

文章编号: 1008-2786-(2017)3-283-08

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000223

降雨季节川西高山森林溪流硫分布与输出特征

吴俊威¹ 杨万勤^{1,2*} 梁子逸¹ 杨帆¹ 张钰¹

(1. 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 成都 611130;

2. 高山森林生态系统定位研究站 成都 611130)

摘 要: 硫随森林溪流水体流动是生态系统硫源汇过程的重要内容,是认识森林-水体连续体中物质循环和能量流动的重要组成部分。为了了解森林溪流硫输出的潜在能力,以川西典型高山森林为研究对象,于 2015 年 7 月溪流径流量最大的降雨季节,在集水区 4.31 km² 的范围内,调查了所有 15 条溪流从源头到入河口的硫变化特征和输出特征。结果表明,调查区域中,所有溪流水体中总硫贮量为 598.57 g,单位溪流面积贮量为 0.78 g·m⁻²,溪流沉积物中总硫贮量为 176.18 kg,单位溪流面积沉积物硫贮量为 0.23 kg·m⁻²。单位集水区面积和单位溪流面积总硫输出量分别为 0.02 和 104.55 g·m⁻²·d⁻¹,集水区潜在最大年总硫输出量为 7.3 g·m⁻²·y⁻¹。溪流中硫含量的检出限在 0.12~2.46 μg·ml⁻¹ 之间,入河口硫含量占源头的比值在 0.40~4.82 之间,均值为 1.27。溪流入河口硫贮量占源头贮量的比值在 0.45~8.55 之间,所有森林溪流入河口硫贮量占源头贮量比值平均为 1.79。这意味着,森林溪流从源头到入河口的汇流过程中硫贮量在逐渐累积。这些结果为深入认识高山森林硫的迁移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: 源头溪流; 硫转移; 沉积物; 高山森林

中图分类号: S715-3

文献标志码: A

硫是蛋白质的重要组成元素,对生物体的生命活动具有重要意义^[1],其迁移过程是生态系统物质循环与能量流动的重要内容。目前,国内外相关研究更加关注人类活动导致的硫在陆地与大气间的迁移转换过程,更加关注以硫为主体的“酸雨”对人类生活的影响,而忽略了硫作为生物必需元素在生态系统中的转移^[2-4]。森林溪流作为联系森林生态系统和水生生态系统的重要纽带,水体流动和物质沉积过程往往伴随着森林系统中物质的转移和输出^[5-6]。已有的研究表明,硫可以通过大气沉降、基质风化和矿化、降水淋溶和生物有机体腐解等形式随着降水、地表径流和壤中流等进入森林溪流,并随着溪流水体的输出和沉积物的形成成为森林生态系

统硫输出和转移的重要过程^[7-8]。然而,森林溪流的水体环境特征以及从源头到溪流入河口的汇流过程可能显著影响硫的输出。一般地,流速较快且流量较大的溪流,硫的输出量可能更大,但水体和沉积物硫含量可能更小;水体面积较大的溪流中水体和沉积物中硫含量可能均比较大。同时,由于硫元素的生物吸收性,其在源头到入河口的汇集过程中可能受到溪流环境特征和生物特征的影响。可见,森林溪流硫的输出、迁移及其汇流特征并不明确,极大地限制了对森林生态系统硫循环与转移的认识。

川西高山森林地处青藏高原东缘和长江上游地区,是长江流域最重要的“水塔”,有“天然调节水库”之称,在水源涵养、指示全球气候变化、生物多

收稿日期(Received date): 2016-09-26; 改回日期(Accepted date): 2016-11-29。

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金项目(31270498; 31570445) [National Natural Science Foundation of China (31270498; 31570445)]

作者简介(Biography): 吴俊威(1992-),男,福建省福州市,硕士研究生,主要从事森林生态研究。[Wu Junwei(1992-), male, born in Fuzhou of Fujian, M. Sc. candidate, research on forest ecology.] E-mail: 2417288151@qq.com

* 通讯作者(Corresponding author): 杨万勤(1969-),男,博士,教授,主要从事森林生态、土壤生态、恢复生态等方面研究工作。[Yang Wanqin (1969-), male, Ph. D., professor, research on forest ecology, soil ecology and restoration ecology.] E-mail: scyangwq@163.com

