

氮-硫沉降对邓恩桉及杉木人工林凋落物 C 和 N 残留率的影响

黄婷¹, 包和林¹, 吴承祯^{1,2,①}, 林勇明¹, 洪伟¹, 李键¹

(1. 福建农林大学林学院, 福建 福州 350002; 2. 武夷学院生态与资源工程系, 福建 武夷山 354300)

摘要: 采用二次正交回归旋转设计, 以 Na_2SO_4 为硫源、46% $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 为氮源模拟氮-硫沉降, 分析了不同氮-硫沉降水平下邓恩桉 (*Eucalyptus dunnii* Maiden) 和杉木 [*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.] 人工林凋落物中 C 和 N 残留率的动态变化, 并采用 Olson 指数模型对 C 和 N 分解模型进行拟合。结果表明: 在不同氮-硫沉降水平下, 在 1 年内随处理时间延长邓恩桉和杉木凋落物的 C 和 N 残留率总体上均呈下降趋势; 且 N 较难释放, 总体表现为“释放-富集-释放”的动态过程; 但在不同氮-硫沉降水平下及不同处理时间凋落物中 C 和 N 残留率均有极显著差异 ($P < 0.01$)。凋落物中 C 和 N 分解的 Olson 指数模型的相关性总体上达到极显著或显著 ($P < 0.05$) 水平; 邓恩桉和杉木凋落物中 C 和 N 的平均分解系数分别为 0.877 和 0.208、0.704 和 0.600, 平均周转期分别为 3.148 和 15.877 a, 4.090 和 4.947 a, 显示凋落物中 C 释放速率大于 N, 杉木凋落物的 C 周转期大于邓恩桉但其 N 周转期则小于后者。在 Na_2SO_4 164 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 的水平下, 氮沉降对邓恩桉凋落物的 C 和 N 释放及杉木凋落物的 N 释放有促进作用, 但对杉木凋落物的 C 释放有抑制作用; 在 46% $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 150 或 256 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 的水平下, 硫沉降也具有同样的作用。随分解时间的延长, 邓恩桉凋落物的 C/N 值呈波动但总体减小的趋势, 而杉木凋落物的 C/N 值呈波动趋势; 但在不同氮-硫沉降水平下凋落物的 C/N 值均有极显著差异, 且邓恩桉凋落物 C/N 值的变化幅度总体上大于杉木凋落物。

关键词: 二次正交回归旋转设计; 邓恩桉; 杉木; 凋落物分解; 模拟氮-硫沉降; C 和 N 残留率

中图分类号: Q948.11; S791.27.02 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2013)04-0011-09

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2013.04.02

Effect of simulated nitrogen-sulfur deposition on residual rates of C and N in litters of *Eucalyptus dunnii* and *Cunninghamia lanceolata* plantations HUANG Ting¹, BAO Helin¹, WU Chengzhen^{1,2,①}, LIN Yongming¹, HONG Wei¹, LI Jian¹ (1. College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 2. Department of Ecology and Resource Engineering, Wuyi University, Wuyishan 354300, China), *J. Plant Resour. & Environ.* 2013, 22(4): 11-19

Abstract: Taking Na_2SO_4 as sulfur source and 46% $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ as nitrogen source to simulate nitrogen-sulfur deposition, dynamic change of residual rates of C and N in litters of *Eucalyptus dunnii* Maiden and *Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook. plantations under different levels of simulated nitrogen-sulfur deposition was studied by the quadratic rotation-orthogonal combination design, and decomposition models of C and N were fitted by the Olson exponential model. The results show that during one year, residual rates of C and N in litters of *E. dunnii* and *C. lanceolata* appear generally a decreasing tendency with prolonging of treatment time under different levels of nitrogen-sulfur deposition, and N release is more difficult with the dynamic process “release-enrichment-release”, but there are extremely significant differences in residual rates of C and N of litters among different levels of nitrogen-sulfur deposition and among different treatment times ($P < 0.01$). The correlation of Olson exponential models of C and N

