

长白山不同海拔泥炭地泥炭藓残体的分解

李 伟, 卜兆君*, 张兵将, 龙 川, 唐瑞江, 崔钱王

(东北师范大学泥炭沼泽研究所/国家环境保护湿地生态与植被恢复重点实验室, 吉林 长春 130024)

摘 要: 在当前气候变化的背景下, 沿海拔梯度, 选择长白山 4 处泥炭地为研究地, 以喙叶泥炭藓和大泥炭藓为分解材料, 于丘上和丘间两种生境进行分解实验, 研究物种、生境以及海拔下降导致的增温对泥炭藓残体分解速率的影响。结果表明, 增温以及生境和物种差异均影响泥炭藓残体的分解, 即增温促进泥炭藓分解, 丘间生境更利于泥炭藓残体分解, 喙叶泥炭藓分解率高于大泥炭藓。比较而言, 物种即分解材料的内在质地是影响植物残体分解的主要因素, 即高氮含量和低 C/N 比的喙叶泥炭藓更易分解。增温与物种及增温与生境间均存在交互作用, 可以改变生境和物种差异对泥炭藓残体分解的影响, 可能会对泥炭地碳汇功能产生深远影响。

关键词: 泥炭藓; 长白山; 海拔; 变暖; 分解

中图分类号: X141 P951

文献标志码: A

植物残体分解是影响生态系统物质循环的关键因素。自然条件下, 水位^[1]、生境^[2]、基底^[3]、养分含量^[4]、植物残体类型^[5-6]等均可影响植物残体的分解。北方泥炭地通常是以泥炭藓(*Sphagnum*)为优势植物的湿地生态系统, 这里湿润、寒冷、缺氧和过酸的环境导致微生物数量较少、类群相对单一, 因此, 植物残体分解缓慢, 大量累积形成泥炭^[7-8]。据推算, 北方泥炭地的总碳储量占全球土壤总碳量的三分之一, 在全球碳循环中发挥重要作用^[9]。

近半个世纪来, 气候变暖、氮沉降、CO₂ 浓度升高等环境变化正在威胁全球陆地生态系统。气候变暖因对生态过程的影响更深远、更复杂, 而倍受关注^[10]。作为全球泥炭地的主要分布区, 温带山地及寒带气候变暖将更为迅速^[11], 将对泥炭地生态系统的过程与格局产生强烈影响。模拟实验研究表明, 气候变暖虽可促进泥炭藓净初级生产^[12], 但也可提

高微生物的活性, 或间接降低地下水位, 促进植物残体的好气分解^[4, 13], 降低泥炭地的“碳汇”功能。

温带山地是泥炭地的重要分布区之一, 因海拔梯度上存在的自然温度差异, 这里还是研究气候变暖对植物残体分解影响的良好场所。在长白山地, 我们沿海拔梯度选择 4 处泥炭地为研究地, 以 3 种泥炭藓为实验材料, 通过在藓丘和丘间 2 种生境埋设分解样品, 尝试对比研究气候变暖、生境及物种差异对泥炭藓残体的分解影响, 旨在为深入研究泥炭地碳累积对环境变化响应奠定基础。

1 研究地点和研究方法

1.1 研究地点概况

本研究中的 4 处泥炭地赤池、园池、哈泥、金川均位于吉林省东部长白山地区, 属温带湿润、半湿润

收稿日期(Received date): 2012 - 06 - 22; 改回日期(Accepted): 2013 - 05 - 30。

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金项目(40971036 40830535) 和环保公益性行业科研专项资金项目(201109067) 资助。[Supported by the National Science Foundation of China (40971036 , 40830535) and Special Projects for Public Service Scientific Research of Environmental Protection (201109067) .]