样性保育等方面具有十分重要且不可替代的作用和地位^[9]。已有的研究表明,森林溪流是连接森林与河流的纽带,研究森林溪流中元素的分布与输出特征是理解森林与河流的生物地球化学循环联系的重要途径^[10-11]。但有关高山森林溪流中硫元素的含量、贮量与输出特征的研究尚未见报道。因此,本文以高山针叶林溪流河流为研究对象,调查了一个相对闭合集水区内 15 条森林溪流水体和沉积物中硫的输出和汇流特征,以期为高山森林硫迁移过程以及森林-流域间的生态联系提供一定科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于四川省米亚罗自然保护区四川农业大学理县高山森林生态系统定位研究站(31°14′~31°19′N, 102°53′~102°57′E, 海拔 2 458~4 619 m, 青藏高原东部,阿坝藏族羌族自治州东南缘,全县面积为 4 313.42 km²。东南与汶川相通,东北与茂县、黑水接壤,西南与小金相连,西北与马尔康、红原毗邻(见图 1)。因海拔高差悬殊,气候差异显著,具有山地立体型气候特征。该区域年降水量 850 mm,降雨主要分布在 6~9 月,年均气温 2℃~4℃,最高气温(7 月) 23℃,最低气温(1 月) -18℃。研究区域内优势乔木为岷江冷杉(*Abies faxoniana*)、方枝柏

(*Sabina saltuaria*)、红桦(*Betula albo-sinensis*)等,灌木为康定柳(*Salix paraples*)、高山杜鹃(*Rhododendron lapponicum*)、华西箭竹(*Fargesia nitida*)、三颗针(*Serberis sargentiana*)、红毛花楸(*Sorbus rufopilosa*)、扁刺蔷薇(*Rosa weginzowii*)等,草本植物主要有蟹甲草(*Cacalia* spp)、高山冷蕨(*Cystopteris montana*),以及藁草属(*Carex*)和莎草属(*Cyperus*)植物等。

1.2 研究方法

基于前期调查,依据采样可行性和典型性原则,于 2015 年 8 月降雨量最大的季节,根据地形地势,溪流的长度,植被类型等特点,在研究区域海拔 3 600~3 700 m 的典型高山森林相对闭合的集水区内采集溪流的水样和沉积物,样地集水区总面积为 4.3 km²,沿河流选取 15 条溪流测定所有溪流的长度、宽度、流量和所在位置,15 条溪流的基本特征如表 1 所示。

水样:共 45 个,分别在溪流的源头、中部、入河口随机采集 3 个样品,每个水样采集 500 ml,盛于清洁的塑料取样瓶中;沉积物共 45 个,分别在采集水样的地方采集 3 个沉积物样品,存于清洁的聚乙烯瓶中,并用聚乙烯塑料袋封装。研究区域内溪流的沉积物为冲泻质,因此采样时在活动性流水线上,选择河床底部或河道岸边与水面接触处采集从水体底部到砂砾层的样品^[12]。所有样品均低温保存,带回实验室尽快完成相关分析。

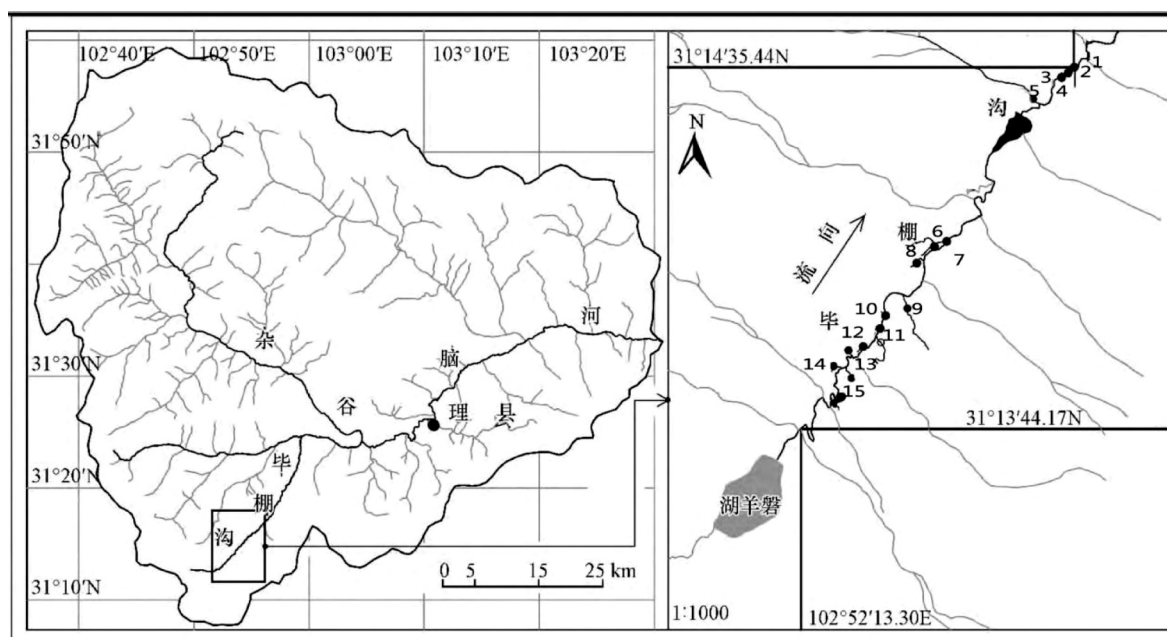


图 1 研究区及采样溪流的地理位置(1-15 是 15 条采样溪流)

