

苔藓新老组织及其根际土壤的碳氮元素含量和同位素组成 ($\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$) 对比

刘学炎^{1,2} 肖化云^{1*} 刘丛强¹ 李友谊^{1,2}

(1 中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002) (2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 对细叶小羽藓 (*Haplocladium microphyllum*) 新老组织及其根际土壤的碳氮含量和同位素组成进行了分析, 探讨了苔藓衰老过程控制元素和同位素变化的机制以及苔藓对土壤的贡献。同种组织碳氮含量之间的相关性反映了苔藓固碳能力和氮需求的相互联系。新生组织碳氮含量明显高于衰老组织且存在相关性, 反映了苔藓衰老过程中体内碳氮物质向新生组织迁移的生理特征。两种组织之间同位素组成 ($\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$) 没有明显差异, 说明组织间的物质迁移没有产生明显的同位素分馏, 其原因可能在于细叶小羽藓形态结构简单, 体内物质迁移对碳氮同位素组成的影响较小。相反, 苔藓组织与根际土壤之间的有机碳/氮信息没有相关性, 这可能与苔藓植物长期滞留营养物质、缓慢的分解和成土速度有关, 反映了该研究区苔藓层对土壤碳氮累积的贡献较小。

关键词 稳定同位素 苔藓 衰老 分解 根际土壤

CONTENTS AND ISOTOPIC COMPOSITION OF C AND N IN MOSS (*HAPLOCLADIUM MICROPHYLLUM*) TISSUES AND SOIL RHIZOSPHERE

LIU Xue-Yan^{1,2}, XIAO Hua-Yun^{1*}, LIU Cong-Qiang¹, and LI You-Yi^{1,2}

¹State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China, and

²Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Aims We investigated the new and senescent tissues of moss and the soil rhizosphere to determine 1) the elemental and isotopic composition characteristics during senescence and 2) the final contribution to soil.

Methods C and N contents and isotopic composition ($\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$) of *Haplocladium microphyllum* and its soil rhizosphere were analyzed at Guiyang, China.

Important findings The C and N contents were higher in new growing tissues than in senescent tissues, and there were significant correlations between the two types of tissues, indicating physiological malfunction (e.g., loss of photosynthesis) and internal element redistribution during moss senescence. No significant difference was found between new and senescent tissues in isotopic composition, but their $\delta^{13}\text{C}$ values or $\delta^{15}\text{N}$ values were correlated, suggesting special isotopic regulation in the simple and nonvascular structure of mosses. In contrast, there was no C or N correlation between the moss tissues and soil. This was attributed to long-term nutrient retention and slow deposition to form soil, indicating the moss layer in this area has a small contribution to soil carbon and nitrogen.

Key words stable isotope, moss, senescence, decomposition, rhizosphere

苔藓植物特殊的形态结构和生理生态适应能力,使其成为对环境反应最敏感的地面植物以及生态系统演变最关键的拓荒者之一,并具有很高的科研价值。理解苔藓植物对元素的吸收、存储与周转等变化对于阐明生态系统物质走向和过程、苔藓植物在全球变化中的作用、利用苔藓植物监测大气环

境污染等均具有重要的意义(吴虹玥等,2005)。我国苔藓植物资源丰富,在分类学和生态学上进行了大量的工作(吴鹏程,1998),环境方面的研究集中在污染区苔藓体内重金属和有机污染物的累积以及城市大气污染的指示,但在苔藓参与生物地球化学循环方面的研究较少,尤其是碳、氮稳定同位素在苔藓

收稿日期: 2007-01-10 接受日期: 2007-03-17

基金项目: 国家自然科学基金(40573006)

感谢河北师范大学生命科学院李琳博士对野外工作和样品鉴定方面的指导

* 通讯作者 Author for correspondence E-mail: xiaohuayun@vip.skleg.cn

地球化学方面的应用才刚刚开始(刘学炎等,2007)。

20年来,稳定同位素技术在植物生态学研究逐步深入,主要因为稳定同位素在其形成过程中能可靠记录物源信息和植物所处环境的变化,反映植物自身对生长环境的响应及其在吸收物源过程中的生理生态机制(Dawson *et al.*,2002)。碳同位素能够响应环境因子的变化,反映有机质来源;而氮同位素是生态系统氮素走向以及氮生物地球化学循环的良好示踪工具(Handley *et al.*,1999)。

