

DOI: 10.5846/stxb201409081772

张慧玲, 杨万勤, 汪明, 廖姝, 张川, 吴福忠. 岷江上游高山森林溪流木质残体碳、氮和磷贮量特征. 生态学报, 2016, 36(7): - .

Zhang H L, Yang W Q, Wang M, Liao S, Zhang C, Wu F Z. Carbon, nitrogen, and phosphorus storage of woody debris in headwater streams in an alpine forest in the upper reaches of the Mingjiang River. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(7): - .

岷江上游高山森林溪流木质残体碳、氮和磷贮量特征

张慧玲¹, 杨万勤¹, 汪明², 廖姝¹, 张川¹, 吴福忠^{1,*}

¹ 四川农业大学生态林业研究所, 长江上游林业生态工程重点实验室, 高山森林生态系统定位研究站, 成都 611130

² 理县林业局, 理县 623102

摘要: 森林溪流木质残体是森林生态系统与水域之间物质循环和能量流动的主要联结之一, 其碳、氮和磷贮量不仅可影响森林与溪流生态系统的结构和功能, 而且与下游水体环境密切相关。因此, 于 2013 年 8 月雨季以岷江上游典型高山森林为研究对象, 调查了 12 条森林溪流木质残体的碳、氮和磷贮量分配特征, 并汇算了研究区域内碳、氮和磷在溪流中单位面积的总贮量。结果表明, 高山森林溪流木质残体碳、氮和磷的溪流单位面积总贮量分别为 312.1 g/m²、809.5 mg/m² 和 110.9 mg/m²; 在溪流中, 木质残体碳、氮和磷贮量以径级为 1—2.5 cm 和 2.5—5 cm 的木质残体分布居多, 分别共占碳、氮和磷总贮量的 86.71%、87.20% 和 84.55%; 木质残体碳、氮和磷贮量以 V 腐烂级分配最多, 分别共占碳、氮和磷总贮量的 65.86%、67.86% 和 60.31%; 尽管溪流各项特征与碳、氮和磷元素贮量的相关性不显著, 但基本达到中度相关关系。这些结果为认识森林生态系统中以木质残体为载体的碳、氮和磷输出潜力提供了基础数据。

关键词: 高山森林; 溪流; 木质残体; 碳贮量; 氮贮量; 磷贮量

Carbon, nitrogen, and phosphorus storage of woody debris in headwater streams in an alpine forest in the upper reaches of the Mingjiang River

ZHANG Huiling¹, YANG Wanqing¹, WANG Ming², LIAO Shu¹, ZHANG Chuan¹, WU Fuzhong^{1,*}

¹ Key Laboratory of Ecological Forestry Engineering, Institute of Ecology & Forestry, Long-term Research Station of Alpine Forest Ecosystem, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China

² Forestry Bureau of Lixian County, Lixian 623102, China

Abstract: Woody debris, an essential component in headwater streams in the forest, plays an important linkage role in material cycling and the flow of energy between the ecosystems of the land and water. As the decomposition proceeds, carbon, nitrogen, phosphorus, and other elements in the woody debris are gradually released into the streams. These released elements, especially nitrogen and phosphorus, are not only an important contribution into the forest ecosystems but also affect the water environment of the forest streams and the downstream ecosystems. However, little information has been available on the storage of carbon, nitrogen, and phosphorus in woody debris in the forest streams. Therefore, for this study in August, 2013, we selected 12 headwater streams, in the upper reaches of the Mingjiang River, located in an alpine primary forest in western Sichuan. In each stream, we investigated the carbon, nitrogen, and phosphorus storage of the woody debris, as well as their distribution patterns, pertaining to the diameters and the decay classes, from the head to the end, in the woody debris. The Akaike information criterion, corrected for sample size (AIC_c), was used for the selection of the optimum linear fit model to evaluate the total carbon, nitrogen, and phosphorus storage of woody debris in the headwater

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (31270498, 31170423); 国家“十二五”科技支撑计划 (2011BAC09B05); 四川省杰出青年学术与技术带头人培育项目 (2012JQ0008, 2012JQ0059); 中国博士后科学基金特别资助项目 (2012T50782)

