

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2014.0886

廖姝, 杨万勤, 张慧玲, 等. 2015. 降雨季节岷江上游高山森林溪流非木质残体氮和磷贮量特征[J]. 环境科学学报, 35(6): 1907-1913

Liao S, Yang W Q, Zhang H L, et al. 2015. Storage of nitrogen and phosphorus in non-woody debris in alpine forest streams in the upper reaches of the Minjiang River in rainy season[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 35(6): 1907-1913

降雨季节岷江上游高山森林溪流非木质残体氮和磷贮量特征

廖姝, 杨万勤, 张慧玲, 张川, 谭波, 吴福忠*

四川农业大学生态林业研究所, 林业生态工程四川省重点实验室, 高山森林生态系统定位研究站, 成都 611130

收稿日期: 2014-07-22 修回日期: 2014-08-26 录用日期: 2014-08-26

摘要: 高山森林生态系统氮和磷可随溪流非木质残体的输出和降解而流失, 进而影响下游水体环境, 但目前缺乏必要关注. 因此, 本文以岷江上游高山森林为研究对象, 于 2013 年 8 月 (雨量最大季节) 调查了 18 条溪流中的非木质残体 (树皮、树叶和 <1 cm 树枝) 氮和磷贮量特征. 结果表明, 该区域溪流中非木质残体氮在单位面积集水区的贮量为 $2684 \text{ mg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 在单位面积溪流的氮贮量为 $774 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$, 其中, 树皮、树叶和 <1 cm 树枝在单位面积溪流的贮量分别为 112、154 和 $508 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$, 分别占总氮贮量的 14%、20% 和 66%; 溪流中非木质残体磷在单位面积集水区的贮量为 $468 \text{ mg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 在单位面积溪流的磷贮量为 $135 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$, 其中, 树皮、树叶和 <1 cm 树枝在单位面积溪流的贮量分别为 15、31 和 $89 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$, 分别占总磷贮量的 11%、23% 和 66%. 回归分析结果表明, 非木质残体氮和磷贮量均随溪流长度和面积的增加而显著增加, 但随溪流流量的增加表现为先增加再降低的趋势. 这些结果为深入认识岷江上游高山森林氮和磷流失途径及其对下游生态系统的潜在影响提供了新的思路.

关键词: 氮; 磷; 非木质残体; 高山森林溪流; 岷江上游

文章编号: 0253-2468(2015)06-1907-07 中图分类号: X171.1; Q948.1 文献标识码: A

Storage of nitrogen and phosphorus in non-woody debris in alpine forest streams in the upper reaches of the Minjiang River in rainy season

LIAO Shu, YANG Wanqin, ZHANG Huiling, ZHANG Chuan, TAN Bo, WU Fuzhong*

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

Received 22 July 2014; received in revised form 26 August 2014; accepted 26 August 2014

Abstract: Nitrogen and phosphorus could be lost through the output and degradation of non-woody debris from headwater streams in alpine forest ecosystems. In this study, the non-woody debris containing bark, leaf and <1 cm branch were collected in 18 headwater streams in an alpine forest in the upper reaches of the Minjiang River in August 2013 (the rainy season with the greatest rainfall). The storages of nitrogen and phosphorus in the non-woody debris were analyzed. The results showed that the nitrogen storage in non-woody debris was $2684 \text{ mg} \cdot \text{hm}^{-2}$ per unit area of watershed, and was $774 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$ per unit area of stream. Bark, leaf and <1 cm branch stored 112, 154 and $508 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$ per unit area of stream, which accounted for 14%, 20% and 66% of total nitrogen storage, respectively, in these alpine forest streams. Moreover, the phosphorus storage in non-woody debris was $468 \text{ mg} \cdot \text{hm}^{-2}$ per unit area of watershed, and was $135 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$ per unit area of stream. Bark, leaf and <1 cm branch showed 11% ($15 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$), 23% ($31 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$) and 66% ($89 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$) of the total phosphorus storage, respectively. Moreover, the storages of both nitrogen and phosphorus in non-woody debris significantly increased with the increase of stream length and area, but exhibited an increase and then decrease tendency with the increasing flow of stream. These results are useful in exploring the flux pathways of nitrogen and phosphorus in the alpine forests and the associated potential effects of nutrient losses

基金项目: 国家自然科学基金 (No.31170423, 31270498); 国家“十二五”科技支撑计划 (No.2011BAC09B05); 中国博士后科学基金特别资助项目 (No.2012T50782); 四川省青年基金 (No.2012JQ0008, 2012JQ0059)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No.31170423, 31270498), the National Key Technology R&D Program of China (No. 2011BAC09B05), the Post-doctoral Foundation of China (No. 2012T50782) and the Sichuan Youth Science and Technology Foundation (No. 2012JQ0008, 2012JQ0059)

作者简介: 廖姝 (1992—), 女, E-mail: liaoshu_224@163.com; * 通讯作者 (责任作者), E-mail: wufzchina@163.com

Biography: LIAO Shu (1992—), female, E-mail: liaoshu_224@163.com; * **Corresponding author**, E-mail: wufzchina@163.com

on water environment in downstream of the Minjiang River.