已有的研究表明,维管植物不同年龄组织之间的元素含量和碳氮稳定同位素组成都有不同程度的差异(Simard *et al.*,1997;Robinson *et al.*,1998;Evans,2001),但对非维管植物的特征还不清楚。本研究选择同种苔藓(细叶小羽藓(*Haplocladium microphyllum*))并尽可能消除其它环境因素干扰,探讨苔藓植物不同年龄组织碳氮含量和同位素组成($\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$)是否也存在和维管植物一样的变化及其控制机制。此外,很早的研究就表明大气而非土壤基质是苔藓植物养分的来源,其主要原因是苔藓具有快速和大量吸收大气营养物质的能力。据此,本研究的目的还在于应用稳定同位素建立苔藓对根际土壤碳氮累积的贡献关系,理解苔藓吸收大气物质进而输入土壤的程度和速度,为下一步研究喀斯特石漠化地区植被-土壤系统的生物过程打下基础。

1 样品处理与分析

1.1 样品采集和处理

于2005年8月在贵阳市一人工林地(26°34' N, 106°43' E; 海拔约1071 m)采集了同种苔藓(细叶小羽藓)。研究区的选择主要因为苔藓着生之前下方为人工搬运的土壤,能确定在5年内苔藓开始自然生长发育,没有受到人为活动干扰(如铲除等);所选采样点苔藓呈垫丛状,没有其它任何植物混生;所有采样点集中在约0.2 m²的范围,具有相同的大气氮沉降水平;上方开阔不受树冠遮挡、地表水的冲刷和城市动物等影响。选择细叶小羽藓主要是该种属于研究区内苔藓的优势种之一,能保证样品分析的需求;此外,该种为规则羽状分支结构,交织匍匐状丛生,能很好地累积大气物质,生长速度快,曾被作为大气物质和城市环境的良好指示工具(安丽等,2006)。土壤样品为苔藓正下方附着的根际土壤(<2 cm)。

所有样品用干净塑料自封袋保存,苔藓样品先用稀盐酸淋洗,然后用去离子水(Milli-Q)反复冲洗

以彻底去除表面吸附的尘土和颗粒物。在70℃真空干燥箱中烘干后用液氮冷冻研磨均匀,并重新干燥用于碳、氮元素和同位素分析。土壤样品风干后研磨均匀,先后经过2 mol·L⁻¹的HCl和2 mol·L⁻¹的KCl溶液处理后重新烘干磨细。

1.2 碳氮元素分析和同位素测定

碳氮含量采用元素分析仪(型号为PE2400 II, USA)测定,测量误差为±0.1%。碳同位素分析采用石英管(样品+CuO丝)真空封装燃烧后经液氮纯化的方法。氮同位素先称取足量样品、2~3 g CuO丝和1~2 g线状Cu丝于石英管中,抽高真空然后焊封,于850℃下燃烧后在真空系统上纯化,然后上质谱(Finigan MAT 252)测定。碳氮同位素测定数据分别采用IAEA-C₃(纤维素, $\delta^{13}\text{C} = -24.91\text{‰}$)标准和日本硝酸钾(MOR2386-01, $\delta^{15}\text{N} = 1.9\text{‰}$)标准校正,碳同位素和氮同位素测定误差分别为±0.1‰($n = 5$)和±0.2‰($n = 5$)。

$\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 比值定义为:

$$\delta^{13}\text{C} [\text{‰ versus V-PDB}] = (R_{\text{样品}}/R_{\text{标准}} - 1) \cdot 1000$$

$$\delta^{15}\text{N} [\text{‰ versus at-air}] = (R_{\text{样品}}/R_{\text{标准}} - 1) \cdot 1000$$

其中, R 为 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 或 $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ 自然丰度比。所有分析测定在中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室完成。