收稿日期: 2014-09-08; **网络出版日期:** 2015- -

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

streams of the area of investigation. The results showed that the carbon, nitrogen, and phosphorus storages of woody debris per unit area of streams were 312.1 g/m^2 , 809.5 mg/m^2 , and 110.9 mg/m^2 , respectively, in these alpine forest headwater streams. Large variations were observed among the headwater streams pertaining to the carbon, nitrogen, and phosphorus storage of the woody debris. Moreover, both the woody debris diameter and the decay class could affect the storage of the carbon, nitrogen, and phosphorus. Woody debris at diameters of 1—2.5 cm and 2.5—5 cm contributed significantly more carbon (86.71%), nitrogen (87.20%), and phosphorus (84.55%) storage to the total storage, compared with those at other diameters. Woody debris at a diameter of >10 cm contributed the least and accounted for only 1.17%, 0.94%, and 1.56% of the total carbon, nitrogen, and phosphorus storage, respectively. In contrast, the woody debris of decay class V showed the highest contribution to carbon, nitrogen, and phosphorus storage; which were 65.86%, 67.86%, and 60.31%, respectively, of the total carbon, nitrogen and phosphorus storage. However, the woody debris of decay classes II and III accounted for only 8.14%, 8.70%, and 8.94% of the total carbon, nitrogen, and phosphorus storage, respectively. There were insignificant correlations between the storages of carbon, nitrogen, and phosphorus (storage per unit stream area) of the woody debris and the characteristics (length, width, depth, area, velocity, and discharge) of streams. The results obtained here could provide the basic data and sufficient scientific evidence to understand the carbon, nitrogen, and phosphorus contribution potential of woody debris in headwater streams in alpine forest ecosystems.

Key Words: alpine forest; streams; woody debris; carbon storage; nitrogen storage; phosphorus storage

溪流木质残体主要包括存留在溪流中的倒木、枝条、根桩等有机物,是森林溪流生态系统的重要组成成分^[1-2],也是陆地与溪流乃至整个水生态系统物质循环和能量流动的主要联结之一^[3-4]。这些木质残体往往由于水流的冲刷与淋溶,可能具有相对较快的降解速率^[5],不仅直接影响着森林溪流系统的结构和功能,而且其降解过程可能会造成森林生态系统碳、氮和磷的大量流失,成为影响森林溪流及下游水体环境的重要因素^[6-8]。已有的研究更加关注粗木质残体或凋落叶在溪流水体中的功能和元素释放过程^[5, 9-11]。然而,木质残体存在不同尺寸和不同腐烂程度,其在不同溪流中的空间分布可能受到多种因素的影响^[12],碳及养分的存留时间和输出潜力也可存在较大的差异^[3, 13]。迄今为止,极少研究注意到高山森林溪流中不同大小和不同腐烂等级的木质残体碳、氮和磷等生物元素的贮量特征,使得高山森林生态系统以溪流木质残体为载体的碳、氮和磷输出潜力及其对森林溪流与下游水体环境的潜在影响还不清晰,亟待深入研究。

岷江属长江流域水量最大的支流,也是成都平原乃至长江上游居民生活用水和工农业生产用水的重要水源,有“天然调节水库”之称^[14-15]。前期研究表明,受低温和频繁地质灾害的影响,岷江上游高山森林土层相对浅薄、土壤发育不完全,土壤氮和磷养分匮乏^[16-17],森林系统生产力极大地依赖于生物残体的养分循环。然而,该区森林溪流星罗密布于森林地表,具有相当贮量的木质残体,这些木质残体在溪流中极易流失碳、氮和磷等生物元素,其碳、氮和磷贮量不仅可以在一定程度上表征森林系统通过木质残体的碳、氮和磷循环,而且直接影响着下游水体环境,但缺乏必要关注。因此,以岷江上游典型高山森林溪流为研究对象,通过实地调查不同溪流中不同径级和不同腐烂级木质残体的碳、氮、磷贮量特征,以期为深入认识岷江上游高山森林生态系统碳、氮和磷的潜在输出及了解高山森林生态系统水陆环境间的生态联系提供新的思路 and 基础数据。

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藏族羌族自治州理县毕棚沟风景区($102^{\circ}53'$ — $102^{\circ}57'E$, $31^{\circ}14'$ — $31^{\circ}19'N$, 海拔 2458—4619 m),地处青藏高原东缘与四川盆地过渡的高山峡谷地带,是岷江上游的典型地带。该区年平均气温 $2-4^{\circ}\text{C}$,最高气温 23°C ,最低气温为 -18°C ,年降雨量约 850 mm,降雨多集中于 5—8 月。研究点位于海拔 3600 m 典型高山森林,乔木层主要为四川红杉(*Larix mastersiana*)、方枝柏(*Sabina saltuaria*)和岷江冷杉

(*Abies faxoniana*), 红桦(*Betula albosinensis*), 林龄约 120 年; 林下灌木主要有康定柳(*Salix paraplesia*)、高山杜鹃(*Rhododendron delavayi*)、三颗针(*Berberis sargentiana*)等; 草本植物主要有高山冷蕨(*Cystopteris Montana*)、薹草属(*Carex* spp.)和莎草属(*Cyperus* spp.)等。

1.2 试验设计的方法

基于前期的踏查, 于 2013 年 8 月高山森林溪流水量最大的季节, 根据地形、地貌和植被类型的典型性, 全面调查研究区域内沿主河道两岸的所有森林溪流内的木质残体碳、氮、磷贮量特征。研究区域的集水区面积为 431 hm², 研究区域面积为 54 hm², 在研究范围内一共发现 18 条森林溪流汇入主河道, 对所有溪流调查其生境特征, 包括溪流的长度、宽度、深度、面积、流速及流量等, 并用 GPS 定位(见表 1)。

