

高山森林溪流非木质残体Cd和Pb贮量特征*

梁子逸 杨万勤 张慧玲 吴福忠**

¹四川农业大学生态林业研究所, 长江上游生态安全协同创新中心, 长江上游林业生态工程省级重点实验室 成都 611130

摘要 非木质残体是高山森林溪流生态系统的基本组成部分, 其分解过程释放的重金属元素通过长期的迁移与沉积等途径汇集到下游水体, 从而成为森林生态系统元素输出的主要形式和影响流域水环境安全的潜在因素之一。于2013年8月调查了岷江上游高山森林溪流非木质残体镉(Cd)和铅(Pb)的贮量及其随溪流特征的变化。结果显示: 岷江上游高山森林溪流非木质残体在单位面积集水区的Cd贮量为0.863 mg/hm², 单位面积溪流的Cd贮量为0.249 mg/m²; 单位面积集水区的Pb贮量为9.19 mg/hm², 单位面积溪流的Pb贮量为2.65 mg/m²; 岷江上游高山森林溪流非木质残体Cd和Pb总贮量分布较均匀, 与溪流的长度、面积和流量的相关性均不显著, 但会影响各组分Cd和Pb贮量及其所占比例。可见, 高山森林溪流非木质残体输出是Cd和Pb等重金属元素的重要输出过程, 这可为进一步研究高山森林—河岸—溪流连续体的重金属元素分配与迁移提供重要的基础数据和新的思路。表6 图2 参22

关键词 水源涵养地; 森林溪流; 植物残体; 重金属

CLC X171

Cd and Pb storage of non-woody debris in alpine forest streams*

LIANG Ziyi, YANG Wanqin, ZHANG Huiling & WU Fuzhong**

Collaborative Innovation Center of Ecological Security in Upper Yangtze River, Key Laboratory of Ecological Forestry Engineering, Institute of Ecology & Forestry, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China

Abstract Non-woody debris is one of the primary components in forest headwater stream ecosystem. Released Cd and Pb from the non-woody debris is not only an important element output from forest ecosystems, but also an influencing factor for downstream water environment and watersheds safety. This study chose a representative alpine forest in the upper reaches of Minjiang River to investigate Cd and Pb storage of non-woody debris in the headwater streams in the rainy season of August, 2013. We studied the Cd and Pb storages and their changes along with the stream characteristics. The results showed Cd storages of non-woody debris as 0.863 mg/hm² and 0.249 mg/m² per unit area for catchment and streams respectively in the headwater streams of the upper reaches of Minjiang River; Pb storages of non-woody debris were 9.19 mg/hm² and 2.65 mg/m² per unit area of catchment and streams, respectively. The Cd and Pb total storage of non-woody debris was found not significantly related to the stream area, length or water flow flux. However, the stream area, length and water flux could affect the storage and proportion of Cd and Pb in leaf, bark and other non-woody debris component. The results suggested that the non-woody debris in the headwater streams stores great amount of Cd and Pb, therefore is an important component of heavy metal output in the alpine forests. The study here can provide a new idea and data in understanding heavy metal resource/sink patterns and the ecological linkage among forest-riparian-stream.

Keywords water conservation land; forest stream; plant debris; heavy metals

森林生态系统中产生的大量凋落叶、树皮和直径小于1 cm的小枝等其他非木质残体可随林冠凋落、随风迁移以及地表径流等形式大量进入溪流^[1], 成为森林系统碳、养分和重金属元素等输出的重要形式^[2], 也是认识森林系统与水体

生态联系的关键内容^[3]。镉(Cd)和铅(Pb)是高等动植物的非营养元素, 较少的含量即可对动植物甚至人体造成较大的伤害, 被认为是空气、水体和土壤的重要环境污染物^[4-5]。普遍认为, 受人类干扰较小的水源涵养地之一的高寒森林污染较小, 是流域的一方净土, 为整个流域提供源源不断的干净水源^[6]。然而, 越来越多的调查研究表明, 尽管Cd和Pb等重金属元素不是植物生长过程的必需元素, 但其仍然可以广泛存在于植物组织器官中, 随着植物残体的形成-降解过程成为生态系统循环的重要组成部分^[7]。相对于体积和重量较大的木质残体, 非木质残体密度较小且重量较轻, 易随风迁移和降雨冲刷进入溪流, 使得森林溪流非木质残体可能成为重金属输出的重要形式, 并可能影响整个流域水体环境^[8-9]。尽管如此, 已有的相关研究更加关注人类活动导致的Cd和Pb

