

DOI: 10.5846/stxb201407091406

孙涛, 马明, 王定勇. 中亚热带典型森林生态系统对降水中铅镉的截留特征. 生态学报, 2016, 36(1): - .

Sun T, Ma M, Wang D Y. Interceptive characteristics of lead and cadmium in a representative forest ecosystem in mid-subtropical area in China. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(1): - .

中亚热带典型森林生态系统对降水中铅镉的截留特征

孙 涛¹, 马 明¹, 王定勇^{1,2,*}

1 西南大学资源环境学院, 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400715

2 重庆市农业资源与环境研究重点实验室, 重庆 400716

摘要: 实验于 2012 年 9 月到 2013 年 8 月期间, 在重庆市江津四面山对常绿阔叶林生态系统大气降水、林内降水、枯透水及土壤渗滤液中的铅(Pb)和镉(Cd)进行了持续一年的动态变化特征的研究。结果表明: 研究期间, 大气降水中 Pb 和 Cd 的质量浓度分别为 $(22.92 \pm 13.57) \mu\text{g/L}$ 、 $(2.82 \pm 1.46) \mu\text{g/L}$, 月均沉降量分别为 $(3.06 \pm 2.74) \text{mg/m}^2$ 、 $(0.32 \pm 0.27) \text{mg/m}^2$, 该林区降水受到轻度的 Pb 污染, 但并未受到 Cd 污染; 该林区重金属 Pb 和 Cd 的主要污染源为大气沉降, 林区中常绿阔叶林对重金属 Pb 和 Cd 有很好的截留净化作用, 总截留系数高达 98.52% 和 99.09%, 经过该系统各层次的净化后, 重金属 Pb 和 Cd 含量均符合国家地面水环境质量标准(GB3838-88)的 I 类水质标准; 其中, 林冠层的截留能力最强, 对 Pb 和 Cd 的截留系数分别为 91.67% 和 86.84%, 枯落物层次之, 分别为 67.86% 和 79.74%; 土壤层对 Pb 和 Cd 的截留特征截然相反, 土壤层对 Pb 的解吸量大于吸附量, 导致渗滤液中 Pb 的平均质量浓度相对枯透水升高。

关键词: 铅和镉; 常绿阔叶林; 森林水文; 森林生态系统

Interceptive characteristics of lead and cadmium in a representative forest ecosystem in mid-subtropical area in China

SUN Tao¹, MA Ming¹, WANG Dingyong^{1,2,*}

1 College of Resources and Environment, Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment (Ministry of Education), Southwest University, Chongqing 400715, China

2 Chongqing Key Laboratory of Agricultural Resources and Environment, Chongqing 400716, China

Abstract: Previous studies have indicated that forests have the ability to purify rainwater; rainwater gets filtered as it passes through various forest layers (such as canopy and litter) before entering the surface water, and this filtered rainwater get further purified by the soil layers during its transportation to the ground water. This combination of the forest and soil layers usually contribute to the maximum hydrological functions of forest ecosystems. Heavy metals in the atmosphere combine with rainwater and enter the surface water; this water is intercepted by the canopy, litter, and soil during precipitation, and consequently the rainwater is purified. The southwest region including Chongqing, Sichuan, Guizhou, Yunnan and Xizang is the second largest district in China with a high forest coverage rate (95.41%); the annual rainfall here ranges from 900 mm to 1522 mm. The Luosi Mountain (altitude: 1440m) in Simian Mountain is a representative area of the southwest region with high forest coverage (canopy density: 0.91); this is an appropriate site to study the purification of heavy metals by forests. Two common harmful heavy metals, lead (Pb) and cadmium (Cd), mainly released from industrial waste gases and automobile exhaust, were chosen to analyze their dynamic characteristics in the evergreen broad-leaved forest, a typical

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2013CB430000); 国家自然科学基金项目(41103040); 教育部中央基本科研业务费重点项目(XDJK2013B044)