表 1 研究区域高山森林溪流基本特征

Table 1 The basic characteristics of streams in the sampled alpine forest

编号 Number	长度 /m Length	面积/m ² Area	宽度/m Width	深度/cm Depth	流速/(m/s) Velocity	流量/(cm ³ /s) Discharge	海拔/m Altitude
A	27.6	11.49	0.77±0.35	3.80±1.20	0.19	82.15	3607
B	11.3	6.32	0.56±0.62	2.15±0.21	0.05	211.54	3607
C	36.0	24.00	0.63±0.25	14.88±2.59	0.11	6630.55	3607
D	18.0	19.62	1.09±0.55	4.25±1.06	0.32	4743.80	3620
E	255.6	221.48	0.83±0.26	8.88±5.09	0.49	13480.46	3634
F	108.0	92.52	0.89±0.39	9.57±8.29	0.15	66.21	3634
G	186.0	123.00	0.68±0.18	6.62±3.10	0.38	7064.98	3621
H	92.4	83.46	0.92±0.29	4.33±1.21	0.14	1775.51	2620
I	13.2	5.15	0.39±0.08	4.25±0.35	0.06	69.31	3625
J	66.0	33.90	0.50±0.05	6.25±2.06	0.48	20287.85	3658
K	68.4	40.56	0.63±0.38	4.20±0.45	0.32	3476.27	3667
L	16.8	5.21	0.33±0.17	4.00±2.16	0.07	56.05	3667
M	146.4	71.37	0.49±0.31	2.80±0.15	0.89	4360.67	3613
N	15.4	6.14	0.40±0.10	2.00±0.40	0.13	101.54	3679
O	84.0	37.80	0.45±0.21	12.75±3.89	0.44	15902.08	3692
P	174.0	191.40	1.10±0.26	6.67±0.58	0.62	15978.04	3685
Q	333.6	358.62	1.08±0.53	10.50±0.71	0.61	42526.96	3677
R	288.0	162.72	0.50±0.05	5.50±0.5	0.52	15716.30	3663

宽度和深度数据为平均值±标准差, n≥3

在调查过程中未发现根桩, 且溪流内木质残体直径多为 10 cm 以下的树枝, 其物种难以辨认, 故在本实验中没有进行物种的分类也未包含根桩, 主要使用径级与腐烂级来描述该区域的地上部分木质残体基本特征。其中, 木质残体径级参照 Harmon & Sexton^[18]的径级定义, 分为 1—2.5 cm、2.5—5 cm、5—10 cm 以及 >10 cm 四类; 木质残体腐烂级参照闫恩荣等^[19]、Burrows 等^[1]及 Bataineh & Daniels^[2]对木质残体腐烂等级的划分系统, 并结合研究区域实际情况, 分为 5 个等级, 即 I 级: 新鲜, 结构基本完好, 木质保留原样; II 级: 开始腐解, 结构不完整, 但仍然很坚硬, 树皮开始脱落; III 级: 树皮大部分脱落, 腐烂相对明显, 木质偏软, 可能出现苔藓及真菌; IV 级: 易被刺穿, 但某些地方仍然坚硬, 没有树皮, 可能有苔藓、真菌及入侵根; V 级: 不再保留原样, 木质可被任意刺穿, 易成粉末状。

根据实地采样典型性与可操作相结合的原则, 选取其中 12 条具有代表性的森林溪流, 通过样方收获法详细调查其内木质残体贮量。每条森林溪流每间隔 10 m (若溪流较短, 依实际情况做适当调整, 每条溪流至少 3 个采样点) 设置一个长为 1 m, 宽为溪流实际宽度的样方, 收集样方内所有的木质残体, 按不同径级与腐烂级进行分离并称量样品的湿重, 同时取一定量样品带回实验室, 置入 65 °C 烘箱中烘干至恒重并称量, 计算样品中的含水率并求出样品干重, 然后将每个组分的各个样品粉碎过筛, 碳采用重铬酸钾外加热法测定(LY/T

1237—1999);样品氮和磷待测液用浓 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消煮法制备 (NY/T 2017—2011),氮采用半微量凯氏定氮法测定 (LY/T 1228—1999),磷采用钼锑抗比色法测定 (LY/T 1232—1999)。木质残体各组分的生物量乘以相应的元素含量得到其元素贮量。

1.3 数据处理与统计分析

采用 Microsoft Excel 2013 和 SPSS 20.0 软件对所有数据进行处理和统计分析,由 Origin Pro 9.0 进行绘图;区域集水区等数据信息通过 ArcGIS 10.0 软件对毕棚沟风景区地形图进行解译而获得。