收稿日期 Received: 2014-09-01 接受日期 Accepted: 2015-02-09

*国家自然科学基金项目(31270498, 31170423)、国家“十二五”科技支撑计划(2011BAC09B05)、中国博士后科学基金特别资助项目(2012T50782)和四川省青年基金(2012JQ0008, 2012JQ0059)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (31270498, 31170423), the Sci-tech Pillar Project of the Twelfth Five-year Plan of China (2011BAC09B05), the Post-doctoral Foundation of China (2012T50782) and the Sichuan Youth Science & Technology Foundation (2012JQ0008, 2012JQ0059)

**通讯作者 Corresponding author (E-mail: wufzchina@163.com)

等环境污染问题^[10-12],而极少关注水源涵养地森林溪流重金属贮量特征,极大地限制了对森林—河岸带—溪流连续体物质源汇格局的认识。

岷江是长江水量汇入最大的支流,同时也是长江上游生活用水和工农业生产的主要水源^[13]。岷江上游高山森林溪流非木质残体重金属贮量特征不仅是生态系统重金属源汇格局的体现形式,而且关系到岷江流域的水质安全^[14],但现今还缺乏应有的关注。因此,我们以岷江上游高山森林溪流为研究对象,调查非木质残体Cd和Pb的贮量特征,旨在为深入认识高山森林与流域间的生态联系提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究区域位于四川省阿坝州理县米亚罗自然保护区毕棚沟风景区(102° 51'–102° 55' E, 31° 13'–31° 15' N, 海拔3 520–3 670 m)(图1),地处青藏高原东缘、四川盆地西缘、四姑娘山北麓。区域气候为丹巴—松潘半湿润季风气候,年平均气温2–4℃,最高气温23.7℃,最低气温为–18.1℃,年降雨量约850 mm,降雨多集中在5–8月。由于季风的影响,区域内干湿季节现象非常明显:干季日照强、降水较少、空气干燥、气候寒冷;湿季日照少、降水较多、空气湿润、气候温暖、多云雾。同时溪流存在夏季水量大、冬季水量小甚至干涸的现象,是典型的季节性森林溪流。研究区域的主要森林树种有高山杜鹃(*Rhododendron lapponicum*)、康定柳(*Salix paraplesia*)、四川红杉(*Larix mastersiana*)、方枝柏(*Sabina saltuaria*)、岷江冷杉(*Abies faxoniana*)、红桦(*Betula albo-sinensis*)、红毛花楸(*Sorbus rufopilosa*)。

1.2 样品采集与处理

基于前期踏查,于2013年8月,根据地形、地貌和植被类型的典型性,在研究区域海拔3 600 m典型高山森林范围内找到18条溪流汇入主河道,基本特征如表1所示。调查区域

为一个相对闭合的集水区,约54 hm²。根据实地采样可操作性和典型性相结合的原则,选择其中方便采样的12条溪流,每条溪流从尽头到源头每隔10 m设置一个长为1 m、宽为溪流实际宽度的样方。将样方内所有非木质残体全部采集,带回实验室,分别按照树皮、树叶和直径小于1 cm的树枝分类,于65℃烘箱中烘干至恒重,测定各组分现存量^[15]。样品粉碎过筛,参照国家林业标准,通过硝酸–高氯酸消解法,消煮过后,使用原子吸收分光光度法测定非木质残体中Cd和Pb含量^[16]。以各采样点各组分元素含量和现存量乘积计算各点间组分元素贮量,再乘以点间面积得到点间总量,相加后得到各条溪流各组分元素贮量^[17]。将所有采样的12条溪流中的非木质残体贮量相加,再除以溪流总面积得到单位面积溪流贮量,表示高山森林溪流单位面积内非木质残体的重金属积存量。将调查区域内所有18条溪流中的非木质残体贮量相加,再除以集水区总面积得到单位面积集水区贮量,表示岷江上游高山森林集水区单位面积内非木质残体的重金属积存量。