收稿日期: 2014-07-09; 网络出版日期: 2015-07-02

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: dywang@swu.edu.cn

subtropical forest ecosystem in Simian Mountain. In addition, the interception abilities of different ecosystems for Pb and Cd were also compared. Precipitation, forest precipitation (throughfall and dropping off), litterfall, and soil leachate of the evergreen broad-leaved forest in Simian Mountain were investigated from September 2012 to August 2013, with sampling being conducted twice a month. The results showed that: 1) during the study period, the concentrations of Pb and Cd in the precipitation were $(22.92 \pm 13.57) \mu\text{g/L}$ and $(2.82 \pm 1.46) \mu\text{g/L}$, respectively, and the monthly average deposition fluxes of Pb and Cd were $(3.06 \pm 2.74) \text{mg/m}^2$ and $(0.32 \pm 0.27) \text{mg/m}^2$ higher, respectively than those in other regions, such as Tangshan in China, New Jersey in USA, and North Sea in Belgium. Rain water in this forest was to some extent polluted by Pb, with the concentration of Pb in the precipitation meeting the third water quality standard of the Quality Criteria of Ground Surface Water Environment (GB3838-88), but it was not polluted by Cd. However, the concentrations of Pb and Cd $(2.44 \pm 1.77) \mu\text{g/L}$ and $(0.13 \pm 0.04) \mu\text{g/L}$, respectively) in the leachate reached the first water quality standard after being intercepted by different levels of the evergreen broad-leaf forest, suggesting that 1) the interception by various elements during precipitation considered in our study facilitates purification of rain water; 2) the atmospheric precipitation was the main source of Pb and Cd in this forest region; 3) the total interception rates of Pb and Cd by the forest ecosystem were up to 98.52% and 99.09%, respectively, and the canopy layer showed the strongest interception ability among the various interception factors during precipitation in this ecosystem, with interception rates of 91.67% and 86.84% for Pb and Cd, respectively followed by the litter layer, with rates of 67.86% and 79.74%, respectively. 4) The concentration of Pb in leachate was higher than that in litterfall, indicating that soil could release Pb into leachate. However, the soil showed an opposite function for Cd, as Cd levels in leachate were lower than that in litterfall, probably suggesting that the soil can adsorb Cd.

Key Words: lead and cadmium; evergreen broad-leaf forest; forest hydrology; forest ecosystem

近年来人类向大气中排放的污染物的种类和数量不断增加,Pb 和 Cd 就是其中对环境和人体有严重危害的有毒重金属^[1-2],大气中的 Pb 和 Cd 主要来自矿物燃料的燃烧以及工业、汽车尾气排放等,会随着空气的流动以及干湿沉降进入到生态系统之中^[3-4],陆地和森林成为了最大的收纳场。国内外相关研究表明,大气降水中的有害成分尤其是 Pb 和 Cd 经过不同类型的森林生态系统各个层次后,其截留程度不尽相同^[5-8],同时森林生态系统在涵养水源、净化水质、保持水土方面也起着重要的作用^[9-11]。西南林区作为我国森林覆盖率第二大区,林区内的四面山国家级自然保护区保存着该地区最具代表地带性植被类型之一,同时也是地球同纬度仅存的规模最大、保护最完好的亚热带常绿阔叶林(*Evergreen broad-leaf Forest*)^[12]。因此,本文以中亚热带常绿阔叶林这一典型林分为研究对象,基于系统学原理,分析并研究常绿阔叶林生态系统对降水中重金属元素 Pb 和 Cd 的截留特征,以更深入地了解该类型森林生态系统对 Pb、Cd 的截留净化作用并和其它地区不同类型森林生态系统做对比分析,从而更充分地认识该林区在经济社会发展中的重要生态地位。

1 实验方法

1.1 实验点概况

实验点($106^{\circ}4' \text{E}$, $28^{\circ}6' \text{N}$)位于重庆江津市南端四面山国家级风景名胜区中大洪海的核心区域的螺丝山上,如图 1 所示,海拔 1 440 m,属中亚热带季风湿润气候。年降水量 1 112—1 522 mm,多集中于 5—10 月份,年均相对湿度 80%,年平均气温 13.7°C ,8 月平均气温最高(31.5°C),1 月份平均气温最低(-5.5°C)。实验点内森林植被保存良好,林中植物种类复杂,以四川大头茶(*Gordonia si-chuanensis*)、栲树(*Castanopsis Fargesii*)、柳杉(*Cryptomeria fortunei*)、马尾松(*Pinus massoniana*)等为主要建群树种,森林郁闭度为 0.91,裸露地层为砖红色细砂岩和粉砂岩组成的巨原层,土壤类型为黄棕壤。实验点降水、枯落物和土壤的理化性质和 Pb、Cd 含量如表 1 所示。