2 实验结果

新生组织碳含量($41.6\% \pm 0.6\%$)和氮含量($2.28\% \pm 0.06\%$)均比衰老组织碳含量($39.8\% \pm 1.4\%$)和氮含量($1.85\% \pm 0.12\%$)高,其中样品T4两种组织碳含量和氮含量相差分别高达3.7%和0.51%,而碳氮含量相差的最小值(分别为0.7%和0.31%)也出现在同一样品(T5)(表1)。同种组织的碳含量和氮含量之间具有很好的相关性(图1),新老组织之间的碳含量和氮含量也具有很好的相关性(图2)。

苔藓碳同位素变化范围为 $-31.4\text{‰} \sim -29.0\text{‰}$,新老组织之间的碳同位素组成分别为($-30.2\text{‰} \pm 1.1\text{‰}$)和($-30.1\text{‰} \pm 0.9\text{‰}$)(表2)。苔藓氮同位素变化范围为 $-9.4\text{‰} \sim -5.0\text{‰}$,新老组织之间氮同位素组成总体上没有明显差异(分别为($-6.5\text{‰} \pm 1.1\text{‰}$)和($-6.8\text{‰} \pm 1.5\text{‰}$))。苔藓组织和根际土壤之间碳、氮含量和同位素组成不存在相关性。

表 1 苔藓新老组织及其根际土壤碳氮含量分析结果
Table 1 Carbon and nitrogen content of *Haplocladium microphyllum* tissues and its rooting soil

样品 Sample No.	碳含量 Carbon content (%)			氮含量 Nitrogen content (%)		
	新生组织 New tissue	衰老组织 Senescent tissue	根际土壤 Rhizosphere soil	新生组织 New tissue	衰老组织 Senescent tissue	根际土壤 Soil rhizosphere
T1	41.4	39.2	5.8	2.25	1.79	0.36
T2	42.0	40.1	4.9	2.31	1.91	0.31
T3	40.5	38.8	6.6	2.2	1.74	0.46
T4	41.7	38.0	6.6	2.24	1.73	0.34
T5	42.3	41.6	6.0	2.35	2.04	0.36
T6	41.9	40.9	5.6	2.33	1.91	0.33
平均值 Average	41.6 ± 0.6	39.8 ± 1.4	5.9 ± 0.6	2.28 ± 0.06	1.85 ± 0.12	0.36 ± 0.05

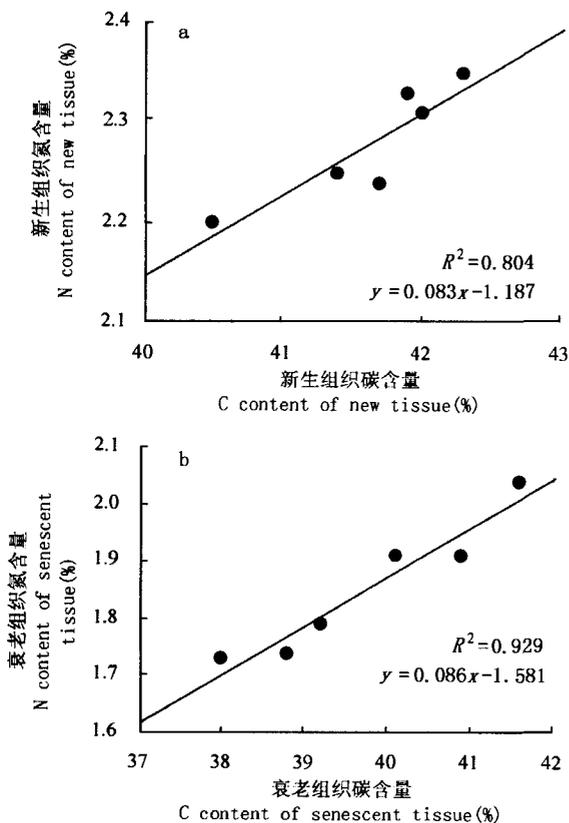


图 1 细叶小羽藓新生组织 ($p < 0.05$) 和老组织 ($p < 0.01$) 碳含量和氮含量之间的相关性

Fig. 1 Carbon content plotted against nitrogen content in new tissues ($p < 0.05$) and ($p < 0.01$) senescent tissues of *Haplocladium microphyllum*