1.3 数据处理与统计分析

采用Excel 2010制表、绘图并计算汇总数据。数据统计与分析采用SPSS 22.0。用Spearman相关系数评价非木质残体单位面积Cd和Pb贮量与溪流长度、面积、流量之间的相关关系,显著性水平设为 $P = 0.05$ 。在SPSS中利用线性回归拟合已采样的12条溪流中非木质残体Cd和Pb贮量与溪流长度、面积和流量之间关系的回归方程,并以此计算未采样的6条溪流中非木质残体Cd和Pb贮量。选出最优方程: $Y_1 = 0.056X_1 - 5.163X_2 + 0.755$ ($R^2 = 0.208$); $Y_2 = 0.112X_1 - 15.633X_2 + 0.262$ ($R^2 = 0.459$); $Y_3 = 0.11X_1 - 22.358X_2 - 0.01X_3 + 0.403$ ($R^2 = 0.909$); $Y_4 = 1.664X_1 - 1.338X_3 - 3.347$ ($R^2 = 0.643$); $Y_5 = 0.673X_1 + 8.865X_2 - 2.977$ ($R^2 = 0.771$); $Y_6 = 1.336X_1 - 587.324X_2 + 0.157X_3 + 8.405$ ($R^2 = 0.674$)。

式中, Y_1 为树叶Cd贮量, Y_2 为树皮Cd贮量, Y_3 为其他非木质残体Cd贮量, Y_4 为树叶Pb贮量, Y_5 为树皮Pb贮量, Y_6 为其他非木

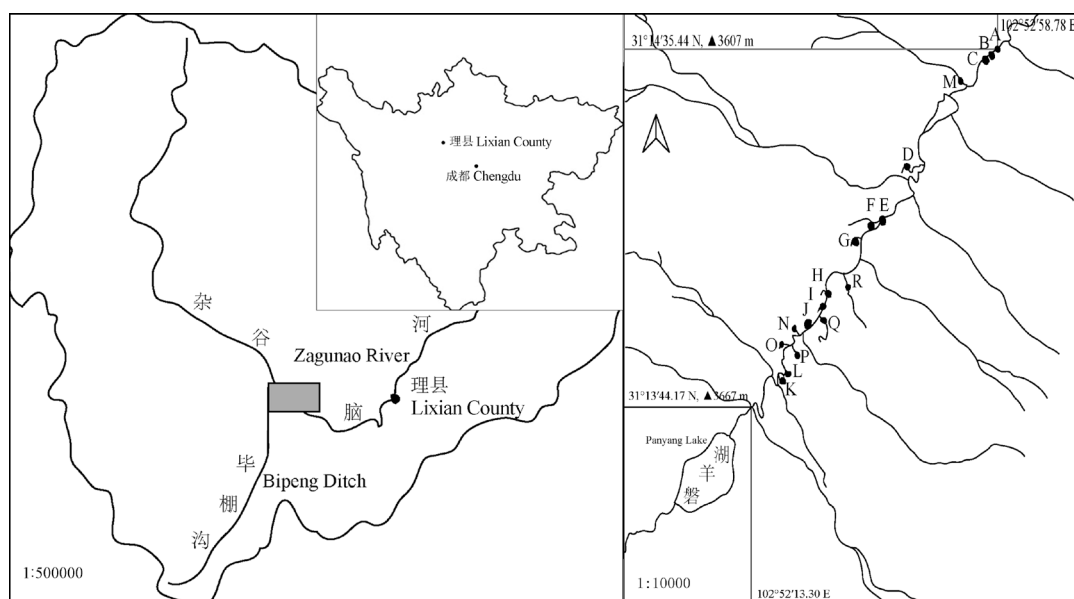


图1 研究区域示意图。A–L代表采样调查的12条溪流, M–R代表未采样的6条溪流。

Fig. 1 Map of study area. A–L are sampled streams and M–R not sampled.

质残体Pb贮量, X_1 为溪流长度, X_2 为溪流流量, X_3 为溪流面积. 汇总所有18条溪流各组分非木质残体Cd和Pb贮量即为该区域森林溪流Cd和Pb贮量.