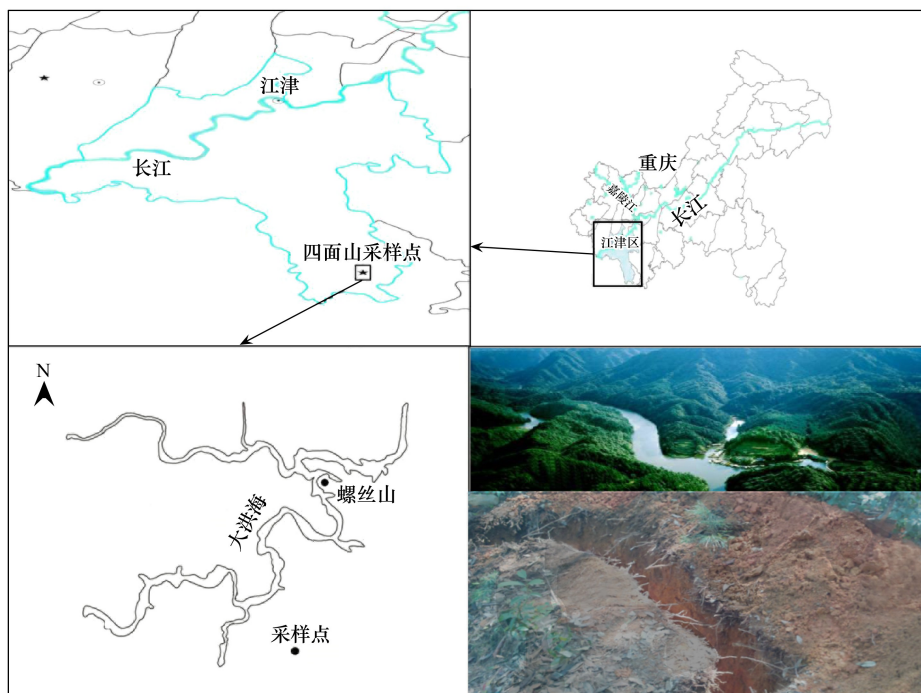


图1 试验点地理位置示意图

Fig.1 Test point location

表1 理化性质统计表

Table 1 Physicochemical property

全年统计数据 Annual Statistics	pH	DOC/ (mg/L)	有机质/ (g/kg) Organic Matter	CEC/ (cmol/kg)	Pb/ (mg/kg)	Cd/ (mg/kg)
降水 Precipitation	3.8—6.1	1.8—25.4	—	—	—	—
枯落物 Litter	—	—	—	—	24.43—48.51	1.43—2.84
土壤 Soil	4.5—6.4	—	12.2—68.3	6.8—21.2	20.34—32.12	0.08—0.21

表格中—表示该样品对应的指标未测定或未统计;酸碱度 pH 值;溶解性有机碳 DOC;阳离子交换量 CEC

1.2 水样的采集与分析

实验中大气降水利用 APS-3A 自动降雨降尘采集器在空旷无遮挡物的林外采集;在常绿阔叶林内设置 20 m×20 m 样方,在样方内采用对角线法设置 3 个 50 cm 直径的聚四氟乙烯漏斗状林内降水采集器;同时在样方内采用对角线法选取 3 个 2 m×2 m 样方(图 1 右下)挖掘土壤剖面,剖面四周设置隔水带防止土壤渗滤液的横向流动影响,放置集水板以收集枯透水、土壤渗滤液(0—20 cm、0—40 cm、0—60 cm)的水样。采集样品时将样品盛于超纯水清洗过并经 500 ℃ 高温超净化处理 40 分钟的 500 mL 硼硅玻璃瓶中,贴上标签,保存记录,立即送回实验室测定样品体积计算降雨量以及测试指标分析。水样和土样处理后 Pb、Cd 采用 ICP-MS (Perkin Elmer) 法测定,pH 值采用德国 Sartorius 公司生产的普及型 pH 计 (PB-10) 测定,土壤有机质采用重铬酸钾容量法测定,阳离子交换量 (CEC) 采用乙酸铵交换法测定,DOC 的测定使用的是 Sievers innovox laboratory TOC Analyzer。

1.3 数据处理

实验中每层次降水设置 3 个平行对照,采样期间每月的月初 1 号和月中 15 号各采集 1 次样品共采集 24 次,共得 116 个最终平均数据。由于实验是野外实地试验,其中只有 9、6、8 三月份每次均采集到全部样品,其余月份由于降雨量较小土壤渗滤液 0—20 cm、0—40 cm 和 0—60 cm 的部分渗滤液体积较小或者没有,导致无法计算土壤各层次的降雨量使数据缺失。本文将已有的数据按土壤深度递增,利用加权平均的方法计算

出 1 个渗滤液的均值以便计算土壤截留系数。实验中所用到的计算公式如下所示:

$$c_{\text{渗滤液}} = \frac{20 \times S \times c_{(0-20\text{cm})} + 40 \times S \times c_{(0-40\text{cm})} + 60 \times S \times c_{(0-60\text{cm})}}{(20 + 40 + 60) \times S} \quad (1)$$

$$F_w = \frac{1}{1000} C^i \times p^i \quad (2)$$

$$\text{平均截留系数} = \frac{F_w^i - F_w^j}{F_w^i} \times 100\% \quad (3)$$

$$\text{相对截留系数} = \frac{F_w^{\text{大气}} - F_w^j}{F_w^{\text{大气}}} \times 100\% \quad (4)$$

式中, S 为采样集水板面积 (cm^2); c^i 为各月不同降水离子浓度 ($\mu\text{g/L}$); p^i 为各月降雨量 (mm); F_w 为月沉降量 ($\mu\text{g/m}^2$); i 是 j 的上一层次降水。

2 结果分析

2.1 大气降水中铅、镉的动态变化

由表 2 知, 研究期间大气降水中 Pb 的质量浓度为 $(22.92 \pm 13.57) \mu\text{g/L}$, 在 9 月份达到最高值 $36.49 \mu\text{g/L}$, 3 月份达到最低值 $9.35 \mu\text{g/L}$ 。大气降水中 Cd 的平均质量浓度较低, 动态变化与 Pb 的大致相似, 但波动幅度相对较小, 在 9 月份和 2 月份出现了两次高峰值, 分别为 $4.28 \mu\text{g/L}$ 、 $3.18 \mu\text{g/L}$, 大气降水中 Cd 的质量浓度为 $(2.82 \pm 1.46) \mu\text{g/L}$ 。同时, 在夏季和冬季该地区的降雨量分别达到最大值和最小值, 但大气降水中 Pb 和 Cd 的平均质量浓度却分别达到了两次高峰值。