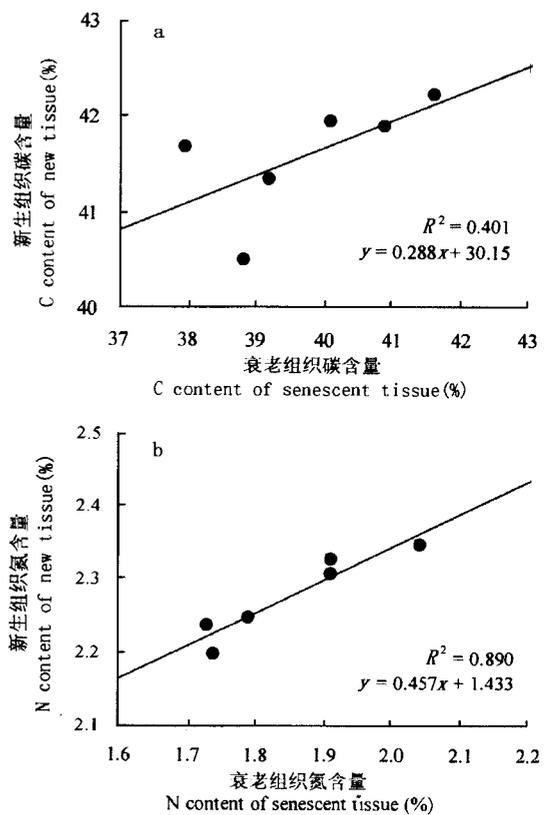


图 2 细叶小羽藓新老组织之间碳含量 ($p < 0.05$) 和氮含量 ($p < 0.01$) 的相关性

Fig. 2 Carbon ($p < 0.05$) and nitrogen ($p < 0.01$) content in senescent tissues of *Haplocladium microphyllum* plotted against those in new-growing tissues

3 讨论

3.1 苔藓新老组织碳氮含量变化及相关性

该地区细叶小羽藓新生组织碳含量变化较小 (平均为 $41.6\% \pm 0.6\%$), 总体水平低于泥炭藓 (*Sphagnum*) (48% , Vitt *et al.*, 2003)。苔藓光饱和与光补偿点低, 在弱光环境中也能很好地进行光合作

用, 具有很强的固碳能力。此外, 由于分化程度低, 苔藓细胞的生长势能相对较旺盛, 生理活性较高, 生长发育较快会增加对氮的吸收, 如叶绿素、蛋白质、核酸等的合成都需要大量氮素。因此, 同种组织碳氮含量之间的相关性反映了苔藓的固碳能力与氮需求相互联系 (图 1)。

尽管苔藓植物没有维管束构造, 但同样具有传

表2 苔藓新老组织及其根际土壤碳氮同位素分析结果
Table 2 Stable carbon and nitrogen isotope composition of *Haplocladium microphyllum* tissues and its rooting soil

样品 Sample No.	$\delta^{13}\text{C}$ 值 $\delta^{13}\text{C}$ value (‰)			$\delta^{15}\text{N}$ 值 $\delta^{15}\text{N}$ value (‰)		
	新生组织 New tissue	衰老组织 Senescent tissue	根际土壤 Soil rhizosphere	新生组织 New tissue	衰老组织 Senescent tissue	根际土壤 Soil rhizosphere
T1	-29.0	-29.2	-25.0	-7.2	-7.3	1.8
T2	-29.4	-29.4	-24.9	-7.6	-7.0	0.6
T3	-29.1	-29.3	-25.7	-7.4	-9.4	2.5
T4	-31.3	-30.9	-24.8	-5.5	-5.3	3.8
T5	-31.4	-31.3	-24.8	-6.4	-6.4	0.3
T6	-30.8	-30.2	-24.8	-5.0	-5.5	1.7
平均值 Average	-30.2 ± 1.1	-30.1 ± 0.9	-25.0 ± 0.4	-6.5 ± 1.1	-6.8 ± 1.5	1.8 ± 1.3