基于已调查的溪流数据信息,通过 Spearman 相关系数评价木质残体元素贮存量与溪流特征之间的相关关系,显著水平设定为 $P<0.05$ 。利用线性回归分析拟合已采样的 12 条溪流中木质残体碳、氮和磷总现存量与溪流长度、宽度、深度、面积、流速和流量及其所有组合的关系方程,由于样本量相对小,则根据小样本校正的赤池信息准则 (Corrected Akaike information criterion, AIC_C),选择出 3 个最佳的回归方程,以计算其余 6 条未完全调查溪流的木质残体元素现存量,并汇算该区域森林溪流木质残体各元素的单位溪流面积贮量。其中, AIC_C 计算公式^[20]为:

$$AIC_C = \ln \frac{RSS}{n} + \frac{n + k}{n - k - 2}$$

式中:RSS (Residual sum of squares) 为残差平方和, n 为观察数, k 为参数的数量。

2 结果分析

2.1 高山森林溪流木质残体碳贮量分配

通过线性回归拟合,得到碳与溪流特征最佳的关系方程为: $Y_1 = 0.311x_1 + 0.099$, $R^2 = 0.781$, $P < 0.001$; (x_1 为溪流面积),并计算得到高山森林溪流木质残体碳元素在溪流单位面积的总贮量为 312.1 g/m^2 。碳贮量在各溪流之间有一定的变化,其变化范围为 $9.60\text{—}1428 \text{ g/m}^2$ (表 2),其与溪流各项特征的相关性系数为 $0.406\text{—}0.567$ (表 3),尽管相关关系不显著 ($P > 0.05$),溪流各项特征仍对碳贮量有一定程度的影响。森林溪流木质残体碳贮量以径级 1—5 cm 木质残体居多 (271.1 g/m^2),占总贮量的 86.71% ;而径级为 10 cm 以上的木质残体分配最少,仅占 1.17% (图 1)。木质残体碳贮量以

V 腐烂级分布最多,共占总贮量 65.86% ,其中径级 1—2.5 cm 和 2.5—5 cm 的木质残体 V 腐烂级的碳贮量分别占总贮量的 32.52% 和 29.83% ;径级为 5—10 cm 的木质残体则是腐烂级 $\text{II} > \text{IV} > \text{V} > \text{III}$;径级 $> 10 \text{ cm}$ 的木质残体较少出现在高山森林溪流中,多存在于 II 腐烂级;腐烂级为 II 和 III 的木质残体共占总贮量的 8.14% (图 1)。

2.2 高山森林溪流木质残体氮贮量分配

通过线性回归拟合,得到氮与溪流特征最佳的关系方程为: $Y_2 = 0.808x_2 + 0.142$, $R^2 = 0.750$, $P < 0.001$; (x_2 为溪流面积),并计算得到高山森林溪流木质残体氮元素在溪流单位面积的总贮量为 809.5 mg/m^2 ,各溪流木质残体氮贮量范围为 $32.08\text{—}4122 \text{ mg/m}^2$ (表 2)。相关性分析表明,除流速以外,氮贮量与溪流各项特征的相关系数范围为 $0.406\text{—}0.539$,关系不显著 (表 3)。木质残体氮贮量与碳贮量相同,以 1—5 cm 的木质残体分配最多,为 706.4 mg/m^2 ,共占 87.20% ;径级 10 cm 以上的木质残体分配最少,仅占 0.94% (图 1)。木质残体氮贮量以 V 腐烂级分配最多,占总贮量的 67.86% ;径级 1—2.5 cm 与 2.5—5 cm 的木质残体以腐烂级 IV 和 V 分

表 2 高山森林各溪流 (12 条) 木质残体的碳、氮和磷贮量

Table 2 The carbon, nitrogen and phosphorus storage of woody debris in 12 alpine forest streams

溪流 Streams	贮量 Storage		
	碳 Carbon/ (g/m^2)	氮 Nitrogen/ (mg/m^2)	磷 Phosphorus/ (mg/m^2)
A	328.4±18.1	653.7±33.9	182.3±1.65
B	99.36±1.05	341.5±9.43	124.3±1.18
C	1428±11.4	4122±12.6	913.7±10.1
D	149.2±7.02	316.5±1.78	117.7±1.09
E	318.9±3.11	838.8±3.29	138.2±3.24
F	112.6±3.91	281.4±0.96	43.71±3.04
G	372.3±2.57	969.7±0.96	57.59±3.09
H	371.4±13.9	875.0±3.96	62.42±2.41
I	52.84±3.86	191.9±0.84	6.857±0.06
J	134.9±3.43	264.5±0.88	43.15±0.85
K	100.3±2.91	272.2±0.80	9.054±1.32
L	9.604±0.24	32.08±0.23	5.065±0.15