表 2 各层次降雨的降雨量及铅和镉的质量浓度

Table 2 The precipitation amount and the concentrations of lead and cadmium by various levels layers

时间 Date	大气降水 Precipitation			林内降水 Forest Rain			枯透水 Litterfall			渗滤液 Soil Leachate		
	降雨量/mm Rainfall	Pb/ ($\mu\text{g/L}$)	Cd ($\mu\text{g/L}$)	降雨量/mm Rainfall	Pb/ ($\mu\text{g/L}$)	Cd ($\mu\text{g/L}$)	降雨量/mm Rainfall	Pb/ ($\mu\text{g/L}$)	Cd ($\mu\text{g/L}$)	降雨量/mm Rainfall	Pb/ ($\mu\text{g/L}$)	Cd ($\mu\text{g/L}$)
2012.09	132	36.49	4.28	100	6.55	0.47	74	3.96	0.18	12	4.21	0.12
2012.10	109	31.81	2.40	76	4.04	0.32	48	2.57	0.16	17	2.66	0.12
2012.11	53	26.55	1.95	34	2.11	0.30	11	1.37	0.15	19	1.40	0.12
2012.12	26	19.98	2.16	15	2.44	0.64	4	1.51	0.20	8	1.62	0.15
2013.01	21	16.12	2.82	11	1.55	0.51	3	0.95	0.16	6	1.00	0.14
2013.02	31	21.62	3.18	18	2.38	0.90	5	1.75	0.21	10	—	—
2013.03	47	9.35	2.86	29	1.22	0.49	7	0.86	0.19	19	0.86	0.15
2013.04	91	13.65	1.36	66	1.92	0.24	38	1.13	0.12	23	1.15	0.09
2013.05	134	20.67	2.35	105	2.44	0.37	81	1.61	0.15	18	1.65	0.12
2013.06	211	17.28	3.09	175	1.41	0.38	127	0.65	0.18	36	0.67	0.13
2013.07	178	28.13	2.45	144	3.65	0.49	102	2.49	0.21	31	2.82	0.16
2013.08	189	33.75	3.60	151	3.91	1.15	111	2.27	0.16	35	2.61	0.13
SD	65	8.16	0.78	55	1.46	0.26	44	0.90	0.03	10	1.03	0.02
CV/%	63	36	29	72	52	50	87	51	18	50	55	17
平均值 Mean	102	22.95	2.71	77	2.80	0.52	51	1.76	0.17	20	1.88	0.13
中位数 Median		22.92	2.82		3.89	0.70		2.31	0.17		2.44	0.13

表中“—”表示该月份降雨量少未采集到渗滤液样品, 表中每个浓度值为平均计算值, 表中 SD 表示标准偏差, CV 表示变异系数, $P < 0.05$

2.2 林内降水中铅、镉的动态变化

从表 3 可知, 林冠层对 Pb 和 Cd 的截留量比较大, 月均截留量分别为 $(3.06 \pm 2.74) \text{mg/m}^2$ 、 $(0.32 \pm 0.27) \mu\text{g/m}^2$, 平均截留率分别为 91.67%、86.84%, 对比发现林冠层对 Pb 的截留量是 Cd 的 10 倍左右, 尤其在夏季 8

月份截留量出现了最大值,且每个月份的截留率和截留量均较 Cd 大。经过林冠层截留后林内降水中 Pd 和 Cd 的质量浓度分别为 $(3.89 \pm 2.67) \mu\text{g/L}$ 、 $(0.70 \pm 0.46) \mu\text{g/L}$,均符合国家地面水质量标准^[13](GB3838-88) I 级水质中 Pd 和 Cd 的要求。

2.3 枯透水中铅、镉的动态变化

林内降水经过枯落物层之后,Pd 和 Cd 均被再次截留。研究期间,枯落物层对 Pd 的平均截留率为 67.86%,Cd 为 79.74%。Pd 的最大截留率出现在 12 月份,为 83.51%,最小截留率出现在 5 月份,为 49.08%,而 Cd 的最大截留率约为 93.52%,出现在 2 月份,最小截留率为 65.42%,出现在 6 月份(表 3)。枯透水中 Pd 和 Cd 的变化无明显的季节性,主要与降水过程、降水强度和持续时间有关。对比发现,枯落物层对 Pb 和 Cd 的截留量依然是 Pb>Cd,枯落物层对重金属 Pb 和 Cd 的截留作用小于林冠层。

表 3 各层次对铅和镉的平均截留量和截留率
Table 3 Average interception of lead and Cadmium by various levels layers