Keywords: nitrogen; phosphorus; non-woody debris; alpine forest stream; the upper reaches of the Minjiang River

1 引言 (Introduction)

高山森林溪流是联系森林生态系统和水生生态系统的重要纽带(邓红兵等, 2002). 在自身重力、风和雨水冲刷等的作用下, 大量的树皮、树叶和树枝等非木质残体 (Non-woody debris) 输入溪流 (Christensen *et al.*, 1996; Peterson *et al.*, 2001). 这些非木质残体重量较轻, 氮和磷含量相对较高, 降解较快并且易随水体流动, 成为森林生态系统氮和磷流失的重要形式, 并可能成为影响下游生态系统和水环境的重要因素 (杨明生等, 2008; Green *et al.*, 2010; Lin *et al.*, 2014). 然而, 已有的研究更加关注凋落物在溪流水体中的降解和养分释放过程 (Danger *et al.*, 2013; Bruder *et al.*, 2014), 均忽略了非木质残体氮和磷等养分元素贮量特征, 使得高山森林生态系统通过溪流中非木质残体输出的氮和磷等养分流失潜力及其对下游生态系统和水环境的潜在影响并不清晰, 亟待深入研究.

岷江是长江流域水量最大的支流, 为长江上游提供了丰富的水力资源, 同时也是长江上游居民生活和农业生产的主要水源之一 (曾超等, 2011; Zhang *et al.*, 2012). 受低温和频繁地质灾害影响, 作为重要水源涵养地和生态屏障的岷江上游高山森林土层浅薄、土壤发育不完全 (Yang *et al.*, 2005; 秦嘉励

等, 2009), 而氮和磷是限制生态系统生产力的关键养分元素 (Ågren *et al.*, 2012), 其流失对高山森林养分循环格局及下游生态系统水质安全影响重大. 前期的调查发现, 雨季大量降水形成的径流将地表非木质残体带入溪流, 成为森林系统氮和磷等养分流失的重要途径, 但人们对此一直缺乏必要关注. 因此, 本文以岷江上游典型高山森林为研究对象, 在 2013 年雨量最大季节 (8 月) 调查了 18 条溪流非木质残体 (树皮、树叶和 <1 cm 树枝) 氮和磷贮量特征, 以期深入认识岷江上游高山森林氮和磷等养分流失途径及其对下游生态系统的潜在影响提供新的思路.

2 材料与方法 (Materials and methods)

2.1 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米亚罗自然保护区毕棚沟风景区 (31°14'~31°19' N, 102°53'~102°57' E, 海拔 2458~4619 m), 地处青藏高原东缘向四川盆地过渡的高山峡谷地带 (图 1). 该区域年平均气温 2~4 °C, 最高气温 23 °C (7 月), 最低气温 -18 °C (1 月), 年降雨量 850 mm. 冬季降雪期为每年 11 月至次年 4 月, 每年 11 月下旬开始降雪, 12 月下旬至次年 3 月初形成完全雪被覆盖, 直至 4 月开始融化 (谭波等, 2011). 区域内典型

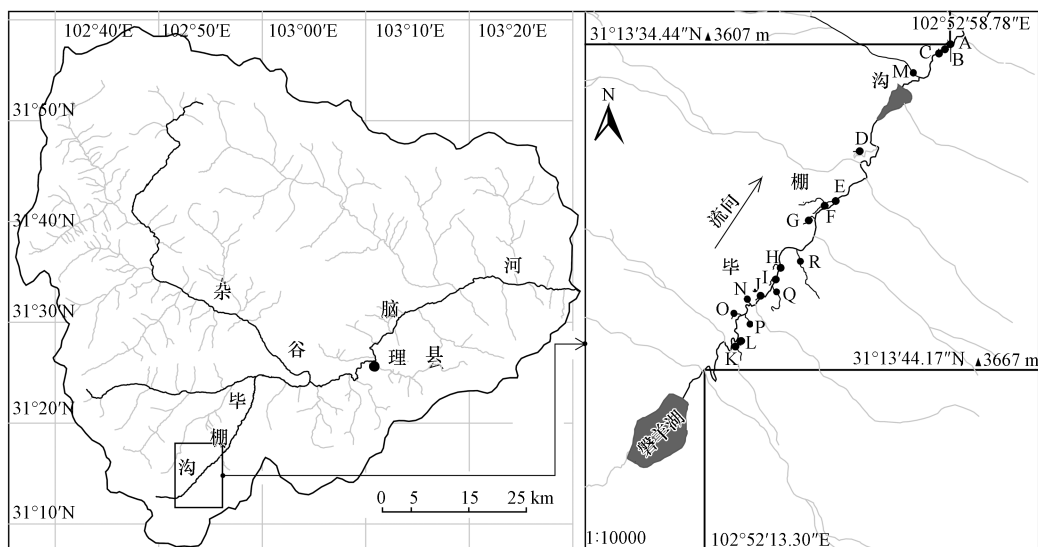


图 1 研究区域内的 18 条溪流 (A~L 为已采样的 12 条溪流, M~R 为未采样的 6 条溪流)