Fig. 1 The location of the study area and the sampling stream (1-15 are the 15 sampling streams)

表 1 高山森林 15 条溪流基本特征
Tab. 1 The basic characteristic of 15 streams in the alpine forest

溪流编号	长度 m	宽度 m	水深 cm	沉积物深/cm	流速/ $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$	流量/ $\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
1	86	0.47	7.00	9.00	16.53	5476.55
2	32	0.53	12.67	10.33	75.78	50556.83
3	27.6	0.42	4.67	12.33	0.39	82.15
4	11.3	0.56	6.00	13.00	0.65	211.54
5	36	0.67	13.67	9.33	4.49	6630.55
6	225.6	0.98	6.00	10.67	22.93	13480.46
7	108	0.86	7.33	6.33	0.13	79.46
8	186	0.66	7.33	8.00	13.44	7064.98
9	62.3	0.75	9.67	2.67	5.41	189.57
10	20.8	0.76	7.67	4.33	0.28	278.69
11	37.6	0.58	5.67	11.00	117.04	5489.62
12	92.4	0.9	4.67	8.67	0.26	1775.51
13	13.2	0.42	6.67	5	0.48	69.31
14	66	0.51	3.33	3.67	16.61	20287.35
15	18	1.09	6.00	6.00	7.91	4743.8

水样处理按照水和废水监测分析方法^[13] ,采用铬酸钡间接原子吸收法 ,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样品中的铬元素含量。沉积物样品带回实验室后风干 ,然后将每个组分的各个样品研磨过 100 目筛 ,通过硝酸 – 高氯酸消解法 ,消煮过后 ,同样采用铬酸钡间接原子吸收法。硫含量的计算公式 $C(S) = X \cdot m(S) / m(Cr)$,其中 $C(S)$ 为样品中硫的浓度($\mu\text{g} \cdot \text{ml}^{-1}$) , X 为铬的浓度($\mu\text{g} \cdot \text{ml}^{-1}$) , $m(S)$ 为硫的物质质量(mol) , $m(Cr)$ 为铬的物质质量(mol) 。

1.3 数据处理与统计分析

每条溪流硫输出量 = 溪流入河口硫浓度 × 溪流流量^[10];

整个集水区硫的总输出量 = 每条溪流硫输出量之和;

单位面积集水区硫输出量 = 总输出量/集水区面积;

单位面积溪流硫输出量 = 总输出量/溪流总面积;

溪流体积 = 溪流长度 × 溪流宽度 × 水深;

溪流硫贮量 = 溪流硫含量 × 溪流体积;

沉积物硫贮量 = 沉积物硫含量 × 沉积物体积 × 沉积物容重^[14]。

溪流流量 = 水深 × 水面宽 × 流速

采用 Microsoft Office Excel 2007 和 IBM SPSS Statistics 22 软件对所有数据进行处理和统计分析 ,用 SigmaPlot 12.5 绘图。

2 结果与讨论

2.1 硫在森林溪流水体和沉积物中的储量

溪流水体中总硫贮量范围为 4.01 ~ 196.19 g (表 2) ,平均贮量为 39.91 g ,总贮量为 598.57 g ,单位水体面积贮量为 $0.78 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,森林溪流沉积物中总硫贮量范围为 1.49 – 39.38 kg(表 2) ,总贮量为 176.18 kg(表 2) ,平均贮量为 11.75 kg ,单位面积沉积物硫贮量为 $0.23 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ (表 2) ,符合李新华等对三江平原湿地调查所得的 $0.24 - 0.29 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,但小于曾从盛等(2010) 在闽江河口所得的 $0.45 - 1.02 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,这可能由于本项研究的高山森林和三江平原相比于闽江河口受人为干扰相对较小 ,溪流自净化能力强 ,而闽江河口湿地地处海陆过渡带 ,潮汐导致的富含硫的海水输入增加了湿地土壤中的硫含量^[14-15] 。溪流水体中硫贮量和沉积物硫贮量的在各溪流间的变化趋势基本相同。长度小于 30 m 的溪流 ,其水体和沉积物的总硫贮量均很低 ,且变化不明显。长度在 30 m 以上的溪流中 ,不论是沉积物的硫贮量还是水体中的硫贮量均明显大