时间 Date	林冠层 Canopy				枯落物层 Litter				土壤层 Soil			
	截留量 Interception		截留率 Intercept Rate		截留量 Interception		截留率 Intercept Rate		截留量 Interception		截留率 Intercept Rate	
	Pb/ (mg/m ²)	Cd/ (μg/m ²)	Pb/%	Cd/%	Pb/ (mg/m ²)	Cd/ (μg/m ²)	Pb/%	Cd/%	Pb/ (mg/m ²)	Cd/ (μg/m ²)	Pb/%	Cd/%
2012.09	4.16	518.16	86.41	91.71	0.36	33.72	55.29	71.98	0.24	11.69	82.75	89.05
2012.10	3.16	237.16	91.15	90.78	0.18	16.54	59.83	68.69	0.08	5.43	63.28	72.03
2012.11	1.34	93.36	94.91	90.23	0.06	8.42	78.99	83.31	-0.01	-0.51	-76.43	-30.10
2012.12	0.48	46.60	92.96	82.82	0.03	8.87	83.51	91.75	-0.01	-0.37	-115.19	-46.28
2013.01	0.32	53.61	94.97	90.57	0.01	5.10	83.30	91.25	0.00	-0.37	-111.81	-76.39
2013.02	0.63	82.34	93.60	83.57	0.03	15.14	79.54	93.52	—	—	—	—
2013.03	0.40	120.13	91.96	89.42	0.03	12.92	83.06	90.90	-0.01	-1.50	-173.28	-115.91
2013.04	1.12	107.43	89.81	87.03	0.08	11.59	66.19	72.40	0.02	2.40	38.25	54.24
2013.05	2.51	275.50	90.76	87.57	0.13	26.93	49.08	68.87	0.10	10.03	77.28	82.39
2013.06	3.40	585.67	93.24	89.82	0.16	43.41	66.46	65.42	0.06	18.13	70.93	79.00
2013.07	4.48	366.73	89.50	84.00	0.27	48.27	51.71	69.09	0.17	16.76	65.60	77.62
2013.08	5.79	506.86	90.74	74.51	0.34	155.58	57.35	89.71	0.16	13.16	63.73	73.80
SD	1.79	190.35	2.37	4.72	0.12	39.60	12.67	10.71	0.08	7.06	92.10	71.83
CV/%	77	76	3	5	85	123	19	13	113	104	-68	305
平均值 Mean	2.32	249.46	91.67	86.84	0.14	32.21	67.86	79.74	0.07	6.80	-1.36	23.59
中位数 Median	3.06	316.14	90.69	83.11	0.19	80.34	66.30	79.47	0.12	8.32	-45.27	-13.43

表中“—”表示该月份降雨量少未采集到渗滤液样品,表中每个浓度值为平均计算值,表中 SD 表示标准偏差,CV 表示变异系数,P<0.05

2.4 土壤渗滤液中铅、镉的动态变化

表 1 中的统计数据表明,枯落物中 Pd、Cd 的含量要比土壤高,但是研究发现土壤渗滤液中铅的质量浓度相对地表枯透水有少量增加(表 2),研究期间,经过土壤层后土壤渗滤液中铅的平均质量浓度相对枯透水增加幅度为 0.12 μg/L,Cd 进一步被截留,平均截留率为 23.59%(表 3)。土壤渗滤液中的 Pb 和 Cd 质量浓度分别为 $(2.44 \pm 1.77) \mu\text{g/L}$ 、 $(0.13 \pm 0.04) \mu\text{g/L}$,根据国家地面水环境质量部分标准(GB3838-88),渗滤液中的 Pb 和 Cd 含量仍然达到了 I 级水质标准要求。

2.5 常绿阔叶林各层次对铅、镉的截留特征比较

常绿阔叶林生态系统的林冠层和枯落物层对大气降水中的 Pb 和 Cd 都有净化作用,但其各自的净化能力却不相同(表 4)。林冠层、枯落物层和土壤层对铅的截留能力大小表现为林冠层>枯落物层>土壤层,三个层次对铅的平均截留量和平均截留率分别为:2.32 mg/m²、0.14 mg/m²、0.07 mg/m² 和 91.67%、67.86%、-1.36%,其总截留率达到了 98.52%。林冠层、枯落物层和土壤层对镉的平均截留量(249.46 μg/m²、32.21 μg/m²、6.80 μg/m²)和平均截留率(86.84%、79.74%、23.59%)尽管与铅的不同,但三个层次却也呈现出了同

样的截留能力趋势(林冠层>枯落物层>土壤层),其总截留率也达到了 99.09%。同时对比也发现,常绿阔叶林生态系统三个层次的相对截留能力也各不相同。森林林冠层、枯落物层和土壤层对铅的相对截留率依次为 90.52%、96.04%和 98.52%,森林林冠层、枯落物层和土壤层对镉的相对截留率大小顺序和铅一致(85.90%、96.99%和 99.09%),在截留能力上表现出“林冠层+枯落物层+土壤层>林冠层+枯落物层>林冠层”的规律。

表 4 各层次对 Pb 和 Cd 的相对截留量和截留率统计表(月均截留)