Fig. 1 18 alpine streams in the studied region of the upper reaches of the Minjiang River (A~L are the sampling streams and M~R are the non-sampling streams)

优势乔木为红桦 (*Betula albo-sinensis*)、岷江冷杉 (*Abies faxoniana*)、细齿樱桃 (*Cerasus serrula*) 等,郁闭度约 0.7;灌木为康定柳 (*Salix paraplesia*)、高山杜鹃 (*Rhododendron lapponicum*)、绢毛蔷薇 (*Rosa sericea*) 等,盖度约 0.4;草本主要有羽裂蟹甲草 (*Cacalia tangutica*)、苔草 (*Carex tristachya*)、蹄盖蕨 (*Athyrium filix-femina*) 等,盖度约 0.6 (Yang *et al.*, 2005; 吴庆贵等, 2013)。地表新鲜凋落物层厚度为 (7.00 ± 0.75) cm (Ni *et al.*, 2014)。土壤浅薄,为发育于坡积物上的暗棕壤 (Wu *et al.*, 2010)。

2.2 样品采集与分析

基于前期调查结果,根据实地采样可操作性和典型性相结合的原则,综合考虑该区域地形、地貌和植被类型的典型性及人为干扰等因素,以海拔

3600 m 左右的 130 年成熟岷江冷杉原始林内的 18 条溪流为研究对象 (表 1),于 2013 年 8 月 (降雨量最大) 在 12 条汇入主河道的溪流中 (另外 6 条溪流不便采样,其非木质残体氮和磷贮量由拟合的回归方程计算得出),从尽头到源头每间隔 10 m 设置一个长为 1 m、宽为溪流实际宽度 (区域内溪流宽度普遍 < 1 m) 的样方,收集所有残存的非木质残体,带回实验室,并按树皮、树叶和 < 1 cm 树枝进行分类。

样品于 $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ 烘至恒重,粉碎,过 0.25 mm 筛。非木质残体氮和磷含量分别按《中华人民共和国林业行业标准 LY-T 1228》和《中华人民共和国林业行业标准 LY-T 1232》进行测定,并分别以其与干质量的乘积表征贮量。

表 1 岷江上游高山森林 18 条溪流基本特征

Table 1 Characteristics of the 18 alpine streams in the upper reaches of the Minjiang River

溪流	经度	纬度	海拔/m	长度/m	面积/m ²	流量/(cm ³ ·s ⁻¹)
A	102°52' E	31°14' N	3607	27.60	11.49	82.15
B	102°52' E	31°14' N	3607	11.28	6.32	211.54
C	102°52' E	31°14' N	3607	36.00	24.00	6630.55
D	102°52' E	31°14' N	3620	18.00	19.62	4743.80
E	102°52' E	31°14' N	3634	255.60	221.48	13480.46
F	102°52' E	31°14' N	3634	108.00	92.52	79.46
G	102°52' E	31°14' N	3621	186.00	123.00	7064.98
H	102°52' E	31°13' N	3620	92.40	83.46	1775.51
I	102°52' E	31°13' N	3625	13.20	5.15	69.31
J	102°52' E	31°14' N	3658	66.00	33.90	20287.85
K	102°51' E	31°13' N	3667	68.40	40.56	3476.27
L	102°52' E	31°13' N	3667	16.80	5.21	56.05
M	102°52' E	31°14' N	3613	146.40	71.37	4360.67
N	102°52' E	31°13' N	3679	15.36	6.14	101.54
O	102°52' E	31°13' N	3692	84.00	37.80	15902.08
P	102°52' E	31°13' N	3685	174.00	191.40	15978.04
Q	102°52' E	31°13' N	3677	333.60	358.62	42526.96
R	102°52' E	31°13' N	3663	288.00	162.72	15716.30

