9 | -11.9 | 46.2 | -25.8 | -31.7 |
| 处理 Treat. | 生长叶 Living leaves | 5.88 | 13.06 | 19.44 | 89.91 | 6.2 |
| | 落叶 Fallen leaves | 8.8 | 16.34 | 26.66 | 106.11 | 9.07 |
| | 元素输入量 Input of elements | 2.92 | 3.28 | 7.22 | 16.2 | 2.87 |
| | 占生长叶贮量(%)Input/storage | 49.66 | 25.1 | 37.1 | 18 | 46.3 |

2.5 植株与外界的元素迁移和交换

树木在严霜过后, 针叶在短时间内集中凋落是养分向体外迁移的主要方式之一, 供试元素也不例外。从表5就可看出落叶时元素的输出量, Pb 的输出量较大, 对照组和处理组因叶凋落而产生的输出量分别为 48.27mg 和 65.03mg, 占全株总贮量的 57.9% 和 73.3%, 说明落叶松具有较强的 Pb 代谢能力, 这可能为铅锌尾矿植被恢复树种选择具有重要的参考价值。输出量最大的是 Zn, 对照组和处理组的输出量分别为 56.46mg 和 127.5mg, 约占全树总量的 28.6% 和 31.3%。对照组和处理组 Cu 输出量占全树总量的比例相同 (22.5%), 分别为 12.1mg 和 21.2mg, 而 Cd、As 的输出率在对照组为 27.2% 和 28.8%, 在处理组为 10.2% 和 16.1%。

落叶前后树木与外界的元素迁移与交换除叶凋落以外, 还可以通过根系的吸收和分泌来进行, 同时也与树木皮层呼吸与淋溶有关, 表9列出了落叶松体内元素贮量与变化量, 大致可以看出叶凋落这一时期元素的收支情况。由于测算本身带有一定的系统误差, 表中各元素总贮量的微小差异虽不能直接地理解为元素的吸收和排除, 但除对照组 Cd 和处理组 Pb 叶凋落后的贮量有所减少外, 其余各处理元素贮量均有增幅, 因此在 8 月至 10 月这段时间里, 尽管树木的生长出现停滞, 但仍然存在着剧烈的元素吸收、积累和分配过程。

表9 落叶时松树干枝根元素贮量及输入量

Table 9 Input of heavy metals from falling leaves of larch

| 类型 Type | 元素贮量及输入量(mg/株) Storage or input of elements | Cd | Pd | Cu | Zn | As |
|--------------|--|-------|-------|-------|--------|-------|
| 对照 CK | 生长叶 Living leaves | 7.47 | 34.65 | 33.74 | 178.3 | 16.26 |
| | 落叶 Fallen leaves | 6.89 | 35.48 | 53.99 | 197.5 | 18.76 |
| | 元素输入量 Input of elements | -0.61 | 0.83 | 20.25 | 19.2 | 0.5 |
| | 占生长叶贮量(%)Input/storage | -8.2 | 2.4 | 60 | 10.8 | 3.1 |
| 处理 Treat. | 生长叶 Living leaves | 15.25 | 26.06 | 82.22 | 383.5 | 23.68 |
| | 落叶 Fallen leaves | 23.93 | 23.65 | 93.96 | 407.87 | 25.37 |
| | 元素输入量 Input of elements | 8.68 | -2.41 | 11.68 | 24.37 | 1.69 |
| | 占生长叶贮量(%)Input/storage | 56.9 | -9.2 | 14.2 | 6.4 | 7.1 |

2.6 元素内外循环通量和循环率

关于植物元素的内外循环、循环通量和循环率, 至今尚无统一的定义和计算方法, 这里仍借用沈善敏^[1,6]对杨树养分循环的有关概念和计算方法来定量金属元素的内外循环及循环率, 得各项参数如表10。

对于树木来说, 除了根、干、枝、叶间存在着元素迁移和交换外, 已知树木边材和心材之间也存在着某

表10 落叶时松树前后元素内外循环量及循环率
Table 10 Flux rate of elements cycles in the leaf falling season in larch

| 处理类型 Type | 元素贮量(mg/株)及循环率(%) Flux (mg/tree) and cycle rate | Cd | Pd | Cu | Zn | As |
|--------------|--|------|-------|-------|-------|------|
| 对照 CK | 内循环量 Internal flux | 0 | 0 | 0 | 9.73 | 0 |
| | 外循环量 External flux | 3.24 | 56.72 | 13.44 | 58.46 | 6.41 |
| | 内循环率 Internal cycle rate | 0 | 0 | 0 | 4.9 | 0 |
| | 外循环率 External cycle rate | 47 | 66 | 19.7 | 23 | 26.5 |
| | 总循环量 Gross flux | 3.24 | 56.72 | 13.44 | 68.19 | 6.41 |
| | 总循环率 Gross cycle rate | 47 | 66 | 19.7 | 27.9 | 26.5 |
| 处理 Treat. | 内循环量 Internal flux | 0 | 0 | 0 | 39.26 | 0 |
| | 外循环量 External flux | 3.46 | 65.83 | 41.07 | 127.5 | 5.8 |
| | 内循环率 Internal cycle rate | 0 | 0 | 0 | 7.3 | 0 |
| | 外循环率 External cycle rate | 13.3 | 71 | 35.6 | 23.7 | 20 |
| | 总循环量 Gross flux | 3.46 | 65.83 | 41.07 | 166.7 | 5.8 |
| | 总循环率 Gross cycle rate | 13.3 | 71 | 35.6 | 31 | 20 |

些营养元素的迁移和交换,如N、P、K、Mg等,估计Cd、Pb、Cu、Zn、As也存在着类似过程,表10的结果只限于表征落叶松根、干、枝、叶之间的元素循环量,因此表10所列结果是偏低的。按这种偏低的估计,处理组Cd和As的总循环量小于对照组,Pb、Cu、Zn的总循环量为处理组大于对照组。只有Zn元素存在着明显的内循环,其对照组和处理组的内循环率分别为4.9%和7.3%,外循环大于内循环,外循环率分别为23%和23.7%,Cd、Pb、Cu、As则主要为外循环,其循环率在对照组分别为47%、66%、19.7%和26.5%,在处理组则依次为13.3%、71%、35.6%和20%。元素的循环量可占总贮量的20%。

参 考 文 献

- 1 Lepp N W. *Effects of heavy metals pollution on plants*. Applied science 1. London, 1981. 35~39
- 2 黄会一等. 木本植物对Cd的吸收及其在体内的分配. 生态学报, 1982, 2(2): 139~145
- 3 余国营等. 不同形态Cd及其与Zn的相互作用对小麦生理的影响. 生态学报, 1992, 12(1): 92~96
- 4 王 新等. 各种改性剂对重金属迁移积累影响的研究. 应用生态学报, 1994, 5(1): 89~94
- 5 徐振邦等. 长白山阔叶红松林生物生产量的研究. 森林生态系统研究, 1985, 5: 33~37
- 6 黄会一等. 镉土治理林业生态工程研究. 中国环境科学, 1989, 9(6): 63~68
- 7 沈善敏等. 杨树主要营养元素内循环和外循环研究 I 落叶前后各部位养分浓度及养分贮量变化. 应用生态学报, 1992, 3(4): 296~301
- 8 沈善敏等. 杨树主要营养元素内循环和外循环研究 I 落叶前后养分在植物体内外的迁移和循环. 应用生态学报, 1993, 4(1): 27~31