于其他的溪流,且随着溪流长度的增加,溪流硫贮量越大,这主要与较长溪流接受更多的物质来源有关^[15-16]。意味着长度较长的溪流具有较为复杂的内部环境形成相对稳定的生境。

高山森林溪流水体中硫含量无明显变化趋势,含量在 $3.5 - 15.3 \text{ ug} \cdot \text{ml}^{-1}$,高于 Mayer 等在施卢赫(Schluchsee)和菲林根(Villingen)所得出的结果 $0.57 - 3.24 \text{ ug} \cdot \text{ml}^{-1}$,也大于 Åström 等(1997)在 Petalax 流域所得的 $3.50 \text{ ug} \cdot \text{ml}^{-1}$ 和 Hesslein 等在加拿大安大略(Ontario)西北部地区所得的 $6.24 - 11.66 \text{ ug} \cdot \text{ml}^{-1}$ ^[16-18]。这可能是由于采样时期是研究区域的雨季,降水在流经地表或淋洗植物和土壤的过程中增加了溪流水体中硫的含量^[7,19];溪流沉积物硫含量为 $968.88 - 3130.50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,大于 Dail 等在美国奥托(Otto)得出的年平均量 $168 - 190 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[20],这可能由于采样时期为夏季,溪流中微生物活性增强,分解释放的沉积物有机物中的硫含量高^[21],导致溪沉积物中硫含量相对较高。同时,较长的溪流沉积物中硫含量远小于其他溪流的硫含量,这主要与溪流的流速密切相关。

2.2 硫在森林溪流中的汇流特征

15 条森林溪流硫贮量和含量从源头到入河口的变化规律并不一致(图 2 和图 3)。编号为 3、5、

11、13、14 的溪流沉积物硫贮量从源头到入河口贮量逐渐降低,其余溪流沉积物硫贮量从源头到入河口逐渐增大;编号为 5、6、7、8、9、13、14 的溪流水体硫贮量从源头到入河口贮量逐渐降低,其余溪流水体硫贮量从源头到入河口逐渐增大。其中水体和沉积物硫贮量从源头到入河口贮量都降低的溪流(溪流编号 5、13、14)均为长度较短的溪流,这可能由于长度较长的溪流中有大量的凋落物、腐殖质和木质残体等对溪流中硫有贡献的因素更加复杂,进而使得硫贮量增加^[15,22-23]。此外,所有调查的森林溪流入河口硫贮量占源头贮量比值在 $0.46 - 8.33$ 范围内(表 2),平均为 1.79,这意味着森林溪流在源头到入河口的汇流过程中硫贮量在逐渐累积。此外,编号为 1、2、4、9、11、13、14、15 的溪流沉积物硫含量从源头到入河口贮量逐渐降低,其余溪流沉积物硫含量从源头到入河口逐渐增大;编号为 5、6、7、8、9、13、14 的溪流水体硫含量从源头到入河口贮量逐渐降低,其余溪流水体硫含量从源头到入河口逐渐增大。其中水体和沉积物硫含量从源头到入河口含量都增加的溪流(溪流编号 3、10、12)均为流速较慢的溪流,这可能由于溪流流速慢水动力条件弱,沉积物处于缺氧的还原条件,硫氧化细菌(sulfur oxidizing bacteria, SOB)活性低,使得有机质得以保存,

表 2 高山森林 15 条溪流的总硫贮量

Tab. 2 The storages of total sulfur in the studied 15 alpine forest streams

溪流编号	溪流水体总硫贮量 /g	沉积物总硫贮量 /kg	源头总硫贮量 /kg	入河口总硫贮量 /kg	输出量 /mg · S ⁻¹
1	26.59	9.76	4.03	5.21	57.89
2	7.41	2.31	2.15	3.95	286.66
3	6.54	1.66	0.57	0.26	1.24
4	5.819.58	1.50	0.27	0.61	3.34
5	44.23	9.85	7.24	3.41	81.69
6	196.19	39.38	7.09	11.76	118.90
7	89.84	38.71	1.53	12.73	0.59
8	106.82	22.04	3.43	6.48	69.73
9	28.63	17.80	5.16	5.51	1.27
10	13.80	4.55	0.53	1.48	4.50
11	15.37	7.14	1.76	1.15	98.32
12	27.54	11.54	2.53	3.31	20.01
13	4.01	1.74	0.57	0.45	0.42
14	11.66	4.53	2.38	2.23	115.03
15	14.08	3.67	1.00	1.18	63.42