2 结果与分析

2.1 岷江上游高山森林溪流非木质残体Cd和Pb总贮量特征

本研究数据表明, 在2013年8月高山森林溪流水量最大的季节, 收集的研究区域范围所有溪流内的非木质残体结果显示, 岷江上游高山森林溪流非木质残体总现存量为657 kg, 单位面积现存量为440 g/m². 其中, 树叶、树皮和直径小于1cm的小枝等其他非木质残体分别占现存总量的20.91%、9.33%和69.76%. 在单位面积集水区的Cd贮量为0.863 mg/hm², 单位面积溪流的Cd贮量为0.249 mg/m², 其中树叶、树皮和其他非木质残体组分的Cd贮量为0.051 mg/m²、0.083 mg/m²和0.115 mg/m², 分别占总量的20.5%、33.3%和46.2%; 单位面积集水区的Pb贮量为9.19 mg/hm², 单位面积溪流的Pb贮量为2.65 mg/m², 其中树叶、树皮和其他非木质残体组分的Pb贮量分别为0.705 mg/m²、0.551 mg/m²和1.39 mg/m², 分别占总量的26.6%、20.8%和52.6%(表2). 这些结果充分表明高山森林溪流非木质残体是Cd和Pb等重金属元素的重要输出形式. Clark对澳大利亚昆士兰州红树林内的重金属迁移途径研究也认为地表径流是重金属重要的迁移途径之一^[18], 经过土壤层并以径流输出时, Cd和Pb在径流中的浓度均降低, 大气降水在与森林冠层和林地枯枝落叶层作用后, 被森林生态系统吸收, 使得大气降水输入溪流的重金属量降低^[19], 而森林地表凋落物层较厚, 大量的高山森林非木质残体随降雨形成的

地表径流进入溪流, 可能是影响整个流域水体环境的关键重金属源. 不同溪流中各组分的Cd贮量具有明显差异. 18条溪流以直径小于1 cm的小枝等其他非木质残体为主, 有7条溪流中直径小于1 cm的小枝等其他非木质残体Cd贮量达50%以上, 树皮和树叶的Cd贮量相对较小(图2a); 18条溪流中有9条溪流的Pb贮量集中于直径小于1 cm的小枝等其他非木质残体达到50%以上, 树皮中的Pb贮量在各条溪流中所占比例较小(图2b).

2.2 不同森林溪流非木质残体Cd贮量特征

岷江上游高山森林18条溪流非木质残体各组分Cd贮量如表3所示, 调查采样的12条溪流中有3条溪流未采集到树皮残体, 可能由于不同溪流带树种或树种年龄不同, 形成树皮输入量的差异^[20], 树叶在水体中的分解速度快, 且与脱落的树皮同样体积小, 质地轻, 易随水流迁移^[21], 但对于树叶和树皮残体的现存量而言, 二者在Cd的总贮量中所占比例较大. 经统计分析发现高山森林溪流的长度、流量和面积与Cd贮量均无显著相关性(表4). 与林静等研究的岷江下游小型集水区人工林的Cd含量^[22]相比, 岷江上游水源源头处的高山森林溪流非木质残体Cd贮量具有较大的污染潜力.

2.3 不同森林溪流非木质残体Pb贮量特征

与Cd贮量相比, 树皮残体的Pb贮量所占比例明显较小, 树叶残体的Pb贮量所占比例相对较高(表5), 表明树叶残体对Pb的积累相对较大, 而在水中的分解速度快^[21]. 统计分析表明高山森林溪流的长度、流量和面积对Pb总贮量并无显著影响, 但流量对树皮部分的Pb贮量有显著影响(表6). 与何东进等研究的秋茄林湿地沉积物中Pb含量^[11]相比, 岷江上游高山森林溪流非木质残体的Pb含量较小, 这主要与其地处人烟稀少、受外界干扰小的高寒森林密切相关.