各元素贮量数据为平均值±标准差, $n=3$ 。

配较多,分别共占氮贮量的 49.65%与 35.40%;腐烂级为Ⅱ与Ⅲ的木质残体总体而言都分布较少,共占氮贮量的 8.70% (图 1)。

2.3 高山森林溪流木质残体磷贮量分配

通过线性回归拟合,得到磷与溪流特征最佳的关系方程为: $Y_3=0.105x_3+0.488, R^2=0.494, P=0.011$; (x_3 为溪流面积),并计算得到高山森林溪流木质残体磷元素在溪流单位面积的总贮量为 110.9 mg/m^2 ,各溪流木质残体磷贮量范围为 $5.065\text{—}913.7\text{ mg/m}^2$ (表 2)。相关性分析表明,磷贮量与溪流深度的相关系数为 0.501,达到中度相关;而磷贮量与其他溪流特征的相关系数范围为 0.098—0.274,仅微弱相关(表 3)。与碳和氮贮量分配相似,木质残体磷贮量也以 1—5 cm 的木质残体分配最多,为 96.32 mg/m^2 ,共占 84.55%;径级 10 cm 以上的木质残体磷贮量分配最少,仅占 1.56% (图 1)。V 腐烂级的木质残体磷贮量分配最多,共占 60.31%,其中 1—2.5 cm 和 2.5—5 cm 木质残体 V 腐烂级磷贮量分别占总贮量的 36.02%和 20.94%;Ⅱ与Ⅲ腐烂级的木质残体磷贮量分配较少,共占 8.94% (图 1)。

表 3 高山森林溪流木质残体碳、氮、磷贮量与溪流特征的相关系数
Table 3 The correlation analysis between the carbon, nitrogen and phosphorus storage of woody debris and the characteristics of streams in alpine forest

溪流特征 Characteristics of streams	碳贮量 Carbon storage	氮贮量 Nitrogen storage	磷贮量 Phosphorus storage
长度 Length	0.552	0.455	0.133
深度 Depth	0.550	0.539	0.501
宽度 Width	0.567	0.427	0.196
面积 Area	0.559	0.517	0.217
流速 Velocity	0.406	0.182	0.098
流量 Discharge	0.516	0.406	0.274

* $P<0.05$, ** $P<0.01$; $n=12$.

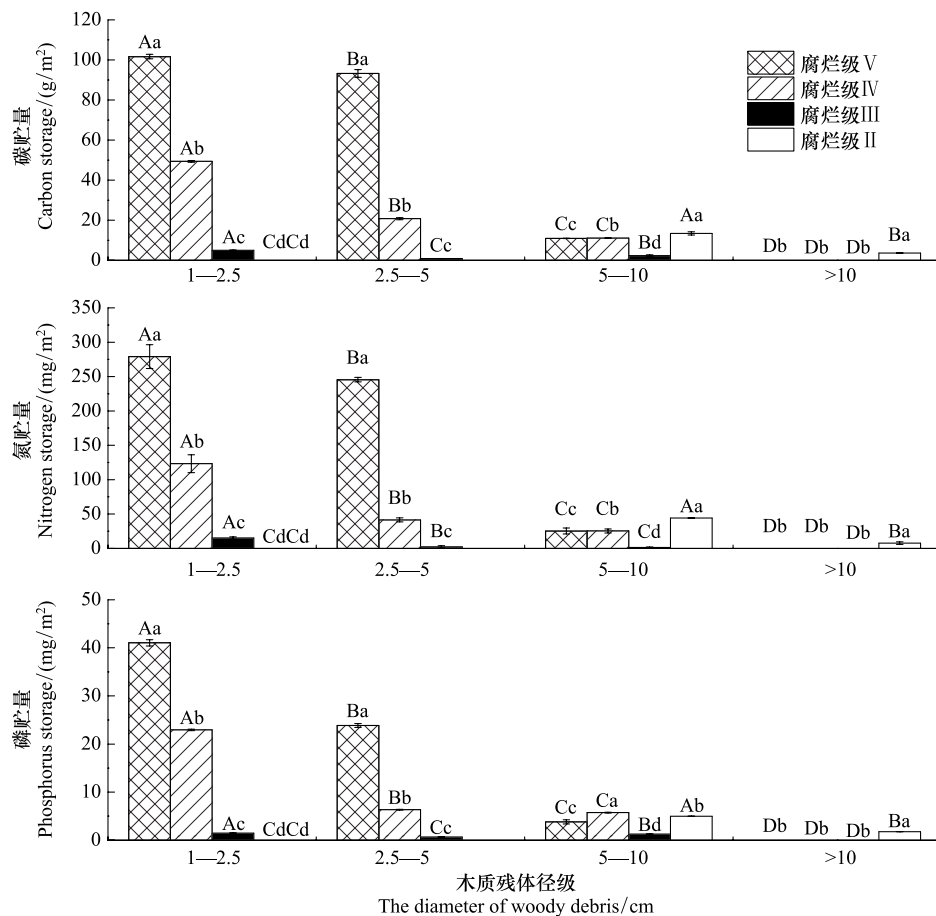


图 1 高山森林溪流(12 条)木质残体碳、氮和磷贮量不同径级与腐烂级分配

Fig.1 Carbon, nitrogen and phosphorus storage distribution of different diameter and decay of woody debris in alpine forest river streams
不同大写字母表示相同腐烂级不同径级的木质残体元素贮量差异显著,不同小写字母表示同一径级不同腐烂级的木质残体元素贮量差异显著 ($P<0.05$)