Table 4 Relative interception of Pb and Cd by various levels layers

名称 Designation	林冠层 Canopy		枯落物层 Litter		土壤层 Soil		总截留 Total Intercept	
	Pb/ (mg/m ²)	Cd/ (μg/m ²)	Pb/ (mg/m ²)	Cd/ (μg/m ²)	Pb/ (mg/m ²)	Cd/ (μg/m ²)	Pb/ (mg/m ²)	Cd/ (μg/m ²)
平均截留量 Avg Interception	2.32	249.46	0.14	32.21	0.07	6.80	2.52	287.77
平均截留率/% Avg Intercept Rate	91.67	86.84	67.86	79.74	−1.36	23.59	98.52	99.09
相对截留量 Relative Interception	2.32	249.46	2.46	281.67	2.52	287.77	2.52	287.77
相对截留率/% Relative Intercept Rate	90.52	85.90	96.04	96.99	98.52	99.09	98.52	99.09

平均截留的计算为每月按森林空间层次上层与下层计算的截留量和截留率的全年的平均值,相对截留为各层次相对大气降水计算的结果

3 讨论

通过与国家地表水质量标准(GB3838-88)和国内外一些研究区域比较发现(表 5),四面山大气降水中 Pb 的质量浓度仅满足地面水质量标准Ⅲ级(≤50 μg/L)要求,Cd 的质量浓度满足Ⅱ级要求(≤5μg/L),与重庆主城区、贵阳和 Izmir 相比四面山大气降水中的 Pd、Cd 较低,但是和唐山、New Jersey 以及 North Sea 相比却相对较高。

表 5 大气降水中 Pb、Cd 浓度和其他文献数据对比表

Table 5 Pb, Cd concentrations in precipitation, and data from literature

大气降水/ (μg/L) Precipitation	四面山 (本研究)/ (2012)	重庆主城/ (2003) ^[14]	唐山/ (2010) ^[15]	贵阳/ (2004) ^[16]	New Jersey (2007), USA ^[17]	Izmir (2004), Turkey ^[18]	North Sea (2000), Belgium ^[19]
Pb	22.92 ± 13.57	463.2	18.3	45.18	0.03	66	20.0
Cd	2.82 ± 1.46	12.1	0.34	ND—10.0	0.47	52	2.0

本研究得出四面山地区大气降水受到了轻度的 Pb、Cd 污染,尤其是夏季时期大气降水中的质量浓度偏高。重庆市是西南地区重要的工业基地,夏季又是重庆市能源消耗的高峰期;大量的资源消耗产生的废气和汽车尾气被排放到大气中;而这段时期,研究区主要受来自东北方向和东南方向的两个大气气团的影响(图 2),其中来自东南方向的大气气团在北上的过程中发生了气流偏转,进而转变为东北风,气团的运动可能会将重庆市主城区等大气中的污染物带到位于重庆市南端的四面山地区。

本研究中林冠层在三个层次中对降水 Pb 和 Cd 的截留能力最强,这与张胜利^[7]、马跃良等^[20]分别在温带和亚热带林区的研究结果基本一致,同时马跃良等的研究也指出植物能够通过呼吸作用吸收空气中的重金属并富集^[20]。实验点森林郁闭度很高(0.91),使得大气的干沉降被截留在森林林冠层枝叶表面;同时该地区土壤水分充足,植物新陈代谢较快;地面风速较小(多为无风或风速小于 2.5 m/s),空气雾气大,相对湿度高(白天时在 70%—85%之间,夜晚时可达 90%以上),封闭的山谷热辐射效应使该地区形成了湿热的局部环境^[21];降水、湿热的环境以及植物叶面的分泌物都会使枝叶长期叶面水分充足,会导致污染物,尤其是迁移性差的铅和镉长时间滞留,使植物叶面在进行呼吸作用时与粘附在叶面的液体发生了物质交换并吸收了 Pb 和 Cd,尤其是凝聚在枝叶表面的空气中的水分和枝叶的分泌物会使这种物质交换过程的时间延长很多(研究期