作者简介(Biography): 李伟(1990 -) 男, 湖南人, 学士, 主要从事自然地理学与湿地生态学研究。[Li Wei (1990 -) , male , born in Hunan , Bachelor , mainly engages in studying in physical geography and wetland ecology.] E - mail: liw781@nenu.edu.cn

* 通信作者(Corresponding author): 卜兆君(1972 -) 男, 黑龙江人, 博士, 副教授, 主要从事湿地生态学与苔藓植物生态学研究。[Bu Zhaojun , Ph D , born in Heilongjiang , associate professor , mainly engages in studying in wetland ecology and bryophyte ecology.] E - mail: buzhaojun@nenu.edu.cn

针阔林带,气候为中温带大陆性季风气候,年均降水 700~1 000 mm。4 处泥炭地的基本概况见表 1。其中,因无气象实测数据,以赤池泥炭地年均温为参照,记为 0,其他泥炭地按气温垂直递减率 0.65℃/(100 m)估算其温度变化。另外,因除赤池外,其他 3 处泥炭地植被类型均较复杂,表 1 仅列出样品埋设地段的优势植物。

1.2 研究材料准备

2010 年 6 月,于哈泥泥炭地开阔地生境,采集 4~5 cm 长的长白山泥炭地典型丘上种大泥炭藓(*S. palustre*)和典型丘间种喙叶泥炭藓(*S. fallax*),室内剪为 2~2.5 cm 片段作为实验材料,烘箱内 40℃烘 24 h,混合均匀后称取 2 g 装入孔径 150 μm、大小 5 cm×8 cm 的分解袋中。另外准备 5 个经 40℃烘 24 h 的 2 g 苔藓片段样品,再经 70℃烘干至恒重,称量,记为分解实验材料初始干重,并测定 C、N、多酚含量(表 2)。

1.3 实验设计

按照增温(即海拔由高到低)、物种和生境 3 个因素布置实验样品,分别 4、2 和 2 个水平,实验 5 次重复,共计 80 袋样品。2010 年 8 月,在长白山不同海拔的 4 处自然泥炭地,分别选取高 30 cm 左右的大泥炭藓丘和相邻的丘间生境,将 2 种泥炭藓残体分解样品标记后掩埋于苔藓表面以下 5 cm 处,历时 14 个月后,于 2011 年 10 月取回,4℃保存。

1.4 测量指标与方法

室内清除分解袋外附着的泥炭藓和袋内维管植物细根,其余泥炭藓残体置于烘箱中 70℃烘干至恒重,称量干重。然后将部分泥炭藓残体样品研磨

至粉状,分别取适量后用重铬酸钾容量法-外加热法测量 C 含量^[14],半微量开氏法测 N 含量^[14],Folin-Ciocalteu 比色法测多酚含量^[15]。计算干重、C、N 和多酚损失率及 C/N 变化率,计算公式如下

损失率(变化率)(%) = $\frac{\text{初始值} - \text{分解后值}}{\text{初始值}} \times 100$

1.5 数据处理

应用 SPSS 13.0 软件完成数据处理与分析,Office Excel 2003 完成作图,多因素方差分析方法分析增温、物种和生境对泥炭藓残体分解的影响。

2 结果

2.1 泥炭藓残体分解的总体情况

总体来看,经过 14 个月分解后,泥炭藓干重损失率平均为 19.2%。此外,残体化学指标较实验之初亦发生变化。C、N 和多酚含量分别为 41.6%、0.62% 和 0.82‰,分别较实验初下降 7.3%、44.1% 和 23.4% 倍。C/N 比为 68.2,较实验初增长 67.4%。

2.2 增温对泥炭藓残体分解的影响

增温(即海拔下降)对泥炭藓残体的干重($P < 0.001$)、C($P < 0.001$)、C/N($P < 0.001$)以及多酚含量($P < 0.001$)均有显著地影响(表 3)。随气温升高,泥炭藓残体的干重损失率呈增高趋势(图 1A);残体 C 含量呈先升高再下降然后又增高的变化规律(图 1B);增温导致哈泥泥炭地的 C/N 比显著下降($P < 0.001$);圆池泥炭地残体多酚含量达 1.12‰,显著高于其他 3 处(图 1E)。

表 1 长白山 4 处泥炭地的基本概况

Table 1 The basic situation of the four peatlands in the Changbai Mountains.