进而使得总硫含量增大^[24-25]。同时,所有调查的森林溪流入河口硫含量占源头含量比值的均值为 1.27,这意味着森林溪流在源头到入河口的汇流过程中硫含量在逐渐累积。因为溪流中的营养元素会随着溪水逐渐富集,并且从源头到入河口过程中,输入溪流的物质(如凋落物等)也逐渐增加这也是导致硫含量累积的重要因素。此外,水体和沉积物中硫贮量和含量从源头到入河口均逐渐降低的溪流(溪流编号 13、14)由于其长度较短,受外界干扰几率更小,显示出较强的自净化能力^[26-27]。因此,保护长度较短的森林溪流可能是生态系统控制硫输出的重要途径。

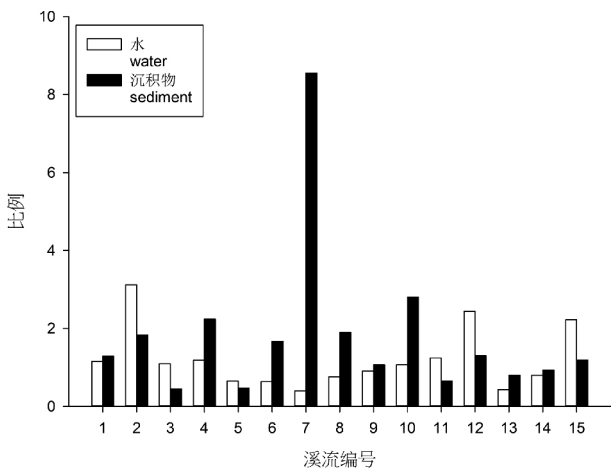


图2 高山森林水样和沉积物溪流入河口硫贮量占源头的比例
Fig.2 The ratios of total sulfur storage in stream waters from the end to the source in the alpine forest streams

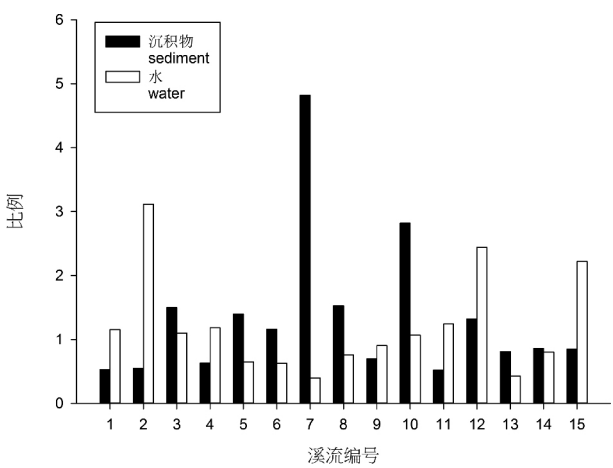


图3 高山森林溪流水样和沉积物入河口硫含量占源头的比例
Fig.3 The ratio of total sulfur concentrations in stream sediments from the end to the source in the alpine forest streams

2.3 硫的迁移与溪流特征的关系

溪流硫输出量从 417.25 – 28 6657.23 $\text{ug} \cdot \text{s}^{-1}$ 不等,这与 Mayer 等在施卢赫(Schluhsee) 和菲林根(Villingen) 所得出的结果 387.50 – 28 692.8 $\text{ug} \cdot \text{s}^{-1}$ 相似^[17]。15 条溪流总的硫的输出量为 104.55 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,由调查区域面积求得单位集水区面积总硫输出量为 0.02 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ (表 2)。根据本次调查的森林溪流硫的输出量,估计调查区域集水区最大年总硫输出量为 7.3 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{y}^{-1}$,与 1972 – 1978 年克里斯托弗森(Christophersen) 等在挪威比尔肯内斯(Birkenes) 森林所得的总硫年输出量 5.46 $\cdot 10^{-3} - 1.18 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{y}^{-1}$ 基本一致,但大于 1984 ~ 1993 年爱德华兹(Edwards) 等在西弗吉尼亚州(West Virginia) 所得出的 1.78 $\cdot 10^{-3} - 4.09 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{y}^{-1}$ ^[28-29]。这主要因为此次采样是在研究区域的雨季,溪流流量较大,硫随着地表径流、树干茎流、穿透水等方式汇入溪流中^[5,19],增加了水中的硫含量,使硫的总输出量可能被高估。经相关分析得出,本项研究的溪流中硫的输出量主要与溪流长短和流速差有关,其中与流速和流量呈显著正相关,相关系数分别为 0.921 和 0.979,这说明面积大,流量大的溪流输出量高;输出量小的溪流一般都是长度在 30m 以下的短溪流。溪流水中总硫的贮量和溪流的长度与宽度呈正相关,相关系数达到 0.863 和 0.636;溪流沉积物中总硫的贮量和溪流的长度和宽度呈正相关,相关系数分别为 0.879 和 0.599。除此之外,溪流水中的总硫贮量和沉积物中的总硫贮量呈显著正相关,相关系数达到 0.946 (表 3)。