3 讨论

本项调查结果表明,高山森林溪流木质残体碳总贮量为 312.1 g/m^2 ,碳贮量最高可达到 1428 g/m^2 ,尽管该区木质残体的碳含量相对较高,但该区溪流内不易容纳较大径级木质残体,同时在很大程度上受到木质残体基质质量、其所处的溪流生境、河岸植被及气候等因素的影响,因此可能低于其他溪流相对较大的研究区,如 Chen 等^[3]在加拿大不列颠哥伦比亚省(British Columbia)南部 Okanagan 流域不受干扰的原始河岸林溪流内木质残体(仅大木质残体)的平均碳贮量,或者 Beckman^[24]等在美国科罗拉多圣弗兰流域原始森林源头溪流内木质残体坝的平均碳贮量(表 4)。尽管如此,前期的研究表明,该区土壤碳淋溶量最高可达 764 mg/m^2 ^[25],远低于木质残体在溪流的单位面积贮量,充分表明该区木质残体具有森林系统通过溪流输出碳元素的巨大潜在力,也是溪流中的重要碳库。此外,该区土壤氮年均淋溶量为 495 mg/m^2 ^[26],低于该区木质残体在溪流中的单位面积氮贮量(809.5 mg/m^2),暂无该区磷年均淋溶量的研究。因此,该区木质残体可能也是森林生态系统通过溪流输出氮和磷的潜在重要途径。高山森林溪流木质残体碳贮量的分配主要以小径级和高腐烂级的木质残体居多,氮和磷元素贮量的分配与碳贮量基本相似。森林溪流往往密布于森林地表,然而本研究区溪流宽度较小,可能更易接受径级较小的木质残体,具有相当量的贮量;且小径级木质残体一般具有较大的表面积与体积比,有利于其分解^[27],因此多处于高度腐烂状态。

表 4 不同研究区林地和溪流木质残体碳、氮和磷贮量 (g/m^2)

Table 4 Published estimates of carbon, nitrogen and phosphorus storage in forest land and streams in other study area compared to instream carbon, nitrogen and phosphorus storage of woody debris estimated in this study (g/m^2)

地点 Sites	类型 Types	碳 Carbon	氮 Nitrogen	磷 Phosphorus	海拔/m Altitude	资料来源 Reference
陕西秦岭	巴山冷杉林(林地 CWD)	799.2	2.926	0.214	2410	[21]
西藏色季拉	原始冷杉林(林地 CWD)	4708	18.83	3.599	3800	[22]
科罗拉多落基山脉	原始冷杉林(林地 CWD)		9.22	0.489		[23]
美国科罗拉多	原始针叶林(溪流 Jams)	5400			2400—3200	[24]
加拿大 Okanagan 流域	原始小杆松林(溪流 LWD)	1700			1300—1600	[3]
本研究区	原始暗针叶林(溪流 WD)	312.1	0.8095	0.1109	3600	

植物残体, WD: Woody debris; 粗木质残体, CWD: Coarse woody debris; 大木质残体, LWD: Large woody debris; 堵塞物, Jams: Jams contain about wood and sediment.

木质残体元素贮量在空间尺度上存在较大的变异性,这种变异性不仅表现在不同林区或溪流间(表 4),即使在同一尺度的溪流间,其元素贮量的差异也可能较大。本项研究中,木质残体碳、氮和磷元素在各溪流中的贮量相差数倍至数百倍,与 Chen 等^[3]的研究一致,这与存储在溪流中的木质残体自身现存量直接相关,说明木质残体在溪流中的分配并不均匀,Rikhari^[27]也证实了这一点。此外,木质残体各组分在分解过程中养分含量不断变化,导致其养分浓度存在较大的差异^[28],这可能是受到溪岸两侧的树种^[29]、溪流特征等的影响。相关性分析表明,碳、氮和磷贮量与溪流长度、宽度、深度、面积、流速和流量的相关性尽管均不显著($P > 0.05$),但碳和氮贮量与溪流各项特征基本达到中度相关,而溪流深度也能中度影响磷元素在溪流中的贮量。这可能是由于研究区域受到气候的影响,多发旱涝、火灾、飓风、泥石流、滑坡和冰冻等自然灾害,直接致死或致伤了林木^[30],从而影响木质残体向溪流的输入及其在溪流中的分解^[1, 31]。因为,外界干扰可直接改变水环境特征、影响水生生物群落的运动与活性^[25, 32];也可影响木质残体在水环境中的运输,从而导致木质残体容易在溪流内快速向下游输送或在溪流内堆积。调查时期是溪流流量最大的季节,溪流具有一定的深度与流速,质地稍重的木质残体在深水处堆积,而质地较轻的木质残体随水流输入到下游或被截留,从而导致深水处的木质残体贮量增加。尽管木质残体受到水流的冲刷与淋溶,碳、氮、磷元素大量流失,但由于木质残体碳含量较高,其总贮量并不受到太大的影响,而氮和磷元素含量相对低很多,且极易流失,因此氮和磷总贮量相对