收稿日期: 2013-06-26

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目(2011J01072); 国家自然科学基金资助项目(41201564); 国家教育部博士点学科专项基金项目(20123515110011)

作者简介: 黄婷(1989—), 女, 江西抚州人, 硕士研究生, 主要从事森林生态学研究。

①通信作者 E-mail: fjwcz@126.com

decomposition in litters reaches generally extremely significant or significant ($P < 0.05$) levels. Average decomposition coefficients of C and N in litters of *E. dunnii* and *C. lanceolata* are 0.877 and 0.208, 0.704 and 0.600, average turnover periods of them are 3.148 and 15.877 a, 4.090 and 4.947 a, respectively, indicating that C release rate in litters is higher than that of N, and C turnover period in *C. lanceolata* litter is longer than that in *E. dunnii* litter but N turnover period of the former is shorter than that of the latter. Under level of Na_2SO_4 164 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, nitrogen deposition has a promoting effect on C and N release in *E. dunnii* litter and on N release in *C. lanceolata* litter but has a inhibiting effect on C release in *C. lanceolata* litter, and sulfur deposition has the same effects under level of 46% $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 150 or 256 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$. With prolonging of decomposition time, C/N value in *E. dunnii* litter appears a trend of fluctuation and general decreasing, while that in *C. lanceolata* litter appears a fluctuation trend. There are extremely significant differences in C/N value in litters under different levels of nitrogen-sulfur deposition, and variation range of C/N value in *E. dunnii* litter is generally bigger than that in *C. lanceolata* litter.

Key words: quadratic rotation-orthogonal combination design; *Eucalyptus dunnii* Maiden; *Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.; litter decomposition; simulated nitrogen-sulfur deposition; residual rate of C and N

杉木 [*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.] 为中国自然分布广、人工栽培多的速生商品树种^[1], 其材质结构均匀、抗虫耐腐性良好, 在南方林区广泛种植, 为中国亚热带地区人工林生态系统的主要组成树种。邓恩桉 (*Eucalyptus dunnii* Maiden) 是桉树中不可多得的纸浆原料树种, 在土层厚、水肥好的环境条件下生长快且具较强的耐寒能力^[2]。

以氮沉降和硫沉降为主导因子的酸沉降对森林枯落物的分解有较大影响^[3]。在全球气候变化及工业化发展的背景下, 大气氮、硫干湿沉降已成为森林生态系统中氮、硫的重要输入途径。其中, 硫沉降可引起土壤理化性质改变, 导致许多森林生态系统衰退^[4]; 而氮沉降则对森林生态系统结构、功能及生物多样性有明显影响, 过剩的氮与全球多地的森林衰退有密切关系^[5-11]。目前, 有关酸沉降对森林凋落物分解影响的研究主要集中于单一的氮沉降方面^[12-14], 对复合沉降的相关研究报道较少。

为此, 本课题组借鉴段雷等^[15]对中国土壤氮硫沉降的临界负荷区划结果, 在酸沉降中等敏感的福建省开展了氮硫沉降条件下人工林凋落物与植株养分关系、胸径生长状况等方面的研究, 获得了相关的研究成果^[16-17]。在前期研究基础上, 作者以邓恩桉和杉木人工林为研究对象, 开展模拟氮-硫沉降条件下森林生态系统尤其是人工林生态系统凋落物元素动态变化的研究, 评价酸沉降对人工林养分循环的影响效应, 以期为人工林凋落物分解对全球酸沉降响应特征的研究、以及人工林生态系统的可持续经营和酸沉降

减缓措施的提出提供相关研究数据。

1 研究区概况和研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于福建省建阳市, 属闽西北中低山丘陵中部, 地理坐标为东经 118°09'19"、北纬 27°19'47"; 平均海拔 187 m。土壤类型为红壤和黄壤, 土层深厚且肥沃。区域内光热资源丰富, 适宜动植物生殖繁衍, 为中国南方重点林区之一。该区域为中亚热带季风气候, 冬短夏长、温暖湿润、静风多; 年平均日照时数 1 802 h, 温差大; 年均气温 18 °C, 无霜期 230 ~ 280 d; 雨季集中, 年平均降水量约为 1 700 mm^[1]。