泥炭地	位置	海拔/m	温度变化/℃	优势植物	pH 值
赤池	42°03'N, 128°11'E	1 811	0	细叶泥炭藓(<i>Sphagnum teres</i>)、东方羊胡子草(<i>Eriophorum polystachion</i>)	5.8
园池	42°02'N, 128°26'E	1 270	+3.5	大泥炭藓(<i>S. palustre</i>)、高山杜鹃(<i>Rhododendron lapponicum</i>)	5.6
哈泥	42°13'N, 126°31'E	900	+5.9	大泥炭藓、喙叶泥炭藓(<i>S. fallax</i>)、油桦(<i>Betula fruticosa</i> var. <i>ruprechtiana</i>)	5.4
金川	42°20'N, 126°22'E	614	+7.8	大泥炭藓、喙叶泥炭藓、油桦、谷精草(<i>Eriocaulon buergerianum</i>)	5.8

表 2 2 种实验材料喙叶泥炭藓和大泥炭藓初始化学组成

Table 2 Initial chemical composition of the study materials of *S. fallax* and *S. palustre*

种类	C /%	N /%	碳氮比 C/N ratio	多酚 Polyphenol /‰
喙叶泥炭藓 <i>S. fallax</i>	45.90 a±0.46	1.20 a±0.02	38.34 b±0.71	1.12a±0.16
大泥炭藓 <i>S. palustre</i>	43.84 b±0.25	1.02 b±0.02	43.11 a±0.52	1.01a±0.07
平均 Average	44.87	1.11	40.73	1.07

不同字母表示显著差异($p < 0.05$)。(The different letters show the significant difference ($p < 0.05$)).

表 3 增温、生境和物种对泥炭藓残体分解显著性的三因素方差分析
Table 3 Three-way ANOVA for effects of elevation, habitats and species on decomposition of Sphagnum /%

因素 Factor	干重损失率		C		N		C/N		多酚	
	F	P	F	P	F	P	F	P	F	P
增温	12.98***	<0.001	14.18***	<0.001	2.38	0.078	7.39***	<0.001	9.72***	<0.001
生境	4.89*	0.031	0.66	0.421	0.42	0.517	0.70	0.407	0.07	0.793
物种	194.39***	<0.001	0.02	0.899	0.42	0.521	0.39	0.541	4.28*	0.043
增温×生境	1.51	0.221	10.22***	<0.001	2.46	0.070	4.89**	0.004	5.63**	0.002
增温×物种	13.10***	<0.001	0.41	0.748	0.72	0.546	0.22	0.885	12.44***	<0.001
物种×生境	0.29	0.592	2.06	0.156	0.15	0.703	0.20	0.653	0.99	0.324
增温×生境×物种	6.35	0.001	0.08	0.970	0.55	0.649	0.45	0.716	0.23	0.874