表 3 溪流 S 贮量和输出量与溪流特征的相关系数

Tab.3 The correlation analysis of sulfur storage and output characteristics of streams

溪流特征	溪流水体中硫贮量	溪流硫输出量	沉积物硫贮量
长度	0.836 **	0.321	0.879 **
宽度	0.636 *	0.150	0.599 *
水深	0.405	-0.004	0.387
沉积物深	0.487	-1.930	0.450
流速	0.071	.921 **	0.018
流量	0.279	.979 **	0.196

注: * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$; $n = 15$ 。

3 结论

(1) 研究区域内溪流水中总硫贮量为 598.57

g,单位溪流面积总硫输出量为 $104.55 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,单位水体面积贮量为 $0.78 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,单位集水区面积总硫输出量为 $0.02 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,由8月硫的输出量,估计调查区域集水区年总硫输出量为 $7.3 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{y}^{-1}$ 。溪流沉积物中总硫贮量为 176.18 kg ,单位面积沉积物硫贮量为 $0.23 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

(2) 溪流从源头到入河口硫含量变化不一致,其中水体和沉积物硫含量从源头到入河口含量都增加的溪流均为流速较慢的溪流。所有调查的森林溪流入河口硫含量占源头含量比值的平均值为1.27,这意味着森林溪流在源头到入河口的汇流过程中硫含量在逐渐累积。

(3) 溪流从源头到入河口硫贮量变化不一致,其中水体和沉积物硫贮量从源头到入河口贮量都降低的溪流均为长度较短的溪流,所有调查的森林溪流入河口硫贮量占源头贮量比值在0.49–8.33范围内,平均为1.79,这意味着森林溪流在源头到入河口的汇流过程中硫贮量在逐渐累积。

这些结果充分表明,高山森林溪流硫元素随溪流输出而大量流失,而流失特征与溪流长度、宽度和流量密切相关,说明溪流的硫输出不仅是高山森林生态系统硫损失的重要形式,而且可通过累积效应对下游水体及河岸生态系统产生重要影响。同时,因为降雨量较大的季节通过水体流动硫流失相对较大,这可以一定程度上认识该区域的潜在流失量,也为深入认识高山针叶林流域硫的输出、汇流格局和高山森林生态系统硫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

感谢四川农业大学林学院生态林业研究所吴福忠教授在论文撰写过程中给予的意见与帮助,特此鸣谢!

参考文献(References)