供试样地 2005 年皆伐后萌发杉木幼龄林, 每年进行 2 次除草追肥; 杉木现存 11 000 株 · hm⁻², 平均胸径 3.53 cm、平均树高 2.28 m。邓恩桉于 2006 年 2 月种植, 造林地为杉木和马尾松 (*Pinus massoniana* Lamb.) 采伐迹地, 土壤类型为红壤, 造林密度 1 750 株 · hm⁻², 每年进行 3 次除草追肥 (500 g · 株⁻¹); 邓恩桉现存 1 650 株 · hm⁻², 平均胸径 8.57 cm、平均树高 9.1 m。邓恩桉和杉木林下植被稀疏, 主要种类为芒萁 [*Dicranopteris dichotoma* (Thunb.) Bernh.] 和两色鳞毛蕨 [*Dryopteris setosa* (Thunb.) Akasawa]。

1.2 研究方法

1.2.1 模拟氮-硫沉降实验设计 采用二次正交旋转组合设计^[16-17]并参考段雷等^[15]和 Gundersen 等^[18]对酸沉降临界负荷的研究结果, 确定模拟氮-硫沉降

梯度和沉降量,其中 $m_c = 4$ 、 $m_r = 4$ 、 $m_0 = 8$ 。以 Na_2SO_4 为硫源、46% $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 为氮源,二者的 0 编码水平分别为 96 和 150 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。各处理水平为:A 处理 Na_2SO_4 164 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 46% $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 256 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; B 处理 164 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ Na_2SO_4 和 46% $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 44 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; C 处理 Na_2SO_4 28 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 46% $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 256 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; D 处理 Na_2SO_4 28 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 46% $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 44 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; E 处理 Na_2SO_4 0 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 46% $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 150 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; F 处理 Na_2SO_4 192 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 46% $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 150 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; G 处理 Na_2SO_4 96 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 46% $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 0 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; H 处理 Na_2SO_4 96 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 46% $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 300 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; I 处理 Na_2SO_4 96 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 46% $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 150 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。其中 I 处理为零水平处理,设置 8 个重复;此外还设置 1 个空白处理,合计为 17 个处理组。

1.2.2 凋落物放置及模拟氮-硫沉降处理方法 于 2007 年 10 月在邓恩桉和杉木幼林内分别设置 68 块面积 20 m×20 m 的样地,不同处理样地间设 3 m 缓冲带。

2007 年 10 月采用直接收集法采集样地内长势良好的邓恩桉和杉木新鲜叶片,采样叶位为植株顶部从上至下的第 3 个分枝。叶片自然风干后于 65 °C 恒温烘干,按每袋 10 g 装入上下孔径均为 0.5 mm 的 12 cm×12 cm 尼龙网袋。次月底,在邓恩桉和杉木各样地中分别放入 36 个邓恩桉叶片或杉木叶片分解袋,分解袋悬挂在离地面 1.3 m 处。

根据上述模拟氮-硫沉降水平将 46% $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 和 Na_2SO_4 混合溶解于 20 L 水中,每月月底在样地用背式喷雾器均匀喷洒在分解袋上,对照则喷洒等量水;每月 1 次,持续 1 a。

1.2.3 凋落物样品采集及 C 和 N 含量测定方法 于 2007 年 10 月第 1 次取样测定凋落物中 C 和 N 的本底值,其后于每月 28 日(与喷洒时间一致)从各样地中随机取回 1 个分解袋(4 次重复),在同等条件下将凋落物烘干并称量,粉碎后供测定。参照文献[17],采用低温外加热重铬酸钾氧化-比色法测定凋落物中 C 含量,采用半微量凯氏定氮法测定 N 含量。