P < 0.05 ,** P < 0.01 ,*** P < 0.001。

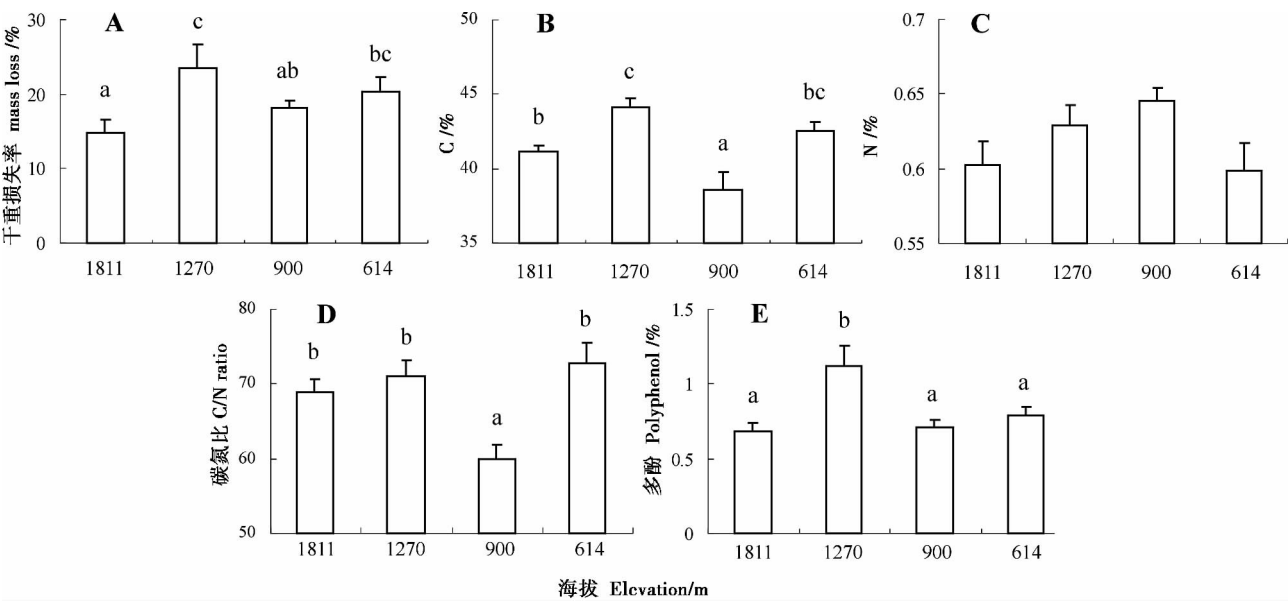


图 1 增温对泥炭藓干重损失率 (A)、C (B)、N (C)、C/N 比 (D) 和多酚含量 (E) 的影响

Fig. 1 Effect of warming on the mass loss (A), C content (B), N content (C), C/N ratio (D) and polyphenol (E) of Sphagnum.
Means with the same letter are not significantly different, p < 0.05

2.3 生境和物种对泥炭藓残体分解的影响

如表 3 所示,生境显著影响泥炭藓残体的干重损失率($P < 0.05$)。丘间生境泥炭藓的干重损失率为 $20.3 \pm 1.6\%$, 高于丘间的 $18.1 \pm 1.5\%$ (表 3 和图 2A)。物种显著影响泥炭藓残体干重损失率($P < 0.001$) 和多酚含量($P < 0.05$) (见表 3)。平均而言,丘间种喙叶泥炭藓残体的干重损失率达 $26.3 \pm 1.3\%$, 超过大泥炭藓 ($12.1 \pm 0.8\%$) 1 倍以上(图 2A),多酚含量亦高于大泥炭藓 17.1 倍(图 2E)。

2.4 交互作用对泥炭藓分解的影响

在干重损失率和多酚含量方面,增温与物种均存在交互作用(图 3A 和 E)。喙叶泥炭藓的分解率

大于大泥炭藓(见图 2A),但随着气温升高,在哈泥泥炭地 2 种泥炭藓分解率已无差异。2 种泥炭藓材料初始多酚含量并无显著差异(表 2),但经过 14 个月的分解后,随着温度的增加,在圆池和哈泥泥炭地,喙叶泥炭藓分别显著高于($F = 15.08, P < 0.01$) 和低于($F = 12.67, P < 0.01$) 大泥炭藓。

在 C、C/N 比和多酚含量方面,增温与生境间亦存在交互作用(图 3B、C 和 D)。沿海拔梯度,在低温的赤池和圆池泥炭地,丘间残体 C 含量和 C/N 比均不小于丘上,但当气温进一步增加,在哈泥泥炭地丘间残体 C 含量($F = 6.88, P < 0.05$) 和 C/N 比($F = 4.58, P < 0.05$) 均小于丘间。尽管小幅度增温提