表1 溪流基本信息
Table 1 Basic information of streams

溪流 Stream	长度 Length (l/m)	面积 Area (A/m ²)	流量 Flow (v/m ³ s ⁻¹)	纬度 Latitude	经度 Longitude	海拔 Altitude (h/m)
A	27.60	11.49	0.00082	31°14'N	102°52'E	3607
B	11.28	6.32	0.00212	31°14'N	102°52'E	3607
C	36.00	24.00	0.06631	31°14'N	102°52'E	3607
D	18.00	19.62	0.04744	31°14'N	102°52'E	3620
E	255.60	221.48	0.13480	31°14'N	102°52'E	3634
F	108.00	92.52	0.00066	31°14'N	102°52'E	3634
G	186.00	123.00	0.07065	31°14'N	102°52'E	3621
H	92.40	83.46	0.01776	31°13'N	102°52'E	3620
I	13.20	5.15	0.00069	31°13'N	102°52'E	3625
J	66.00	33.90	0.20288	31°14'N	102°52'E	3658
K	68.40	40.56	0.03476	31°13'N	102°51'E	3667
L	16.80	5.21	0.00056	31°13'N	102°52'E	3667
M	146.40	71.37	0.04361	31°14'N	102°52'E	3613
N	15.36	6.14	0.00102	31°13'N	102°52'E	3679
O	84.00	37.80	0.15902	31°13'N	102°52'E	3692
P	174.00	191.40	0.15978	31°13'N	102°52'E	3685
Q	333.60	358.62	0.42527	31°13'N	102°52'E	3677
R	288.00	162.72	0.15716	31°13'N	102°52'E	3663

表2 高山森林溪流非木质残体Cd和Pb总贮量
Table 2 Total Cd and Pb storage of non-woody debris in alpine forest streams

重金属 Heavy metal	单位面积溪流贮量 (m/mg m ⁻²) Storage per unit area of stream				单位面积集水区贮量 (m/mg hm ⁻²) Storage per unit area of catchment			
	树叶 Leaf	树皮 Bark	其他 Other	合计 Total	树叶 Leaf	树皮 Bark	其他 Other	合计 Total
Cd	0.051	0.083	0.115	0.249	0.177	0.288	0.398	0.863
Pb	0.705	0.551	1.39	2.65	2.45	1.91	4.83	9.19

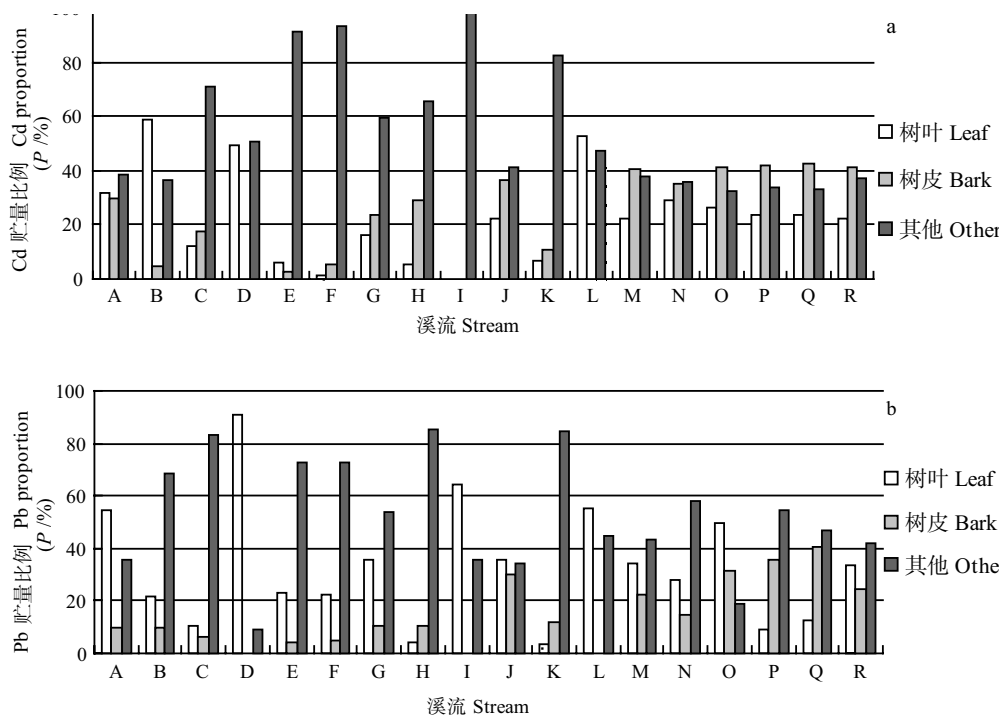


图 2 高山森林溪流非木质残体各组分Cd (a)、Pb (b) 贮量所占比例。
Fig. 2 Proportion of Cd (a) and Pb (b) storage in each component of non-woody debris in alpine forest streams.