1.3 数据处理

采用 EXCEL 2003 统计分析软件对实验数据进行

统计分析和作图,其中对零水平(处理 I)的 8 个重复实验点的测定数据取平均值。用 DPS 7.05 统计分析软件进行方差分析、LSD 多重比较及 Olson 指数模型拟合。

参照文献[19]采用 Olson 指数模型“ $y = e^{-kt}$ ”预估凋落物中 C 和 N 分解速率,式中: y 为凋落物中 C 或 N 的残留率; t 为时间; k 为分解系数(a^{-1})。

2 结果和分析

2.1 模拟氮-硫沉降对邓恩桉凋落物中 C 和 N 释放的影响

2.1.1 C 和 N 残留率的动态变化 在模拟氮-硫沉降条件下经过 1 a 的处理周期邓恩桉凋落物中 C 和 N 残留率的变化见表 1。结果表明:在不同的模拟氮-硫沉降水平下,随处理时间延长邓恩桉凋落物的 C 残留率在分解过程中均呈明显的下降趋势,其中前 7 个月 C 呈释放状态;至 2008 年 10 月各处理组 C 残留率均达到最低值,从 A 处理至 I 处理邓恩桉凋落物中 C 残留率依次为 39.47%、47.83%、50.28%、44.71%、49.10%、38.99%、51.61%、49.62% 和 45.84%。方差分析结果显示不同处理组及不同取样时间邓恩桉凋落物的 C 残留率均有极显著差异($P < 0.01$); LSD 多重比较结果显示处理 F [Na_2SO_4 192 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 46% $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 150 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$] 的 C 残留率与其余处理组有显著差异($P < 0.05$)。

在不同的模拟氮-硫沉降水平下,随处理时间延长各处理组邓恩桉凋落物的 N 残留率总体呈下降趋势,但 N 较难释放,其下降过程总体表现为“释放-富集-释放”的动态模式。各处理组凋落物的 N 均有明显的富集时间段,具体时间为 2008 年的 1 月、3 月、4 月、6 月和 7 月;至 2008 年 10 月各处理组 N 残留率均达到最低值,从 A 处理至 I 处理邓恩桉凋落物中 N 残留率依次为 60.67%、74.34%、80.52%、69.65%、79.89%、63.45%、76.86%、80.52% 和 71.50%。方差分析结果显示不同处理组及不同取样时间邓恩桉凋落物的 N 残留率均有极显著差异($P < 0.01$); LSD 多重比较结果显示处理 C [Na_2SO_4 28 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 46% $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 256 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$] 中邓恩桉凋落物的 N 残留率与其余处理组(除处理 E 外)有显著差异($P < 0.05$)。

表 1 在模拟氮-硫沉降条件下 2007 年 10 月至 2008 年 10 月邓恩桉凋落物中 C 和 N 的残留率

Table 1 Residual rates of C and N in litter of *Eucalyptus dunnii* Maiden from Oct. 2007 to Oct. 2008 under condition of simulated nitrogen-sulfur deposition