2.3 数据处理与统计分析

用 SPSS 20.0 对已采样的 12 条溪流中非木质残体氮和磷贮量与溪流长度、面积和流量进行回归分析,建立回归方程 (式 (1) ~ (6)),并以此计算未采样的 6 条溪流中非木质残体氮和磷贮量。用 Origin Pro9.0 进行绘图并对氮、磷贮量与溪流长度、面积和流量进行拟合。显著性水平设为 $p=0.05$ 。数值以平均值 \pm 标准偏差 (mean \pm SD) 表示。

$$Y_1 = 0.297X_1 - 0.262X_2 - 0.951 \quad (R^2 = 0.536) \quad (1)$$

$$Y_2 = 0.107X_1 - 0.021X_2 + 2.964 \quad (R^2 = 0.420) \quad (2)$$

$$Y_3 = 0.215X_1 + 0.208X_2 - 614.787X_3 + 6.918 \quad (R^2 = 0.875) \quad (3)$$

$$Y_4 = 0.038X_1 - 0.030X_2 - 29.982X_3 - 0.084 \quad (R^2 = 0.722) \quad (4)$$

$$Y_5 = 0.068X_1 - 0.047X_2 - 100.288X_3 - 0.048 \quad (R^2 = 0.772) \quad (5)$$

$$Y_6 = -0.008X_1 + 0.088X_2 - 40.256X_3 + 1.266 \quad (R^2 = 0.890) \quad (6)$$

式中, Y_1 为树皮氮贮量(g), Y_2 为树叶氮贮量(g), Y_3 为 <1 cm 树枝氮贮量(g), Y_4 为树皮磷贮量(g), Y_5 为树叶磷贮量(g), Y_6 为 <1 cm 树枝磷贮量(g), X_1 为溪流长度(cm), X_2 为溪流面积(m^2), X_3 为溪流流量($m^3 \cdot s^{-1}$).

3 结果与分析(Results and discussion)

3.1 高山森林溪流非木质残体氮和磷总贮量

岷江上游高山森林溪流非木质残体氮在单位面积集水区的贮量为 $2684 \text{ mg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 单位面积溪流的贮量为 $774 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$, 其中, 树皮、树叶和 <1 cm 树枝中贮量分别为 112、154 和 $508 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$, 分别占总贮量的 14%、20% 和 66%; 磷在单位面积集水区的贮

量为 $468 \text{ mg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 单位面积溪流的贮量为 $135 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$, 其中, 树皮、树叶和 <1 cm 树枝中贮量分别为 15、31 和 $89 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$, 分别占总贮量的 11%、23% 和 66% (表 2). 这表明高山森林溪流非木质残体是陆地生态系统氮和磷输出的重要组成部分, 溪流中的氮、磷等养分元素可能对下游水体环境产生重要影响. 与该区域年均 $495 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$ 的土壤氮淋溶量(苟小林等, 2014)相比, 高山森林溪流中的非木质残体单位面积溪流的氮贮量 ($774 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$) 是单位面积土壤氮淋溶量的 1.56 倍 (表 2), 这充分表明该区域溪流中的非木质残体可能是氮和磷潜在的输入水生生态系统的重要途径.

表 2 岷江上游高山森林溪流非木质残体氮和磷贮量及其单位面积贮量

Table 2 Nitrogen and phosphorus storages of non-woody debris per unit area of stream and watershed in the 18 alpine streams in the upper reaches of the Minjiang River

元素	单位面积溪流贮量/($\text{mg} \cdot \text{m}^{-2}$)				单位面积集水区贮量/($\text{mg} \cdot \text{hm}^{-2}$)			
	树皮	树叶	<1 cm 树枝	总计	树皮	树叶	<1 cm 树枝	总计
氮	112	154	508	774	389	534	1761	2684
磷	15	31	89	135	53	107	308	468