高泥炭藓残体多酚含量(见表3,图1),但两种生境变化规律存在差异(见图3D),主要反映在最高海拔的赤池泥炭地,该处丘间生境泥炭藓残体多酚含量显著低于丘上生境($F = 61.91$, $P < 0.001$)。

3 讨论

3.1 气候变暖与泥炭藓残体分解

许多模拟全球变暖的分解实验研究均揭示了增温对分解的促进作用^[16]。例如,Dorrepaal等研究发

现,1℃增温可导致亚北极泥炭地土壤呼吸作用增加一半以上^[17]。然而,Breeuwer等^[18]在西欧沿纬度梯度的泥炭藓残体的分解实验时发现,泥炭藓残体的分解速率并不随气温升高而增高,甚至有研究表明泥炭藓残体的分解速率随气温升高而下降^[3]。本研究结果支持增温促进泥炭藓残体分解,其作用在圆池泥炭地尤为突出,反映出小幅度增温能更大地促进泥炭藓残体的分解。其原因可能是小幅度增温增加微生物的数量和活性,促进了分解^[17]。大幅度增温,将大大增加蒸发量,降低残体湿度,因此可以

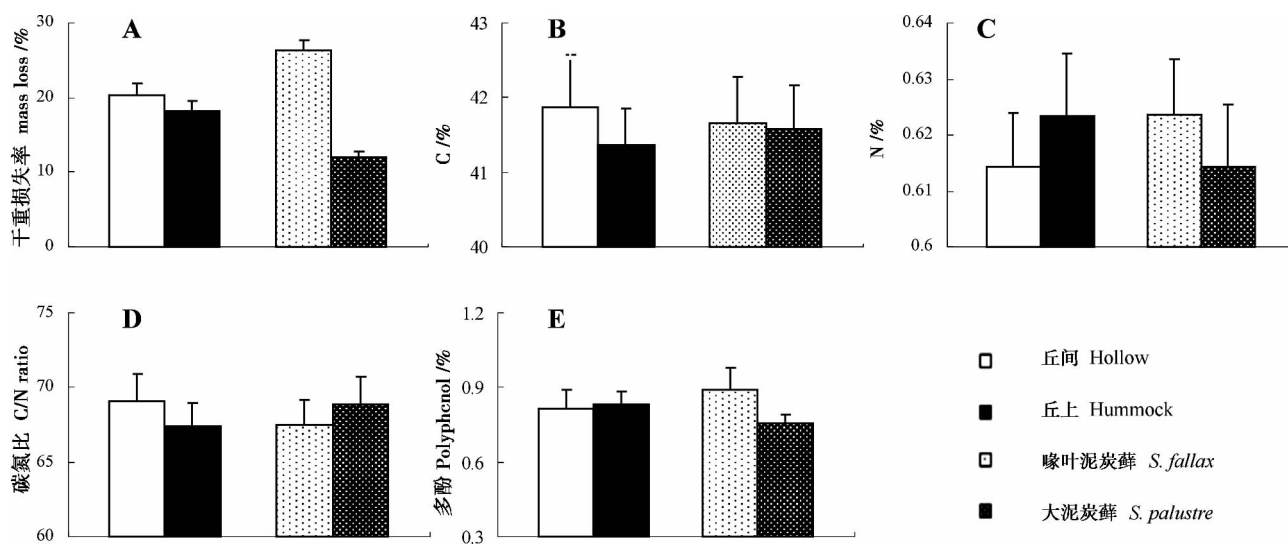


图2 生境和物种对泥炭藓分解的影响

Fig. 2 Effect of habitat and species on decomposition of Sphagnum