时间 Time (YYYY-MM)	不同处理组的 C 残留率/% ¹⁾ C residual rate in different treatment groups ¹⁾									平均 Average	
	A	B	C	D	E	F	G	H	I		
2007-10	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00aA
2007-11	97.31	97.17	99.28	98.23	99.40	97.52	95.82	99.33	98.52	98.52	98.06bA
2007-12	93.02	94.92	95.31	92.34	98.21	94.38	95.42	96.88	93.74	93.74	94.91cB
2008-01	80.83	82.95	87.42	81.20	85.82	81.32	83.27	86.49	82.65	82.65	83.55dC
2008-02	78.66	82.08	82.29	78.21	78.48	79.55	86.41	80.38	78.83	78.83	80.54eD
2008-03	70.05	74.35	73.14	69.81	73.23	67.80	75.47	68.06	67.64	67.64	71.06fE
2008-04	60.46	65.24	66.62	62.34	65.54	58.02	66.50	60.45	61.84	61.84	63.00gF
2008-05	52.99	56.19	54.80	53.71	53.34	48.90	57.64	49.63	52.81	52.81	53.33iGH
2008-06	50.68	55.43	55.97	51.85	53.50	47.65	56.24	49.81	51.61	51.61	52.53iH
2008-07	51.36	54.07	54.98	52.12	52.13	48.94	57.91	51.67	51.95	51.95	52.79iH
2008-08	54.13	56.77	56.46	56.24	55.82	49.81	58.54	55.54	53.50	53.50	55.20hG
2008-09	47.57	52.04	53.47	49.36	49.27	43.90	54.15	48.51	49.45	49.45	49.75jI
2008-10	39.47	47.83	50.28	44.71	49.10	38.99	51.61	49.62	45.84	45.84	46.38kJ
平均 Average	67.43eDE	70.704bAB	71.54abA	68.47deCD	70.30bcABC	65.91fE	72.23aA	68.95cdBCD	68.34deD		

时间 Time (YYYY-MM)	不同处理组的 N 残留率/% ¹⁾ N residual rate in different treatment groups ¹⁾									平均 Average	
	A	B	C	D	E	F	G	H	I		
2007-10	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00aA
2007-11	90.15	91.52	93.68	92.51	95.19	91.26	92.31	90.65	92.65	92.65	92.21bB
2007-12	91.14	82.70	85.07	90.29	87.18	84.79	94.11	84.95	83.86	83.86	87.12cdC
2008-01	85.25	85.21	94.86	90.37	86.43	85.65	88.37	87.46	88.80	88.80	88.04cC
2008-02	75.56	74.72	73.69	73.55	78.15	79.14	81.81	76.66	72.99	72.99	76.25gFGH
2008-03	82.72	82.09	82.32	78.55	86.23	81.66	79.00	79.93	77.66	77.66	81.13eDE
2008-04	82.96	88.77	90.37	85.01	92.16	82.35	85.68	85.53	84.81	84.81	86.40cdC
2008-05	72.89	81.30	84.02	77.41	80.73	73.32	79.40	77.75	77.36	77.36	78.24fgEFG
2008-06	75.21	82.71	83.96	77.89	84.66	78.88	76.46	78.85	79.60	79.60	79.80efEF
2008-07	82.40	87.30	88.46	82.96	87.51	83.20	83.23	84.94	83.29	83.29	84.81dCD
2008-08	81.89	88.84	89.91	85.56	89.15	79.11	84.10	88.92	82.14	82.14	85.51cdC
2008-09	69.50	78.89	82.99	72.90	77.16	69.11	77.21	76.56	74.99	74.99	75.48ghGH
2008-10	60.67	74.34	80.52	69.65	79.89	63.45	76.86	80.52	71.50	71.50	73.04hH
平均 Average	80.80dC	84.49bcAB	86.91aA	82.82cdBC	86.50abA	80.80dC	84.50bcAB	84.06cAB	82.28cdBC		

¹⁾ A: Na_2SO_4 164 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ + 46% $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 256 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; B: Na_2SO_4 164 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ + 46% $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 44 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; C: Na_2SO_4 28 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ + 46% $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 256 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; D: Na_2SO_4 28 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ + 46% $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 44 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; E: Na_2SO_4 0 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ + 46% $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 150 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; F: Na_2SO_4 192 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ + 46% $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 150 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; G: Na_2SO_4 96 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ + 46% $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 0 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; H: Na_2SO_4 96 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ + 46% $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 300 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; I: Na_2SO_4 96 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ + 46% $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 150 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$. 同行或同列中不同的大写和小写字母分别表示不同处理间或不同月份间差异极显著 ($P < 0.01$) 和显著 ($P < 0.05$)。Different capitals and small letters in the same row or in the same column indicate the extremely significant difference ($P < 0.01$) and the significant difference ($P < 0.05$) among different treatment groups or different months, respectively.