3.2 不同溪流非木质残体氮贮量

岷江上游高山森林 18 条溪流中非木质残体氮

贮量特征如图 2 所示. 总体上, 与树皮和树叶相比, 在 15 条溪流中 <1 cm 树枝的氮贮量均最大且比例

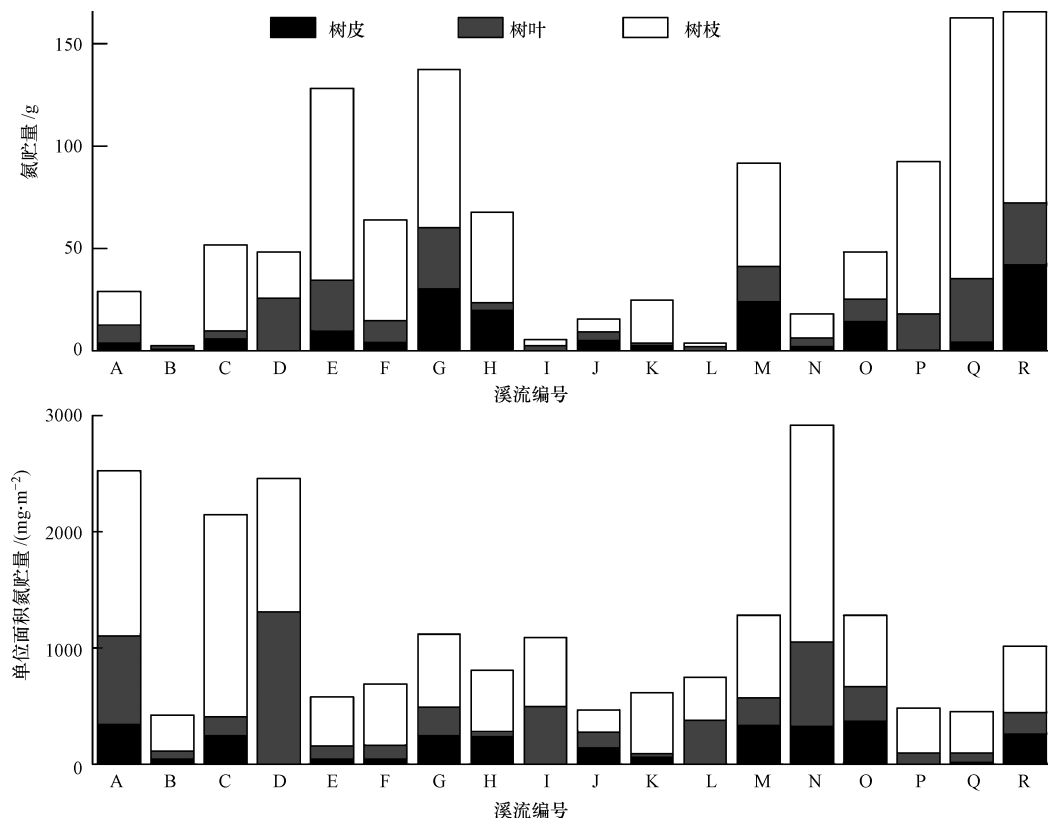


图 2 岷江上游高山森林 18 条溪流非木质残体氮贮量

Fig.2 Nitrogens storage of non-woody debris in the 18 alpine forest streams in the upper reaches of the Minjiang River

达 50% 以上,这说明 <1 cm 树枝对高山森林溪流非木质残体氮贮量贡献较大.一般地,树叶可能积累相对更多的氮(于帅等,2013);而本研究结果表明,树叶对溪流非木质残体氮贮量的贡献相对较少,这可能是由于树叶分解较快使得现存量减少.非木质残体氮贮量与溪流的长度 ($R^2 = 0.873$) 和面积 ($R^2 = 0.773$) 呈极显著 ($p < 0.001$) 线性关系,而与溪流流量呈非线性关系且随流量的增大先增加后降低 ($R^2 = 0.473$, $p = 0.0044$,图 3).在长度和面积越大

(如 E、G、P、Q 和 R)的溪流中,<1 cm 树枝单位面积溪流的氮贮量所占比例越高;反之(如 D、I、L 和 N),树叶单位面积溪流的氮贮量所占比例越高.这表明面积越大的溪流可能累积更多 <1 cm 树枝,而 <1 cm 树枝单位面积溪流的氮贮量占非木质残体总氮贮量的 66%,这意味着相对于较小的溪流,较大的溪流对森林生态系统氮流失及其下游水体质量的影响可能更大(Gomi *et al.*, 2004).

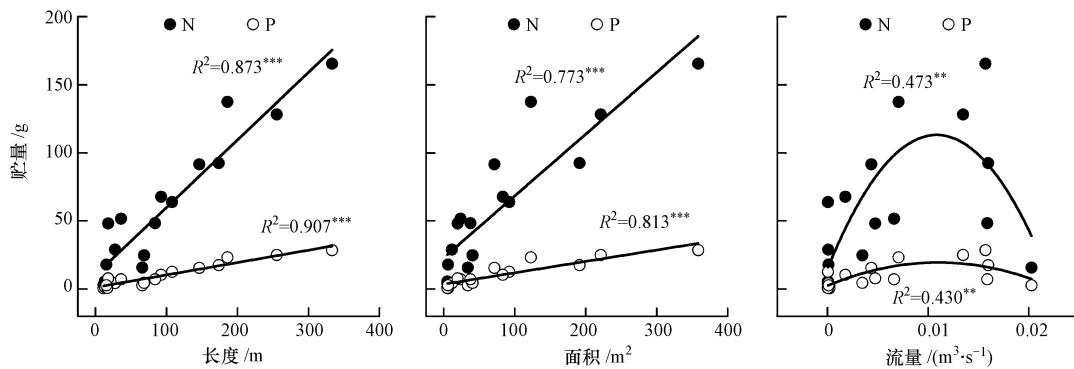


图 3 非木质残体氮、磷贮量与溪流长度、面积和流量的关系 (** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$)

Fig.3 Relationships between nitrogen and phosphorus storages of non-woody debris and the length, area and flow of streams