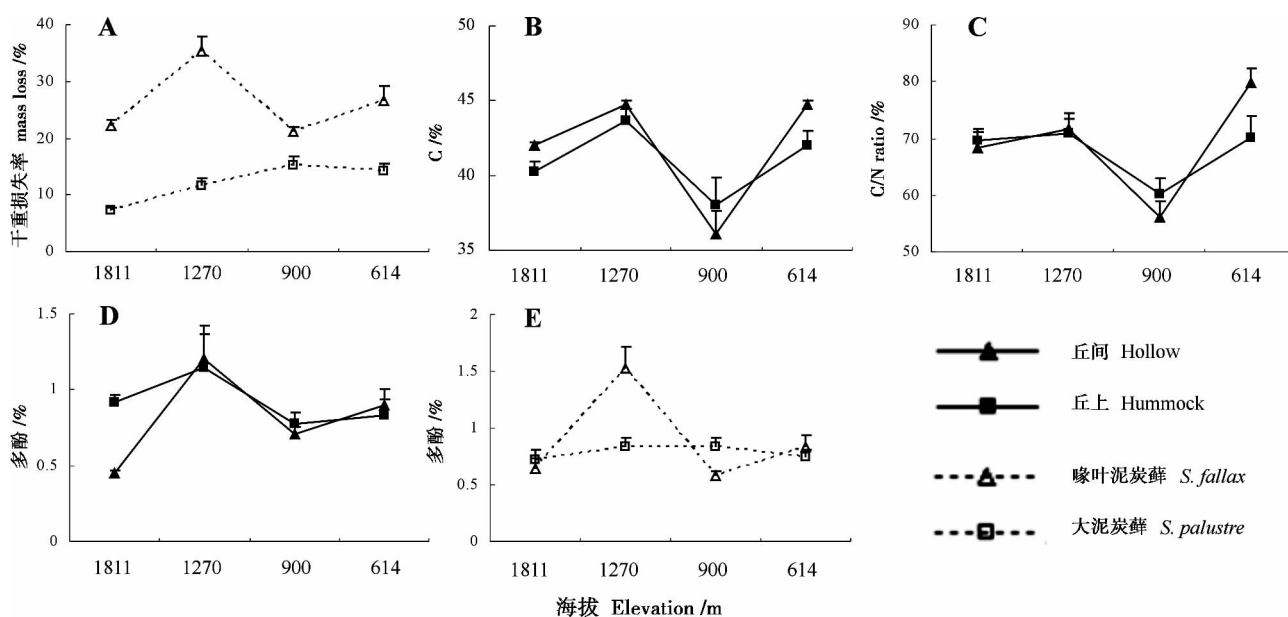


图3 增温(即海拔降低)与物种(A和E)及增温与生境间(B,C和D)的交互作用

Fig. 3 Interactions between warming (namely elevation decrease) and species (A and E) and warming and habitat (B, C and D).

一定程度上抵消增温增加微生物活性的效应,导致其残体分解率回落。

3.2 增温、生境和物种间的交互作用

在本研究中,增温与物种及生境间在多个指标上均发生交互作用。不论海拔如何,喙叶泥炭藓的分解速率远高于大泥炭藓(见图1和表3),但随着海拔下降即气温增加,二者的分解速率呈现非单调性变化,于海拔1270 m的园池,喙叶泥炭藓的干重和多酚含量异常高,而大泥炭藓无明显变化,反映出增温可以改变不同物种的分解速率上的差异,也表明不同幅度的气候变暖对不同泥炭藓分解的影响可迥异不同。增温虽然不能修饰生境差异对泥炭藓残体干重损失的影响,但其仍在残体内在品质的指标C含量、C/N比和多酚含量方面与生境间存在交互作用,即增温可改变生境差异对残体内在品质影响,长远来看,可能将影响泥炭藓的残体分解及泥炭地的碳累积功能。