含量相对偏低,且不与溪流各项特征具有显著相关关系。

由于木质残体在流动的水环境中的存储状态不断变化着,且木质残体碳库滞留时间比土壤碳库相对更短^[33],因而溪流木质残体碳库可能比陆地木质残体碳库或地下土壤层碳库更为活跃;另外,木质残体堆积处可大量吸收磷酸盐^[34],且能截留漂流在溪流内养分总量与木质残体差不多^[35]的凋落叶等^[36],可见,木质残体尽管自身所含碳、氮和磷贮量相对偏低,但可通过截留凋落叶等非木质残体影响生态系统养分循环,对高山森林生态系统的养分保持及维持生态系统稳定性具有重要作用。

尽管小径级的木质残体分解速率较大径级的快,甚至快于林地木质残体,但相较于凋落叶等非木质残体,木质残体可能通过泥沙的掩埋、堆积等,而在溪流内的存留时间相对更长^[18, 37]。因此,木质残体在溪流中的存在状态及其生态功能对森林生态系统与水生态系统碳及养分循环的影响亟待长期深入的研究。

4 结论

岷江上游高山森林溪流木质残体具有相对较大的碳、氮和磷元素贮量,且主要以小径级和高腐烂级的木质残体为主;溪流特征不同程度的影响着木质残体碳、氮和磷元素贮量的分配,进而影响森林生态系统与水生态系统碳及养分的循环。尽管木质残体在溪流中分解的相关机制及功能还有待于进一步深入研究,但这些结果不仅能为进一步了解森林生态系统与水生态系统之间的联系提供基础数据,也能为岷江上游高山森林乃至岷江流域水体环境的管理提供新的思路和科学依据。

致谢:非常感谢四川农业大学生态林业研究所岳楷、王滨、彭艳和苟小林在野外采样与室内试验中提供的帮助。

参考文献 (References):

- [1] Burrows R M, Magierowski R H, Fellman J B, Barmuta L A. Woody debris input and function in old-growth and clear-felled headwater streams. *Forest Ecology and Management*, 2012, 286: 73-80.
- [2] Bataineh M M, Daniels L D. An objective classification of largewood in streams. *Forest Ecology and Management*, 2014, 313: 1-9.
- [3] Chen X Y, Wei X H, Scherer R. Influence of wildfire and harvest on biomass, carbon pool, and decomposition of large woody debris in forested streams of southern interior British Columbia. *Forest Ecology and Management*, 2005, 208(1/3): 101-114.
- [4] Richardson J S, Danehy R J. A synthesis of the ecology of headwater streams and their riparian zones in temperate forests. *Forest Science*, 2007, 53(2): 131-147.
- [5] Chen X Y, Wei X H, Scherer R, Luider C, Darlington W. A watershed scale assessment of in-stream large woody debris patterns in the southern interior of British Columbia. *Forest Ecology and Management*, 2006, 229(1/3): 50-62.
- [6] Angelopoulos K, Spiliopoulos I C, Mandoulaki A, Theodorakopoulou A, Kouvelas A. Groundwater nitrate pollution in northern part of Achaia Prefecture. *Desalination*, 2009, 248(1/3): 852-858.
- [7] Olajuyigbe S O, Tobin B, Gardiner P, Nieuwenhuis M. Stocks and decay dynamics of above- and belowground coarse woody debris in managed Sitka spruce forests in Ireland. *Forest Ecology and Management*, 2011, 262(6): 1109-1118.
- [8] Zhou W J, Zhang Y P, Schaefer D A, Sha L Q, Deng Y, Deng X B, Dai K J. The role of stream water carbon dynamics and export in the carbon balance of a tropical seasonal rainforest, Southwest China. *PLoS ONE*, 2013, 8(2): e56646.
- [9] 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. *生态学报*, 2006, 26(9): 2905-2912.
- [10] Wiebe S, Morris D, Luckai N, Reid D. Coarse woody debris dynamics following biomass harvesting: tracking carbon and nitrogen patterns during early stand development in upland black spruce ecosystems. *International Journal of Forest Engineering*, 2012, 23(1): 25-32.
- [11] Bruder A, Schindler M H, Moretti M S, Gessner M O. Litter decomposition in a temperate and a tropical stream: the effects of species mixing, litter quality and shredders. *Freshwater Biology*, 2014, 59(3): 438-449.
- [12] Baillie B R, Garrett L G, Evanson A W. Spatial distribution and influence of large woody debris in an old-growth forest river system, New Zealand. *Forest Ecology and Management*, 2008, 256(1/2): 20-27.
- [13] Guyette R P, Cole W G, Dey D C, Muzika R M. Perspectives on the age and distribution of large wood in riparian carbon pools. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2002, 59(3): 578-585.