- [1] 裴男才,陈步峰,邹志谨,等. 珠江三角洲不同污染梯度下森林优势种叶片和枝条S含量比较[J]. 生态学报,2013,33(19): 6114–6120 [PEI Nancai, CHEN Bufeng, ZHOU Zhijin, et al. Sulfur contents in leaves and branches of dominant species among the three forest types in the Pearl River Delta [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(19): 6114–6120]
- [2] PELLERIN B A, SARACENO J F, SHANLEY J B, et al. Taking the pulse of snowmelt: in situ sensors reveal seasonal, event and diurnal patterns of nitrate and dissolved organic matter variability in an upland forest stream [J]. Biogeochemistry, 2012, 108(1–3): 183–198.
- [3] 满秀玲,范金凤,谭晓京,等. 森林和沼泽对溪流水化学特征的影响[J]. 应用生态学报,2006,17(6): 992–996 [MAN Xiulin, FANG Jinfeng, TANG Xiaojin, et al. Effects of forest and swamp on hydrochemical characteristics of streams [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17(6): 992–996.]
- [4] 徐光仪,康荣华,罗遥,等. 我国东北地区地表水酸化现状[J]. 环境科学,2013,34(5): 1695–1699 [XU Guangyi, KANG Ronghua, LOU Yao, et al. Current status of surface water acidification in northeast china [J]. Environmental Science, 2013, 34(5): 1695–1699]
- [5] 曹丽花,石盛莉,潘根兴. 不同植被下森林地表系统水相硫的分布与迁移[J]. 地球与环境,2015,43(1): 8–13 [CAO Lihua, SHI Shengli, PAN Genxing. Distribution and transport of sulfur in the surface water system of forest ecosystem with different vegetative covers [J]. Earth and Environment 2015, 43(1): 8–13]
- [6] 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(04): 242–246 [WANG Yunqi, WANG Yujie. Evolution of study on the forest stream water quality [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2003, 10(04): 242–246]
- [7] TEJNECKÝV, BRADOVÁM, BORŮVKA L, et al. Profile distribution and temporal changes of sulphate and nitrate contents and related soil properties under beech and spruce forests [J]. Science of the Total Environment 2013, 442: 165–171.
- [8] 郝庆菊,王起超,王跃思. 三江平原典型湿地土壤中硫的分布特征[J]. 土壤通报,2004,35(3): 331–335 [HAO Qingju, WANG Qichao, WANG Yuesi. The distributing of sulfur in typical wetland soils in the Sanjiang Plain [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2004, 35(3): 331–335]
- [9] 李晗,吴福忠,杨万勤,等. 亚高山森林林窗对凋落物分解过程中半纤维素动态的影响[J]. 植物生态学报,2015,39(03): 229–238 [LI Hang, WU Fuzhong, YANG Wangqin, et al. Effects of forest gap on hemicellulose dynamics during foliar litter decomposition in an subalpine pine [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2015, 39(03): 229–238]
- [10] 李俊,吴福忠,杨万勤,等. 长江上游高山森林小溪流磷输出及其汇流特征[J]. 环境科学学报,2015,35(04): 1136–1142 [LI Jun, WU Fuzhong, YANG Wangqin, et al. Phosphorus output and confluence in the alpine forest streams of the upper reach of Yangtze River [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, 35(4): 1136–1142]
- [11] 廖姝,杨万勤,吴福忠,等. 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,2015,35(06): 1907–1913 [LIAO Zhu, YANG Wangqin, WU Fuzhong, et al. Storage of nitrogen and phosphorus in non-woody debris in alpine forest streams in the upper reaches [J]. Acta Scientiae Circumstantiae 2015, 35(6): 1907–1913]
- [12] ALLAN J. D., CASTILLO M. M. Stream ecology [M]. Second Edition. Springer, 2007, 44
- [13] 国家环保局. 水和废水监测分析方法 [M]. 中国环境科学出版