表 3 高山森林溪流非木质残体Cd贮量及其分配特征
Table 3 Cd storage of non-woody debris and its distribution pattern in alpine forest streams

溪流 Stream	Cd贮量 Cd storage ($m/mg\ m^{-2}$)			合计 Total
	树叶 Leaf	树皮 Bark	其他 Other	
A	0.327	0.311	0.404	1.042
B	0.014	0.011	0.088	0.113
C	0.021	0.031	0.125	0.177
D	0.207	-	0.214	0.421
E	0.007	0.003	0.104	0.114
F	0.001	0.004	0.070	0.075
G	0.043	0.063	0.157	0.263
H	0.012	0.067	0.151	0.230
I	0.00	-	0.088	0.088
J	0.018	0.029	0.033	0.080
K	0.016	0.026	0.201	0.243
L	0.118	-	0.106	0.224
M	0.122	0.224	0.208	0.554
N	0.262	0.321	0.327	0.910
O	0.123	0.190	0.151	0.464
P	0.051	0.090	0.073	0.214
Q	0.048	0.086	0.067	0.201
R	0.099	0.185	0.166	0.450
平均 Mean	0.083	0.091	0.152	0.326

表 4 高山森林溪流非木质残体各组分Cd贮量与溪流长度、面积和流量的相关性分析
Table 4 Correlation of Cd storage in each component of non-woody debris in alpine forest streams with the length, area and flow of stream

因素 Factor	Cd贮量 Cd storage			合计 Total
	树叶 Leaf	树皮 Bark	其他 Other	
长度 Length	-0.065	0.237	-0.241	-0.050
面积 Area	-0.184	0.154	-0.340	-0.177
流量 Flow	0.081	0.275	-0.306	-0.069

表 5 高山森林溪流非木质残体Pb贮量及其分配特征
Table 5 Pb storage of non-woody debris and its distribution pattern in alpine forest streams

溪流 Stream	Pb贮量 Pb storage ($m/mg\ m^{-2}$)			合计 Total
	树叶 Leaf	树皮 Bark	其他 Other	
A	1.55	0.289	1.02	2.86
B	0.080	0.037	0.253	0.370
C	0.155	0.100	1.28	1.54
D	1.37	-	0.142	1.51
E	0.352	0.064	1.12	1.536
F	1.22	0.246	3.99	5.46
G	1.23	0.372	1.85	3.45
H	0.042	0.106	0.856	1.00
I	3.45	-	1.89	5.34
J	0.934	0.786	0.906	2.63
K	0.059	0.210	1.46	1.73
L	0.59	-	0.479	1.07
M	2.03	1.34	2.66	6.03
N	2.28	1.20	4.77	8.25
O	2.27	1.45	0.878	4.60
P	0.157	0.604	0.925	1.69
Q	0.201	0.628	0.727	1.56
R	1.59	1.18	2.01	4.78
平均 Mean	1.087	0.478	1.512	3.077

表 6 高山森林溪流非木质残体各组分Pb贮量与溪流长度、面积和流量的相关性分析
Table 6 Correlation of Pb storage in each component of non-woody debris in alpine forest streams with the length, area and flow of stream

因素 Factor	Pb贮量 Pb storage			合计 Total
	树叶 Leaf	树皮 Bark	其他 Other	
长度 Length	-0.147	0.462	0.191	0.129
面积 Area	-0.316	0.375	0.102	-0.003
流量 Flow	-0.140	0.493*	-0.199	-0.073

3 结论

岷江上游高山森林溪流非木质残体在单位面积集水区的Cd贮量为0.863 mg/hm², 单位面积溪流的Cd贮量为0.249 mg/m², 其中树叶、树皮和其他非木质残体组分的Cd贮量为0.051、0.083和0.115 mg/m², 分别占总量的20.5%、33.3%和46.2%。