- [14] Zhang M F, Wei X H, Sun P S, Liu S R. 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. *Journal of Hydrology*, 2012, 464-465: 1-11.
- [15] 张文江, 宁吉才, 宋克超, 黎小东, 王焱, 王欣, 覃光华. 岷江上游植被覆被对水热条件的响应. *山地学报*, 2013, 31(3): 280-286.
- [16] Yang W Q, Wang K Y, Kellomäki S, Gong H D. Litter dynamics of three subalpine forests in western Sichuan. *Pedosphere*, 2005, 15(5): 653-659.
- [17] 刘金玲, 吴福忠, 杨万勤, 石培礼, 王奥, 杨玉莲, 武志超. 季节性冻融期间川西亚高山/高山森林土壤净氮矿化特征. *应用生态学报*, 2012, 23(3): 610-616.
- [18] Harmon M E, Sexton J. Guidelines for Measurements of Woody Detritus in Forest Ecosystems. Washington DC: US LTER Publication, 1996.
- [19] 闫恩荣, 王希华, 黄建军. 森林粗死木质残体的概念及其分类. *生态学报*, 2005, 25(1): 158-167.
- [20] McQuarrie A D R, Tsai C L. Regression and the time series model selection. Singapore: World Scientific Pub Co Inc, 1998.
- [21] 李凌浩, 党高弟, 王铁军, 赵雷刚. 秦岭巴山冷杉林粗死木质残体研究. *植物生态学报*, 1998, 22(5): 434-440.
- [22] 罗大庆, 郭泉水, 黄界, 潘刚, 辛学兵, 郑维列. 西藏色季拉原始冷杉林死亡木特征研究. *生态学报*, 2004, 24(3): 635-639.
- [23] Arthur M A, Fahey T J. Mass and nutrient content of decaying boles in an Engelmann spruce-subalpine fir forest, Rocky Mountain National Park, Colorado. *Canadian Journal of Forest Research*, 1990, 20(6): 730-737.
- [24] Beckman N D, Wohl E. Carbon storage in mountainous headwater streams: the role of old-growth forest and logjams. *Water Resources Research*, 2014, 50(3): 2376-2393.
- [25] 苟小林, 吴福忠, 杨万勤, 谭波, 徐振锋, 刘金玲, 李志萍, 黄莉. 季节性冻融格局变化对高山森林土壤氮素淋溶损失的影响. *环境科学学报*, 2014, 34(2): 439-448.
- [26] 苟小林, 吴福忠, 杨万勤, 谭波, 徐振锋, 刘金玲, 李志萍, 黄莉. 季节性冻融格局变化对高山森林土壤 DOC 淋洗的影响. *水土保持学报*, 2013, 27(6): 205-210.
- [27] Rikhari H C, Singh S P. Coarse woody debris in oak forested stream channels in the central Himalaya. *Ecoscience*, 1998, 5(1): 128-131.
- [28] Romero L M, Smith T J, Fourqurean J W. Changes in mass and nutrient content of wood during decomposition in a south Florida mangrove forest. *Journal of Ecology*, 2005, 93(3): 618-631.
- [29] Liu W Y, Fox J E D, Xu Z F. Biomass and nutrient accumulation in montane evergreen broad-leaved forest (*Lithocarpus xylocarpus* type) in Ailao Mountains, SW China. *Forest Ecology and Management*, 2002, 158(1/3): 223-235.
- [30] 吴庆贵, 吴福忠, 杨万勤, 谭波, 杨玉莲, 倪祥银, 何洁. 川西高山森林林隙特征及干扰状况. *应用与环境生物学报*, 2013, 19(6): 922-928.
- [31] Nakamura F, Swanson F J. Dynamics of wood in rivers in the context of ecological disturbance. *American Fisheries Society Symposium*, 2003, 37: 279-297.
- [32] Haggerty S M, Batzer D P, Jackson C R. Macroinvertebrate response to logging in coastal headwater streams of Washington, U.S.A. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2004, 61(4): 529-537.
- [33] 杨玉盛, 郭剑芬, 林鹏, 何宗明, 陈光水. 格氏栲天然林与人工林粗木质残体碳库及养分库. *林业科学*, 2005, 41(3): 7-11.
- [34] Webster J R, Golladay S W, Benfield E F, Angelo D J D, Peters G T. Effects of forest disturbance on particulate organic matter budgets of small streams. *Journal of the North American Benthological Society*, 1990, 9(2): 120-140.
- [35] Bilby R E. Decomposition and nutrient dynamics of wood in streams and rivers // Gregory S V, Boyer K L, Gurnell A M, eds. *The Ecology and Management of Wood in World Rivers*. Bethesda, Maryland: America Fisheries Society, Symposium, 2003: 135-147.
- [36] Hoover T M, Marczak L B, Richardson J S, Yonemitsu N. Transport and settlement of organic matter in small streams. *Freshwater Biology*, 2010, 55(2): 436-449.
- [37] Richardson J S, Shaughnessy C R, Harrison P G. Litter breakdown and invertebrate association with three types of leaves in a temperate rainforest stream. *Archiv für Hydrobiologie*, 2004, 159(3): 309-325.