3.3 泥炭藓残体的化学成分组成与分解

增温、生境和物种3种因素均影响泥炭藓残体的分解。因喙叶泥炭藓的分解率比大泥炭藓高1倍以上,相对于气温与生境而言,物种是影响泥炭藓残体分解为最重要的因素。喙叶泥炭藓的分解率高于大泥炭藓应与植物材料自身理化性质的不同有关(表2)。通常,植物体内高N含量和非结构性糖含量可促进分解^[19],而低C/N及多酚含量更是指示残体高分解速率良好指标^[6,20]。本研究中,尽管2种泥炭藓残体的多酚含量无显著差异,但喙叶泥炭藓N含量($n=5$, $F=6.33$, $P=0.036$)和C/N($n=5$, $F=107.57$, $P=0.007$)分别显著高和低于大泥炭藓,具有易分解的基本化学特征,因此能够解释其高分解率的实际情况。

3.4 分解与泥炭地微地貌格局

泥炭地存在明显的藓丘-丘间微地貌格局, Von Post 和 Sernander 认为,该格局会发生周期性的交替演变,被称为“循环更新假说”^[21]。该假说认为藓丘和丘间植物的生产力的差异造成微地貌格局交替演变的唯一驱动力^[22],忽视了分解作用对该地貌格局的贡献。丘间种固然比丘上种生产力高^[12],如喙叶泥炭藓的生产力显著高于大泥炭藓^[23],但其分解也远高于大泥炭藓(见图2),生产力与分解的平衡是造成泥炭地微地貌格局保持相对稳定的重要原因。然而,当前气候变暖因与物种及生境间存在交互作用,可改变泥炭地生境和物种间泥炭藓分解

的差异性,将破坏生产力与分解的平衡关系,因此可能对泥炭地碳汇功能产生深远影响。

致谢 实验过程中得到周新华老师、马进泽和曾竞同学的帮助,特此致谢。

参考文献(References)

- [1] Ise T, Dunn A L, Wofsy S C, et al. High sensitivity of peat decomposition to climate change through water-table feedback [J]. *Nature Geoscience*, 2008, 1: 763–766
- [2] Tomas H. Habitat and species controls on *Sphagnum* production and decomposition in a mountain raised bog [J]. *Boreal Environment Research*, 2009, 14: 947–958
- [3] Moore T R, Bubier J L, Bledzki L A. Litter decomposition in temperate peatlands: the effect of substrate and sites [J]. *Ecosystems*, 2007, 10: 949–963
- [4] Gerdol R, Petraglia A, Bragazza L, et al. Nitrogen deposition interacts with climate in affecting production and decomposition rates in *Sphagnum* mosses [J]. *Global Change Biology*, 2007, 13: 1810–1821
- [5] Hobbie S E. Temperature and plant species control over litter decomposition in Alaskan tundra [J]. *Ecological Monographs*, 1996, 66: 503–522
- [6] Limpens J, Berendse F. How litter quality affects mass loss and N loss from decomposing *Sphagnum* [J]. *Oikos*, 2003, 103: 537–547
- [7] Johnson L C, Damman A W H. Species controlled *Sphagnum* decay on a south Swedish raised bog [J]. *Oikos*, 1991, 61: 234–242
- [8] Hogg E H, Malmer N, Wallen B. Microsite and regional variation in the potential decay rate of *Sphagnum magellanicum* in south Swedish raised bogs [J]. *Ecography*, 1994, 17: 50–59
- [9] Gorham E. Northern peatlands: role in the carbon cycle and probable responses to climatic warming [J]. *Ecological Applications*, 1991, 1: 182–195
- [10] Shaver G R, Canadell J, Chapin III F S, et al. Global warming and terrestrial ecosystems: a conceptual framework for analysis [J]. *Bioscience*, 2000, 50: 871–882
- [11] Solomon S, et al. Contribution of Working Group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007: 764–770
- [12] Gunnarsson U. Global patterns of *Sphagnum* productivity [J]. *Journal of Bryology*, 2005, 27: 269–279
- [13] Dioumaeva I, Susan Trumbore, Edward A G Schuur, et al. Decomposition of peat from upland boreal forest: temperature dependence and sources of respired carbon [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 108: 8222–8233
- [14] Zhang Jiaen. Ecology commonly used in experimental research methods and techniques [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007. [章家恩. 生态学常用实验研究方法与技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.]
- [15] Singleton V L, Orthofer R, Lamuela-Raventós R M. Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by