岷江上游高山森林溪流非木质残体在单位面积集水区的Pb贮量为9.19 mg/hm², 单位面积溪流的Pb贮量为2.65 mg/m², 其中树叶、树皮和其他非木质残体组分的Pb贮量分别为0.705 mg/m²、0.551 mg/m²和1.39 mg/m², 分别占总量的26.6%、20.8%和52.6%。

岷江上游高山森林溪流非木质残体Cd和Pb总贮量分布较均匀, 与森林溪流的长度、流量和面积均无显著相关性, 但会影响各组分Cd和Pb贮量及其所占比例。

本研究结果在一定程度上说明高山森林溪流非木质残体可能是森林Cd和Pb等重金属输出的主要形式, 同时也可能是流域水体环境中Cd和Pb的来源之一。尽管雨季采样结果可能在一定程度上过高估计非木质残体Cd和Pb输入量, 但也可作为深入认识重金属物质源/汇过程和高山森林与流域间的生态联系提供新的思路和一定的科学依据。

参考文献 [References]

- 邓红兵, 肖宝英, 代力民, 王庆礼, 王绍先. 溪流粗木质残体的生态学进展[J]. 生态学报, 2002, 22 (1): 87-93 [Deng HB, Xiao BY, Dai LM, Wang SL, Wang SX. Advances in ecological studies on in-stream coarse woody debris [J]. *Acta Ecol Sin*, 2002, 22 (1): 87-93]
- 闫恩荣, 王希华, 黄建军. 森林粗死木质残体的概念及其分类[J]. 生态学报, 2005, 25 (1): 158-167 [Yan ER, Wang XH, Huang JJ. Concept and classification of coarse woody debris in forest ecosystems [J]. *Acta Ecol Sin*, 2005, 25 (1): 158-167]
- Tank JL, Rosi-Marshall EJ, Griffiths NA, Entekhabi SA, Stephen ML. A review of allochthonous organic matter dynamics and metabolism in streams [J]. *N Am Benthol Soc*, 2010, 29 (1): 118-146
- Kambhampati MS, Begonia GB, Begonia MFT, Bufford Y. Phytoremediation of a lead-contaminated soil using morning glory (*Ipomoea lacunosa*): effects of a synthetic chelate [J]. *Environ Contam Tox*, 2003, 71 (2): 379-386
- Sinhal VK, Srivastava A, Singh VP. EDTA and citric acid mediated phytoextraction of Zn, Cu, Pb and Cd through marigold (*Tagetes erecta*) [J]. *J Environ Biol*, 2010, 31: 255-259
- 张彪, 李文华, 谢高地, 肖玉. 森林生态系统的水源涵养功能及其计量方法[J]. 生态学报, 2009, 28 (3): 529-534 [Zhang B, Li WH, Xie GD, Xiao Y. Water conservation function and its measurement methods of forest ecosystem [J]. *Chin J Ecol*, 2009, 28 (3): 529-534]
- 张金池, 严逸伦, 曾锋. 重金属对森林生态系统效应的研究进展[J]. 南京林业大学学报, 2001, 25 (5): 52-56 [Zhang JC, Yan YL, Zeng F. Advance in the research on domino effect of heavy metal ions in forest ecosystem [J]. *J Nanjing For Univ (Nat Sci Ed)*, 2001, 25 (5): 52-56]
- Eisen HG. Changes in litter inputs and decomposition in headwater streams during a mountain pine beetle infestation of whitebark pine [D]. Middlebury: Middlebury College, 2013
- Burrows RM, Magierowski RH, Fellman JB, Barmuta LA. Woody debris input and function in old-growth and clear-felled headwater streams [J]. *For Ecol Manage*, 2012, 286: 73-80
- 傅鹏, 王飞, 马秀平, 王兰. 沁河沉积物重金属垂直分布特征与风险评估[J]. 应用与环境生物学报, 2013, 19 (2): 305-312 [Fu P, Wang F, Ma XP, Wang L. Vertical distribution of heavy metals in sediments of Qinhe river and its risk assessment [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2013, 19 (2): 305-312]
- 何东进, 游巍斌, 王韧, 蔡金标, 王鹏, 郑开基, 李晓景, 张中瑞, 苏少川, 廖小娟, 肖石红. 中国红树林天然分布北缘区不同气源秋茄林湿地沉积物重金属空间分布特征比较[J]. 应用与环境生物学报, 2013, 19 (6): 945-951 [He DJ, You WB, Wang R, Cai JB, Wang P, Zheng KJ, Li XJ, Zhang ZR, Su SC, Liao XJ, Xiao SH. Spatial distribution of heavy metals in *Kandelia candel* wetland sediments of natural forest and plantation in the north marginal region of Chinese natural mangroves [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2013, 19 (6): 945-951]