3.3 不同溪流非木质残体磷贮量

岷江上游高山森林 18 条溪流中总磷贮量与氮

贮量规律相似,13 条溪流中 <1 cm 树枝磷贮量均大于树皮和树叶(图 4).在已采样的 12 条溪流中,仅

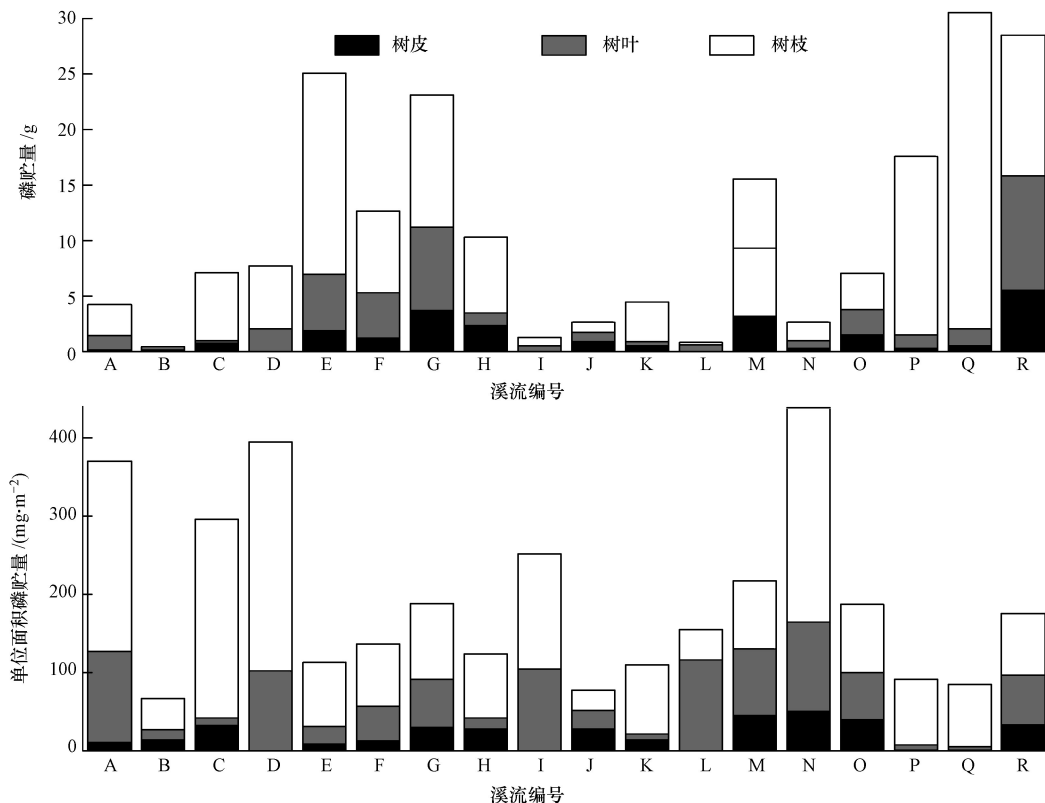


图 4 岷江上游高山森林 18 条溪流非木质残体磷贮量

Fig.4 Phosphorus storage of non-woody debris in the 18 alpine streams in the upper reaches of the Minjiang River

有 3 条溪流未采集到树皮残体,这可能是由于不同溪流河岸带优势树种及树龄的不同 (Kominoski *et al.*, 2011) 造成对溪流树皮输入的差异.另外,非木质残体磷贮量与溪流长度 ($R^2 = 0.907$) 和面积 ($R^2 = 0.813$) 呈极显著线性关系 ($p < 0.001$), 而随溪流流量的增大而先增加后降低 ($R^2 = 0.430$, $p = 0.0077$, 图 3). 这说明溪流长度越长、面积越大, 从河岸带输入的非木质残体越多, 其中的磷贮量也越大 (王绍强等, 2008); 同时, 当溪流流量达到一定值时, 大量的溪水将非木质残体带入下游, 使残存的非木质残体中磷贮量降低.

3.4 不同溪流非木质残体 N:P 比值

从图 5 可以看出, 18 条溪流的 N:P 比值介于 4.34~7.25, 均小于 16, 因此, N 可能是该区域森林溪流初级生产力的限制因子 (满秀玲等, 2006). 非木质残体 N:P 比值为 5.61, 且树叶 N:P 比值显著低于树皮和 <1 cm 树枝. 相对于 N, 植物体内 P 的存在形式不稳定, 易淋溶流失 (于帅等, 2013), 且由于溪流长度、面积和流量的不同导致河岸带输入的树皮、树叶和树枝不同; 同时, 不同的非木质残体 (树皮、树叶和树枝) 分解速率不一, 使得树皮、树叶和树枝各部分的 N:P 比例存在差异 (Gomi *et al.*, 2004).