导水分和转移养分的机制。首先,苔藓体内物质可以通过胞间连丝在细胞之间直接传输而不需要穿过细胞膜,例如泥炭藓单个细胞壁就有约 1 500 个穿孔供给胞间连丝进行体内物质传输(Rydin & Clymo, 1989)。此外,养分和光合作用产物均可以通过苔藓特有的养分传导细胞在组织间迁移,或通过毛细管作用进行传导(吴鹏程,1998)。

衰老过程中组织失绿,光合作用和代谢能力减退,体内的水分和养分部分地转移到正在发育的组织,使新生组织内含氮物质和碳水化合物比衰老组织高。因此,新生组织碳氮含量比老组织高(表1)以及二者之间存在相关性(图2),反映了细叶小羽藓体内存在衰老组织碳氮迁移到新生组织的生理机制。对其它藓类的研究也存在相同的现象,例如Rydin和Clymo(1989)观察到泥炭藓体内的磷和碳能够从较老组织向上迁移7 cm的距离;塔藓(*Hylacomium splendens*)、泥炭藓、拟垂枝藓(*Rhytidiadelphus squarrosus*)和金发藓(*Polytrichum commune*)体内的氮均可以通过茎或毛细管传输等途径从年老组织转移到年幼组织或顶端生长部位供给生长需求(Gerdol, 1990; Wells & Brown, 1996; Eckstein & Karlsson, 1999),并且Aldous(2002)进一步证实在氮污染严重的地区苔藓组织氮迁移(2 cm)的量(64%~83%)比清洁地区高(11%~32%),本研究地点处于贵阳城市中心,因此新组织氮高于老组织,可能还与该地区较高的氮沉降促进了氮迁移的机制有关。

3.2 苔藓新老组织碳氮同位素组成特征

植物体内的同位素分馏变化通常会改变其来源信息,从而不利于利用植物同位素示踪来源和解释环境的变化。因此,探讨苔藓不同年龄组织的碳氮同位素组成特征($\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$)对选取合适的苔藓组织监测大气环境有很好的指导意义,同时也有利于理解植物组织间碳、氮元素的走向及其关系。

细叶小羽藓碳同位素变化范围较小($-31.4‰ \sim -29.0‰$)(表2),在 C_3 植物 $\delta^{13}\text{C}$ 范围($-20‰ \sim -35‰$),属于 C_3 植物类型。影响植物碳同位素组成的因素除了光合作用类型和遗传因素外,更重要的还有环境因子的影响(王国安和韩家懋,2001)。相同生境下的同种维管植物由于光合作用能力(碳代谢)和水分利用效率(WUE)的减退(Virgona & Farquhar, 1996),其衰老组织的碳同位素组成可能由于含碳化合物的改变而发生一定的变化(Simard *et al.*, 1997; Ehleringer, 1993)。对于氮同位素而言,维管植物由于其体内氮的运移和再分配也会产生不同程度的同位素分馏,从而导致组织间氮同位素的明显差异(Handley *et al.*, 1999)。例如,Robinson等(1998)基于单独靠 NO_3^- 生长的植物提出了维管植物氮同位素分馏的理想模型,Evans(2001)还进一步解析了影响植物氮同位素变化的生理机制。本研究选择相同生境和大气氮沉降条件下自然生长的同种苔藓,尽可能消除了环境因子、氮源差异和遗传因子的影响,发现细叶小羽藓新老组织之间的碳同位素基本相同,分别为($-30.2‰ \pm 1.1‰$)和($-30.1‰ \pm 0.9‰$),氮同位素组成也没有明显差异(分别为($-6.5‰ \pm 1.1‰$)和($-6.8‰ \pm 1.5‰$))(表2),这与维管植物不同年龄组织的碳氮同位素组成特征有所区别,其原因可能在于细叶小羽藓个体较小,衰老过程中生理功能的衰退以及碳氮物质的迁移和分配不会产生明显的同位素分馏。

3.3 苔藓和根际土壤的关系

苔藓年净生产量较高(如极地和沼泽生态系统),体现其具有很强的固定大气 CO_2 的能力(曹同等,1995; Clark *et al.*, 1998),同时苔藓能够借助茎叶表面直接吸收大气中的活性氮(NO_x 和 NH_x)以满足其快速生长的需求(Bergamini & Peintinger, 2002)。因此,苔藓对土壤基质碳氮累积的贡献程度或速度