- 王宏宾, 束文圣, 蓝崇钰. 重金属污染生态学研究现状与展望[J]. 生态学报, 2005, 25 (3): 596-605 [Wang HB, Su WS, Lan CY. Ecology for heavy metal pollution: recent advances and future prospects [J]. *Acta Ecol Sin*, 2005, 25 (3): 596-605]
- Zhang M, Wei X, Sun P, Liu SR. The effect of forest harvesting and climatic variability on runoff in a large watershed: the case study in the Upper Minjiang River of Yangtze River basin [J]. *J Hydrol*, 2012, 464-465: 1-11
- 王渺林, 刘德春, 易瑜. 岷江流域水资源安全问题探讨[J]. 水资源研究, 2005, 95 (2): 4-5 [Wang ML, Liu DC, Yi Y. Study on water resources security problem in the Minjiang River valley [J]. *J Water Resour Res*, 2005, 95 (2): 4-5]
- 张川, 杨万勤, 张慧玲, 王滨, 岳楷, 彭艳, 吴福忠. 岷江上游高山森林溪流非木质残体现存量与碳储量及其分配特征[J]. 生态环境学报, 2014, 23 (9): 1509-1514 [Zhang C, Yang WQ, Zhang HL, Wang B, Yue K, Peng yan, Wu FZ. Standing biomass and carbon-storage of non-woody debris and their distribution in the alpine forest streams of western Sichuan in the upper reaches of Minjiang River [J]. *Ecol Environ Sci*, 2014, 23 (9): 1509-1514]
- LY/T 170-1999 森林植物与森林枯枝落叶层全硅、铁、铝、钙、镁、钾、钠、磷、硫、锰、铜、锌的测定[S] [LY/T 170-1999 Determination of total silica, iron, aluminum, calcium, magnesium, potassium, sodium, phosphorus, sulphur, manganese, copper and zinc in forest plant and forest floor [S]]
- 刘盛, 李国伟. 林分碳贮量测算方法的研究[J]. 北京林业大学学报, 2007, 29 (4): 166-169 [Liu S, Li GW. Measuring and calculating method of forest carbon storage [J]. *J Beijing For Univ*, 2007, 29 (4): 166-169]
- Clark-MW. Management implications of metal transfer pathways from a refuse tip to mangrove sediments [J]. *Sci Total Environ*, 1998, 222: 1-2, 17-34
- 王云琦, 王玉杰. 森林溪流水质的研究进展[J]. 水土保持研究, 2003, 10 (4): 242-246 [Wang YQ, Wang YJ. Evolution of study on the forest stream water quality [J]. *Res Soil Water Conserv*, 2003, 10 (4): 242-246]
- Kominoski JS, Marczak LB, Richardson JS. Riparian forest composition affects stream litter decomposition despite similar microbial and invertebrate communities [J]. *Ecology*, 2011, 92 (1): 151-159
- 陈书秀, 江明喜. 三峡地区香溪河流域不同树种叶片凋落物的分解[J]. 生态学报, 2006, 26 (9): 2905-2912 [Chen SX, Jiang MX. Leaf litter decomposition dynamics of different tree species in Xiangxi River watershed, the Three Gorges region [J]. *Acta Ecol Sin*, 2006, 26 (9): 2905-2912]
- 林静, 张健, 杨万勤, 简毅. 岷江下游小型集水区3种人工林对降雨重金属含量的影响[J]. 环境科学学报, 2013, 33 (10): 2871-2878 [Lin J, Zhang J, Yang W Q, Jian Y. Effect of *Metasequoia glyptostroboides*, *Cunninghamia lanceolata* and *Eucalyptus grandis* plantations on heavy metal contents in the precipitation of a small catchment at the downstream of Minjiang River [J]. *Acta Sci Circumst*, 2013, 33 (10): 2871-2878]