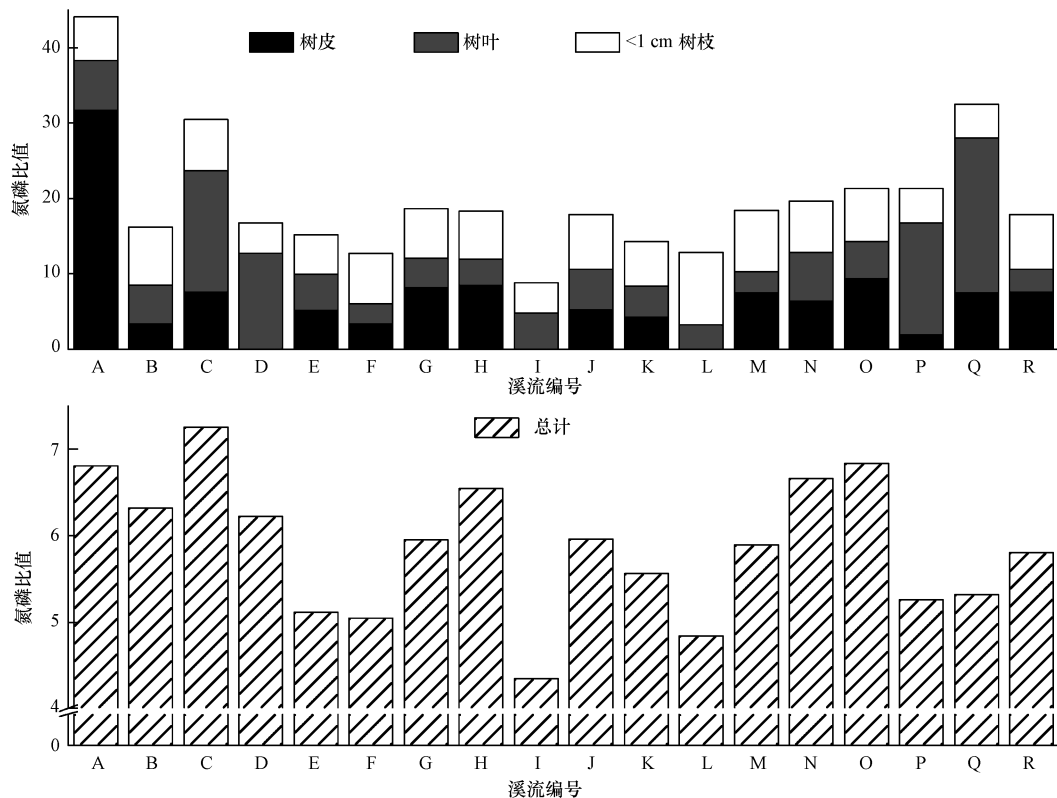


图 5 岷江上游高山森林 18 溪流非木质残体 N:P 比值

Fig. 5 Nitrogen to phosphorus ratios of non-woody debris in the 18 alpine forest streams in the upper reaches of the Minjiang River

4 结论 (Conclusions)

1) 岷江上游高山森林溪流中非木质残体单位面积集水区和单位面积溪流的氮贮量分别为 $2684 \text{ mg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $774 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$. 其中, <1 cm 树枝的氮贮量最多, 占总氮贮量的 66%, 树叶、树皮次之, 分别占总氮贮量的 20% 和 14%. 树皮、树叶和 <1 cm 树枝单位面积溪流的氮贮量分别为 112、154 和 $508 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$.

2) 岷江上游高山森林溪流中非木质残体单位面积集水区和单位面积溪流的磷贮量分别为 $468 \text{ mg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $135 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$. 其中, <1 cm 树枝的氮贮量最多, 占总氮贮量的 66%; 树叶、树皮次之, 分别占总氮贮量的 23% 和 11%. 树皮、树叶和 <1 cm 树枝单位面积溪流的磷贮量分别为 15、31 和 $89 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$.

3) 在长度大于 150 m、面积大于 120 m^2 和流量大于 $7000 \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 的较大溪流中, 非木质残体氮和磷贮量总体较大, 且树皮、树叶和 <1 cm 树枝的氮、磷

贮量占其总贮量的比例差异也更明显,其中, <1 cm 树枝氮、磷贮量所占比例最大。此外,在流量大于 $6000 \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 的溪流中,总N:P比值较大,且树叶N:P比值显著大于树皮和 <1 cm 树枝。

这些结果充分表明,高山森林氮和磷等养分元素可随溪流中非木质残体的输出而大量流失,且流失特征与溪流长度、面积和流量密切相关。尽管在雨季获得的调查结果可能在一定程度上过高地估计了氮和磷通过溪流非木质残体的输出,亟待进一步持续动态的研究,但这些结果为深入认识岷江上游森林-流域养分源/汇格局和高山森林生态系统氮、磷流失途径及其对下游生态系统的潜在影响提供了新的思路和一定的基础数据。