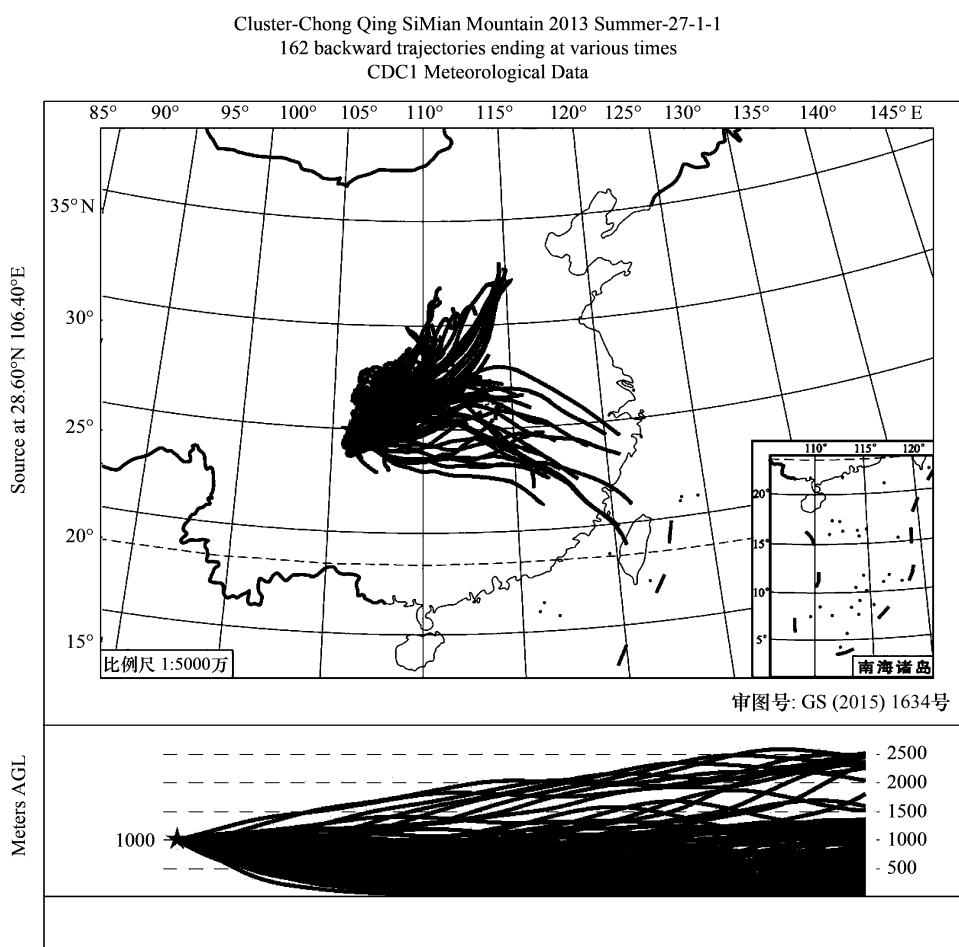


图2 四面山夏季后向轨迹图

Fig.2 72 h back trajectories of air masses in Summer in Mt. Simian

晴朗天气仅占7%)。另外5—10月份该地区的气温较高(20℃以上),也是植物生长旺盛的季节,且该地区降雨量主要集中在5—10月(占全年降水量的78%),所以这段时间林冠层对重金属Pb和Cd的截留量较其他时间段偏大。

本研究还指出,该森林生态系统中的枯落物层对Pb和Cd的截留能力比土壤层大,这与张胜利^[22]在北方秦岭地区和郑郁善等人^[23]在南方福建的研究结果相悖。实验点的降雨类型与干旱的北方以及降雨强度较大的沿海地区不同。实验点的林地表面堆积了很厚的枯落物层且该地区10月—5月(降雨天数占58%,降水量占全年降水量的42%)多为长期的持续性小强度降雨。降雨频繁,但单场降雨量低(降水强度<0.4 mm/h),使得林内降水滴落到枯落物层时被很厚的枯落物层拦蓄^[24-25],进而导致枯落物持水量较大,而使进入土壤层的降水量(占林内降水的26%)相对较小。四面山森林枯透水偏酸性^[26](pH值=3.87—4.24),在此条件下,枯透水中的Pb和Cd容易被腐殖质等吸附而滞留在枯落物层;另外,微生物对枝叶的降解形成了很厚的半分解枯落物层,提高了有机物对枯透水中Pb和Cd的吸附、拦截作用;。

研究区特殊的理化性质(pH值较低,有机质和CEC的含量较高,表1),导致土壤中有机酸以及H⁺含量较高。许中坚等人^[27]和王金贵等人^[28]的研究指出氢离子对Pb、Cd有竞争吸附力,使吸附于土壤上的可交换态Pb和Cd易于解吸,Mulder J等人^[29]的研究也指出酸雨作用下会导致土壤中活性铝含量的提高,铝离子占据高能的吸附位,而使铅的吸附量下降,解吸量增加,但是土壤较高含量的有机质和CEC却有益于土壤对Pb和Cd的吸附。本研究中,土壤渗滤液中Pb的平均质量浓度随着土壤层深度的增加而增加,这可能是土壤层对Pb的解吸量大于吸附量而导致部分Pb被解吸到渗滤液中。土壤层对Cd的截留特征截然相反,可能是土壤

层对 Cd 的吸附-解吸平衡状态不同,对 Cd 的吸附量大于解吸量。

3 结论

研究期间,与国内外其他研究相对比以及参考国家地面水环境质量部分标准,实验点的大气降水已经受到轻度的铅、镉污染,但经过林冠层后水质却有了很大的改善。常绿阔叶林生态系统对铅和镉都具有很强的截留能力;其中,林冠层最大,枯落物层次之,土壤层对铅和镉的截留特征相反。对该地区的可能污染源分析表明,重庆市等周边工业城市是该林区重金属铅和镉的污染源之一。

参考文献(References):