对于探讨大气物质输入地表生态系统至关重要。目前对于大气营养被苔藓吸收后的动态和周转研究集中在沼泽生态系统的泥炭藓和森林生态系统的某些藓类(Gerdol, 1990; Merritt, 2003), 而喀斯特地区的苔藓能否将所累积的大气物质很快地输入土壤及其周转周期等问题还不确定。本工作仅作为探讨苔藓驱动大气物质参与地球化学循环的初步研究, 而苔藓植物作为累积大气物质的一个库, 其在环境中的重要性和生态功能还有待深入研究。

本研究中细叶小羽藓和根际土壤之间的碳氮含量和同位素组成没有相关性, 说明研究地苔藓层对土壤碳氮累积的贡献程度低。因为苔藓本身的分解速率是生态系统成分中较慢的, 约为维管束植物组织分解速度的 10% (Merritt, 2003)。Li 和 Vitt (1997) 利用¹⁵N 对以藓类为建群种的沼泽氮动态示踪发现, 无论富养型沼泽或雨养型沼泽, 藓类都是施入氮的主要吸收者和持有者, 并且这些藓类在氮施入两年后仍有 80% 左右保留, 而灌木作为系统中的优势种仅含施入量的 1%。可见, 持有大量的养分而极缓慢的养分循环速度限制了苔藓向根际土壤的转化。此外, 采样点没有其它植物混生, 苔藓残体较疏松, 破碎化程度更高, 分解速率和营养元素的循环速度更慢。因此, 尽管研究区苔藓在新搬运的土壤基质上着生至少 5 年, 但是从同位素地球化学角度看苔藓层对该地土壤形成的贡献仍然较小。

4 结 论

细叶小羽藓同种组织碳氮含量之间的相关性反映了苔藓固碳能力和氮需求之间的紧密联系。新生组织碳氮含量比衰老组织高, 反映了衰老过程光合作用功能和代谢能力的减退会引起体内含碳和含氮物质降低, 原因在于碳氮物质从衰老组织向新生组织迁移的生理机制, 新生组织对衰老组织在氮素利用上具有一定的继承性。

新老组织碳氮同位素组成没有明显变化, 反映了细叶小羽藓衰老以及组织间的碳氮迁移和再分配没有发生明显同位素分馏。相对于维管植物而言, 其原因可能与细叶小羽藓个体较小等因素有关。

苔藓和根际土壤有机碳氮信息不存在相关性, 可能由于苔藓植物分解缓慢, 使养分循环的速度较慢, 养分的周转期较维管植物长, 反映了研究地细叶小羽藓对土壤碳氮的累积贡献较小。大量滞留大气物质、分解缓慢的性质表明苔藓对大气碳氮输入土壤环境具有一定的缓冲作用, 有关这一性质的环境