- 社,2002,165-166 [National Environmental Protection Agency. Water And Wastewater Monitoring Analysis Methods [M]. China Environmental Science Press,2002,165-166]
- [14] 曾从盛,王维奇,翟继红. 闽江河口不同淹水频率下湿地土壤全硫和有效硫分布特征 [J]. 水土保持学报,2010,24(06): 246-250 [ZENG Congsheng, WANG Weiqi, ZHAI Jihong. Characteristics of wetland soil total sulfur and available sulfur distribution in different water-flooded frequency in Min Jiang River Estuary [J]. Journal of Soil and Water Conservation,2010,24(6): 246-250]
- [15] 李新华,刘景双,孙志高,等. 三江平原小叶章湿地生态系统硫的生物地球化学循环 [J]. 生态学报,2007,27(06): 2199-2207 [LI Xinhua, LIU Jingshuang, SUN Zhigao, et al. The Biogeochemical cycle of sulfur in Calamagrostis nuttalliana wetland ecosystem in the sanjiang Plain [J]. Acta Ecologica Sinica,2007,27(6): 2199-2207]
- [16] HESSLEIN R H, CAPEL M J, FOX D E. Sulfur isotopes in sulfate in the inputs and outputs of a Canadian Shield watershed [J]. Biogeochemistry,1988,5(3): 263-273
- [17] MAYER B, FEGER K H, GIESEMANN A, et al. Interpretation of sulfur cycling in two catchments in the Black Forest (Germany) using stable sulfur and oxygen isotope data [J]. Biogeochemistry,1995,30(1): 31-58
- [18] ÅSTRÖM M, ÅSTRÖM J. Geochemistry of stream water in a catchment in Finland affected by sulphidic fine sediments [J]. Applied Geochemistry,1997,12(5): 593-605
- [19] TIAN W, WANG L, LI D, et al. Leachability of phenanthrene from soil under acid rain and its relationship with dissolved organic matter [J]. Environmental Earth Sciences,2015,73(7): 3675-3681
- [20] DAIL D B, FITZGERALD J W. S. Cycling in soil and stream sediment: influence of season and in situ concentrations of carbon, nitrogen and sulfur [J]. Soil Biology and Biochemistry,1999,31(10): 1395-1404.
- [21] KERR J G, EIMERS M C, CREED I F, et al. The effect of seasonal drying on sulphate dynamics in streams across southeastern Canada and the northeastern USA [J]. Biogeochemistry,2012,111(1-3): 393-409
- [22] 刘岚昕. 浅谈溪流倒木及其对河流生态健康的影响 [J]. 安徽农业科学,2012,40(24): 12166-12167 [LIU Lanxin. Discussion on the influence of large woody debris on the river ecosystem health [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences,2012,40(24): 12166-12167]
- [23] NOGARO G, DATRY T, MERMILLOD BLONDIN F, et al. Influence of streambed sediment clogging on microbial processes in the hyporheic zone [J]. Freshwater Biology,2010,55(6): 1288-1302
- [24] 孙丽娟,段德超,彭程,等. 硫对土壤重金属形态转化及植物有效性的影响研究进展 [J]. 应用生态学报,2014,25(07): 2141-2148 [SUN Lijuan, DUAN Dechao, PENG Cheng, et al. Influence of sulfur on the speciation transformation and phyto-availability of heavy metals in soil [J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2014,25(07): 2141-2148]
- [25] 付小东,邱楠生,秦建中,等. 四川盆地龙潭组烃源岩全硫含量特征及其对沉积环境的响应 [J]. 石油与天然气地质,2014,35(3): 342-349 [FU Xiaodong, QIU Nansheng, QIN Jianzhong, et al. Total sulfur distribution of source rock of the Upper Permian Longtan Formation and its response to sedimentary environment in Sichuan Basin [J]. OIL & GAS Geology,2014,35(3): 342-349]
- [26] GRIEBLER C, LUEDERS T. Microbial biodiversity in groundwater ecosystems [J]. Freshwater Biology,2009,54(4): 649-677
- [27] CLAPCOTT J E, BARMUTA L A. Metabolic patch dynamics in small headwater streams: exploring spatial and temporal variability in benthic processes [J]. Freshwater Biology,2010,55(4): 806-824
- [28] Edwards P J, Gregory J D, Allen H L. Seasonal sulfate deposition and export patterns for a small Appalachian watershed [J]. Water, Air, and Soil Pollution,1999,110(1-2): 137-155
- [29] CHRISTOPHERSEN N, Wright R F. Sulfate budget and a model for sulfate concentrations in stream water at Birkenes, a small forested catchment in southernmost Norway [J]. Water Resources Research,1981,17(2): 377-389

Sulfur Distribution and Output Characteristics in Alpine Forest Headwater Streams in Western Sichuan at Rainfall Season

WU Junwei¹, YANG Wanqin^{1 2*}, LIANG Ziyi¹, YANG Fan¹, ZHANG Yu¹

(1. Sichuan Agricultural University Institute of Forestry & Ecology, Sichuan Province Key Laboratory of

Ecological Forestry Engineering, Chengdu 611130, China;

2. Research Station of Alpine Forest Ecosystem, Chengdu 611130, China)

Abstract: Forest stream is the bond of bioelement biogeochemical cycles which links mountain forest and butted river. However, far less information has been available on sulfur distribution and output characteristics in the water flow of alpine forest headwater streams. In order to know the potential of sulfur output in the alpine forest streams, this study was conducted in a typical alpine forest catchment in the eastern Qinghai Tibet Plateau in July 2015. The concentrations of sulfur in water flow and sediment were investigated from the source to the end in 15 streams in the 4.31 km² catchment. The stream water stored a total of 598.57 g sulfur in the catchment, and averaged 0.78 g · m⁻². Meanwhile, the stream sediment in the catchment stored 176.18 kg sulfur, and converted into 0.23 kg · m⁻² sulfur. The maximum potential of total sulfur output was estimated at 7.3 g · m⁻² · y⁻¹ in the catchment, while the total sulfur output in the alpine forest catchment and stream was 0.02 g · m⁻² · d⁻¹, and 104.55 g · m⁻² · d⁻¹, respectively. Total sulfur concentration in stream water varied from 0.12 to 2.46 ug · ml⁻¹ depending on sampling locations in the streams. The average ratio of the sulfur concentration ratio of stream end to source was 1.79, and ranged from 0.40 to 4.82. Similarly, the ratios of sulfur storage in the stream end to source varied from 0.45 to 8.55, with an average ratio of 1.79. The results suggested that total sulfur storage in the streams obviously increased with the increase of length and width of streams, which provided a new idea in understanding sulfur transferring ways in the alpine forests and its potential impact on downstream ecosystems.

Key words: headwater stream; sulfur transfer; sediment; alpine forest