- [1] 郝守进, 茹炳根, 戚其平. 铅的毒性机理及其解铅毒的研究进展. 医学研究通讯, 2001, 30(3): 32-35.
- [2] 张铤, 薛彬, 魏雪涛, 雷志明, 刘湛, 周宏. 镉免疫毒性机理的初步探讨. 中国环境科学, 1999, 19(6): 530-535.
- [3] 赵多勇, 魏益民, 魏帅, 郭波莉, 蔡先峰, 吴小胜, 田阳. 基于同位素解析技术的大气降尘铅污染来源研究. 安全与环境学报, 2013, 13(4): 107-110.
- [4] William Thomas Sturges, L A Barrie. Stable lead isotope ratios in arctic aerosols: evidence for the origin of arctic air pollution. Atmospheric Environment (1967), 1989, 23(11): 2513-2519.
- [5] M Srinivasan, A Mani K, M Kiruba. Nutrient gains by stem flow, through fall and rainfall in Teak ecosystem // Proceedings of International Forestry and Environment Symposium. Sri Lanka: Department of Forestry and Environmental Science, University of Sri Jayewardenepura, 2012: 64-64.
- [6] 周光益, 徐义刚, 吴仲民, 骆士寿, 李炳球, 何在成. 广州市酸雨对不同森林冠层淋溶规律的研究. 林业科学研究, 2000, 13(6): 598-607.
- [7] 张胜利, 李光录. 秦岭火地塘森林生态系统不同层次的水质效应. 生态学报, 2007, 27(5): 1838-1844.
- [8] 王晓磊, 王成. 城市森林调控空气颗粒物功能研究进展. 生态学报, 2014, 34(8): 1910-1921.
- [9] 卢琦, 李清河. 美国森林的水文效应. 世界林业研究, 2002, 15(3): 54-60.
- [10] 温远光, 刘世荣. 我国主要森林生态系统类型降水截留规律的数量分析. 林业科学, 1995, 31(4): 289-298.
- [11] 肖强, 肖洋, 欧阳志云, 徐卫华, 向轼, 李勇志. 重庆市森林生态系统服务功能价值评估. 生态学报, 2014, 34(1): 216-223.
- [12] 张焜, 张洪江, 程金花, 张君玉, 孙龙, 马西军. 重庆四面山 5 种森林类型林冠截留影响因素浅析. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2011, 39(11): 173-179.
- [13] 中国标准出版社第二编辑室编. 环境质量与污染物排放国家标准汇编. 北京: 中国标准出版社, 1997.
- [14] 陶俊, 陈刚才, 赵琦, 康清容, 徐渝, 陈克军. 重庆市大气 TSP 中重金属分布特征. 重庆环境科学, 2003, 25(12): 15-16, 19.
- [15] 李月梅, 潘月鹏, 王跃思, 王英锋, 李杏茹. 华北工业城市降水中金属元素污染特征及来源. 环境科学, 2012, 33(11): 3712-3717.
- [16] W Jambers, Vesselin M Dekov, R Van Grieken. Single particle and inorganic characterization of rainwater collected above the North Sea. Science of the Total Environment, 2000, 256(2/3): 133-150.
- [17] Song F, Gao Y. Chemical characteristics of precipitation at metropolitan Newark in the US East Coast. Atmospheric Environment, 2009, 43(32): 4903-4913.
- [18] Aysen Muezzinoglu, Sible Cukurlupglu Cizmecioglu. Deposition of heavy metals in a Mediterranean climate area. Atmospheric Research, 2006, 81(1): 1-16.
- [19] 胡健, 张国平, 刘丛强. 贵阳市大气降水中的重金属特征. 矿物学报, 2005, 25(3): 257-262.
- [20] 马跃良, 贾桂梅, 王云鹏, 刘惠萍. 广州市区植物叶片重金属元素含量及其大气污染评价. 城市环境与城市生态, 2001, 14(6): 28-30.
- [21] 卢炜丽. 重庆四面山植物群落结构及物种多样性研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2009: 30-31.
- [22] 张胜利. 秦岭火地塘林区森林生态系统对降水中重金属的作用. 林业科学, 2009, 45(11): 55-62.
- [23] 郑郁善, 陈卓梅, 邱尔发, 尤志达, 洪有为, 陈礼光. 不同经营措施笋用麻竹人工林的地表径流研究. 生态学报, 2003, 23(11): 2387-2395.
- [24] 饶良懿, 朱金兆, 毕华兴. 重庆四面山森林枯落物和土壤水文效应. 北京林业大学学报, 2005, 27(1): 33-37.
- [25] 孙涛, 马明, 王定勇, 黄礼昕. 中亚热带典型林分不同层次氮硫湿沉降动态变化. 环境科学, 2014, 35(12): 4475-4481.
- [26] 王轶浩, 王彦辉, 于澎涛, 熊伟, 李振华, 郝佳, 段健. 重庆酸雨区马尾松林凋落物特征及对干旱胁迫的响应. 生态学报, 2013, 33(6): 1842-1851.
- [27] 许中坚, 刘广深. 酸雨作用下红壤铅的释放特征与规律研究. 农业环境科学学报, 2005, 24(6): 1109-1113.
- [28] 王金贵. 我国典型农田土壤中重金属镉的吸附-解吸特征研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012: 31-33.
- [29] Jan Mulder, Alfred Stein. The solubility of aluminum in acidic forest soils: long-term changes due to acid deposition. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1994, 58(1): 85-94.