生态效应有待深入研究。

参 考 文 献

- Aldous AR (2002). Nitrogen translocation in *Sphagnum* mosses: effects of atmospheric nitrogen deposition. *New Phytologist*, 156, 241 – 253.
- An L (安丽), Cao T (曹同), Yu YH (俞鹰浩) (2006). Heavy metals contents in *Haplocladium* and their relationships with Shanghai City environment. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 17, 1490 – 1494. (in Chinese with English abstract)
- Bergamini A, Peintinger M (2002). Effects of light and nitrogen on morphological plasticity of the moss *Calliergonella cuspidata*. *Oikos*, 96, 355 – 363.
- Cao T (曹同), Gao Q (高谦), Fu X (傅星) (1995). Phytomass of bryophytes in forest ecosystems in Changbai Mountain. *Acta Ecologica Sinica (生态学报)*, 15(Suppl. B), 68 – 74. (in Chinese with English abstract)
- Clark DL, Nadkarni NM, Gholz HL (1998). Growth, net production, litter decomposition, and net nitrogen accumulation by epiphytic bryophytes in a tropical montane forest. *Biotropica*, 30, 12 – 23.
- Dawson TE, Mambelli S, Plamboeck AH, Templer PH, Tu KP (2002). Stable isotopes in plant ecology. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 33, 507 – 559.
- Eckstein RL, Karlsson PS (1999). Recycling of nitrogen among segments of *Hylocomium splendens* as compared with *Polytrichum commune*: implications for clonal integration in an ectohydric bryophyte. *Oikos*, 86, 87 – 96.
- Ehleringer JR (1993). Variation in leaf carbon isotope discrimination in *Encelia farinosa*: implications for growth, competition, and drought survival. *Oecologia*, 95, 340 – 346.
- Evans RD (2001). Physiological mechanisms influencing plant nitrogen isotope composition. *Trends in Plant Science*, 6, 121 – 126.
- Gerdol R (1990). Seasonal variations in the element concentrations in mire water and in *Sphagnum* mosses on an ombrotrophic bog in the southern Alps. *Lindbergia*, 16, 44 – 50.
- Handley LL, Austin AT, Robinson D, Scrimgeour CM, Heaton THE, Raven JA, Schmidt S, Stewart GR (1999). The ¹⁵N natural abundance ($\delta^{15}\text{N}$) of ecosystem samples reflects measures of water availability. *Australian Journal of Plant Physiology*, 26, 185 – 199.
- Liu XY (刘学炎), Xiao HY (肖化云), Liu CQ (刘丛强), Li YY (李友谊) (2007). $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ of moss (*Haplocladium microphyllum* (Hedw.) Broth) for indicating habitats difference and canopy retention on atmospheric nitrogen deposition. *Geochimica (地球化学)*, 36, 286 – 294. (in Chinese with English abstract)
- Li Y, Vitt DH (1997). Patterns of retention and utilization of aerally deposited nitrogen in boreal peatlands. *Ecoscience*, 4, 106 –

- 116.
- Merritt RT (2003). The role of bryophytes in carbon and nitrogen cycling. *The Bryologist*, 106, 395 – 409.
- Robinson D, Handley LL, Scrimgeour CM (1998). A theory for $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ fractionation in nitrate-grown vascular plants. *Planta*, 205, 397 – 406.
- Rydin H, Clymo RS (1989). Transport of carbon and phosphorus compounds about *Sphagnum*. *Proceedings of the Royal Society of London, Series B*, 237, 63 – 84.
- Simard SW, Durall DM, Jones MD (1997). Carbon allocation and carbon transfer between *Betula papyrifera* with *Pseudotsuga menziesii* seedlings using a ^{13}C pulse-labeling method. *Plant and Soil*, 191, 41 – 55.
- Soares A, Pearson J (1997). Short-term physiological responses of mosses to atmospheric ammonium and nitrate. *Water, Air and Soil Pollution*, 93, 225 – 242.
- Virgona JM, Farquhar GD (1996). Genotypic variation in relative growth rate and carbon isotope discrimination in sunflower is related to photosynthetic capacity. *Australian Journal of Plant Physiology*, 23, 227 – 244.
- Vitt DH, Wieder RK, Halsey LA, Turetsky MR (2003). Response of *Sphagnum fuscum* to nitrogen deposition: a case study of ombrogenous peatlands in Alberta, Canada. *The Bryologist*, 106, 235 – 245.
- Wang GA (王国安), Han JM (韩家懋) (2001). $\delta^{13}\text{C}$ variations of C_3 plants in dry and rainy seasons. *Marine Geology and Quaternary Geology* (海洋地质与第四纪地质), 21 (4), 43 – 47. (in Chinese with English abstract)
- Wells JM, Brown DH (1996). Mineral nutrient recycling within shoots of the moss *Rhytidiadelphus squarrosus* in relation to growth. *Journal of Bryology*, 19, 1 – 17.
- Wu HY (吴虹玥), Bao WK (包维楷), Wang A (王安) (2005). Concentrations and characteristics of chemical elements in bryophytes. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 24 (1), 58 – 64. (in Chinese with English abstract)
- Wu PC (吴鹏程) (1998). *Bryological Biology* (苔藓植物生物学). Science Press, Beijing, 102 – 143. (in Chinese)

责任编辑: 马克平 责任编辑: 张丽赫