致谢:感谢四川农业大学生态林业研究所岳楷、王滨和彭艳在野外采样工作中给予的帮助。

责任作者简介:吴福忠,男,博士,教授,博士生导师,主要从事高山/亚高山森林物质循环及其对气候变化的响应,面源污染控制及其机理研究。已发表学术论文 100 余篇,SCI 收录 20 余篇,参编专著 3 本。

参考文献 (References):

- Ågren G I, Wetterstedt J Å M, Billberger M F K. 2012. Nutrient limitation on terrestrial plant growth - modeling the interaction between nitrogen and phosphorus [J]. *New Phytologist*, 194(4): 953-960
- Bruder A, Schindler M H, Moretti M S, *et al.* 2014. Litter decomposition in a temperate and a tropical stream: the effects of species mixing, litter quality and shredders [J]. *Freshwater Biology*, 59(3): 438-449
- Christensen D L, Herwing B R, Schindler D E, *et al.* 1996. Impacts of lakeshore residential development on coarse woody debris in north temperate lakes [J]. *Ecological Applications*, 6(4): 1143-1149
- Danger M, Cornut J, Chauvet E, *et al.* 2013. Benthic algae stimulate leaf litter decomposition in detritus-based headwater streams: a case of aquatic priming effect? [J]. *Ecology*, 94(7): 1604-1613
- 邓红兵,肖宝英,代力民,等. 2002. 溪流粗木质残体的生态学研究进展 [J]. *生态学报*, 22(1): 87-93
- Gomi T, Sidle R C, Swanston D N. 2004. Hydrogeomorphic linkages of sediment transport in headwater streams, Maybeso Experimental Forest, southeast Alaska [J]. *Hydrological Processes*, 18(4): 667-683
- 苟小林,吴福忠,杨万勤,等. 2014. 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 [J]. *环境科学学报*, 34(2): 439-448
- Green M B, Finlay J C. 2010. Patterns of hydrologic control over stream water total nitrogen to total phosphorus ratios [J]. *Biogeochemistry*, 99(1/3): 15-30
- Kominoski J S, Marczak L B, Richardson J S. 2011. Riparian forest composition affects stream litter decomposition despite similar microbial and invertebrate communities [J]. *Ecology*, 92(1): 151-159
- Lin L, Webster J R. 2014. Detritus decomposition and nutrient dynamics in a forested headwater stream [J]. *Ecological Modelling*, 293: 58-68
- 满秀玲,范金凤,谭晓京,等. 2006. 森林和沼泽对溪流水化学特征的影响 [J]. *应用生态学报*, 17(6): 992-996
- Ni X Y, Yang W Q, Li H, *et al.* 2014. The responses of early foliar litter humification to reduced snow cover during winter in an alpine forest [J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 94(4): 453-461
- Peterson B J, Wollheim W M, Mulholland P J, *et al.* 2001. Control of nitrogen export from watersheds by headwater streams [J]. *Science*, 292(5514): 86-90
- 秦嘉励,杨万勤,张健. 2009. 岷江上游典型生态系统水源涵养量及价值评估 [J]. *应用与环境生物学报*, 15(4): 453-458
- 谭波,吴福忠,杨万勤,等. 2011. 雪被去除对川西高山森林冬季土壤温度及碳、氮、磷动态的影响 [J]. *应用生态学报*, 22(10): 2553-2559
- 王绍强,于贵瑞. 2008. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征 [J]. *生态学报*, 28(8): 3937-3947
- Wu F Z, Yang W Q, Zhang J, *et al.* 2010. Litter decomposition in two subalpine forests during the freeze-thaw season [J]. *Acta Oecologica*, 36(1): 135-140
- 吴庆贵,吴福忠,杨万勤,等. 2013. 川西高山森林林隙特征及干扰状况 [J]. *应用与环境生物学报*, 19(6): 922-928
- 杨明生,熊邦喜,杨学芬,等. 2008. 武汉南湖沉积物中水生植物残体及其氮磷分布 [J]. *生态学报*, 28(4): 1508-1513
- Yang W Q, Wang K Y, Kellomäki S, *et al.* 2005. Litter dynamics of three subalpine forests in western Sichuan [J]. *Pedosphere*, 15(5): 653-659
- 于帅,陈玮,何兴元,等. 2013. 浑河入库河道缓冲带六种木本植物氮磷含量特征 [J]. *生态学杂志*, 32(12): 3131-3135
- 曾超,赵景峰,李旭娇. 2011. GIS 支持下岷江上游水文特征空间分析 [J]. *水土保持研究*, 18(3): 5-9
- Zhang M F, Wei X H, Sun P S, *et al.* 2012. 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]. *Journal of Hydrology*, 464-465: 1-11