- means of Folin - Ciocalteu reagent [J]. *Methods in Enzymology*, 1999, 299: 152 - 178
- [16] Vitousek P M, Turner D R, Parton W J, et al. Litter decomposition on the Mauna Loa environmental matrix, Hawai' I: patterns, mechanisms, and models [J]. *Ecology*, 1994, 75(2): 418 - 429
- [17] Dorrepaal E, Toet S, van Logtestijn R, et al. Carbon respiration from subsurface peat accelerated by climate warming in the subarctic [J]. *Nature* 2009 460: 616 - 619
- [18] Breeuwer A, Heijmans, Robroek M M P D, et al. The effect of temperature on growth and competition between *Sphagnum* species [J]. *Oecologia*, 2008, 156: 155 - 168
- [19] Johnson L C, Damman A W H. Decay and its regulation in *Sphagnum* peatlands [J]. *Advances in Bryology*, 1993, 5: 249 - 296
- [20] Bonnett S A F, Ostle N, Freeman C. Seasonal variations in decomposition processes in a valley-bottom riparian peatland [J]. *Science of The Total Environment*, 2006, 370: 561 - 73
- [21] Charman D. Peatlands and environmental change [M]. Chichester: John Wiley & Sons Inc 2002: 3 - 23
- [22] Backéus I. The cyclic regeneration on bogs —— a hypothesis that became an established truth [J]. *Striae*, 1991, 31: 33 - 35
- [23] Ma Jinze, Bu Zhaojun, Zhen Xingxing, et al. Effects of shading stress on two *Sphagnum* species growth and their interactions [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012 23(2): 357 - 362 [马进泽, 卜兆君, 郑星星, 等. 遮阴胁迫对两种泥炭藓植物生长及相互作用的影响 [J]. *应用生态学报*, 2012 23(2): 357 - 362]

Decomposition of *Sphagnum* Litter in 4 Peatlands of the Changbai Mountains along an Altitudinal Gradient

LI Wei, BU Zhaojun, ZHANG Bingjiang, LONG Chuan, TANG Ruijiang, CUI Qianwang

(Key Laboratory for Wetland Conservation and Vegetation Restoration, Ministry of Environmental Protection, Institute for Peat and Mire Research, Northeast Normal University, Changchun 130024, China)

Abstract: *Sphagnum* is the dominant and mainly peat-forming plant component in northern peatlands. The substantial function of carbon sequestration for peatlands is due to the slow decomposition of *Sphagnum*. Until now, we still know very little about the main factors that affect *Sphagnum* decomposition in Northern China under the current climate change background. Along an altitudinal gradient, we selected *Sphagnum fallax* and *S. palustre* litter as materials in two habitats hummocks and hollows of four peatlands, Jinchuan, Hani, Yuanchi and Chichi in the Changbai Mountains, to study the effects of warming namely altitudinal decrease, habitat and species on decomposition rate of *Sphagnum* litter. The results show that, slight warming promoted *Sphagnum* litter decomposition; the decomposition rate of *S. fallax* was higher than *S. palustre*; hollow habitats were beneficial to *Sphagnum* decomposition. Overall species namely intrinsic quality of litter was the main factor to affect *Sphagnum* decomposition. *S. fallax* with high nitrogen content and low C/N was more easily to decompose. Interaction between warming and species and between warming and habitat can change species and habitats effects on decomposition, and it may create a far-reaching impact on carbon sink function of peatlands.

Key words: *Sphagnum*; Changbai Mountains; elevation; warming; decomposition