2.1.2 C 和 N 的分解模型 采用 Olson 指数模型对不同氮-硫沉降水平下邓恩桉凋落物中 C 和 N 的分解模型进行拟合,结果见表 2。由表 2 可见,各处理组邓恩桉凋落物中 C 分解模型的相关系数均达到极显著水平 ($P < 0.01$),相关性优于其 N 分解模型。各处理组邓恩桉凋落物的 C 和 N 的平均分解系数分别为 0.877 和 0.208, C 和 N 的平均周转期分别为 3.148 和 15.877 a,表明邓恩桉凋落物中 C 释放速率大于 N

释放速率。按照邓恩桉凋落物中 C 释放速率从大至小各处理组依次排序为 F、A、H、I、D、E、B、C、G;按照 N 释放速率从大至小各处理组依次排序为 A、F、D、I、G、E、H、B、C。

结合不同处理组的模拟氮-硫沉降水平可以看出,在 Na_2SO_4 192 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 46% $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 150 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 的水平下 C 释放最快;在 Na_2SO_4 164 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 46% $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 256 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$

的水平下N释放最快;在Na₂SO₄ 28 kg·hm⁻²·a⁻¹或96 kg·hm⁻²·a⁻¹的水平下C和N释放速率随氮沉降水平提高而减小;在Na₂SO₄ 164 kg·hm⁻²·a⁻¹的水平下,氮沉降促进C和N的释放;在46%CO(NH₂)₂

44 kg·hm⁻²·a⁻¹的水平下,C和N的释放速率随硫沉降水平的提高而减小;在46%CO(NH₂)₂ 150或256 kg·hm⁻²·a⁻¹的水平下,硫沉降对C和N的释放有促进作用。

表2 在模拟氮-硫沉降条件下2007年10月至2008年10月邓恩桉凋落物中C和N分解的Olson指数模型¹⁾
Table 2 Olson exponential models for C and N decomposition in litter of *Eucalyptus dunnii* Maiden from Oct. 2007 to Oct. 2008 under condition of simulated nitrogen-sulfur deposition¹⁾

C分解的Olson指数模型 Olson exponential model for C decomposition					N分解的Olson指数模型 Olson exponential model for N decomposition				
处理 Treatment	方程 Equation	分解系数 Decomposition coefficient	t _{0.95}	r ²	处理 Treatment	方程 Equation	分解系数 Decomposition coefficient	t _{0.95}	r ²
A	y=1.031e ^{-0.934t}	0.934	3.240	0.9619**	A	y=0.946e ^{-0.325t}	0.325	9.047	0.6918**
B	y=1.028e ^{-0.814t}	0.814	3.714	0.9576**	B	y=0.903e ^{-0.136t}	0.136	21.281	0.2782
C	y=1.038e ^{-0.810t}	0.810	3.744	0.9465**	C	y=0.920e ^{-0.115t}	0.115	25.325	0.2133
D	y=1.022e ^{-0.877t}	0.877	3.441	0.9561**	D	y=0.938e ^{-0.255t}	0.255	11.497	0.5847**
E	y=1.047e ^{-0.870t}	0.870	3.496	0.9431**	E	y=0.931e ^{-0.149t}	0.149	19.626	0.3848*
F	y=1.046e ^{-1.025t}	1.025	2.967	0.9569**	F	y=0.937e ^{-0.303t}	0.303	9.672	0.7311**
G	y=1.022e ^{-0.750t}	0.750	4.023	0.9398**	G	y=0.943e ^{-0.224t}	0.224	13.112	0.6796**
H	y=1.043e ^{-0.911t}	0.911	3.335	0.9140**	H	y=0.902e ^{-0.143t}	0.143	20.228	0.3263*
I	y=1.029e ^{-0.898t}	0.898	3.368	0.9534**	I	y=0.917e ^{-0.222t}	0.222	13.104	0.5237**

¹⁾ A: Na₂SO₄ 164 kg·hm⁻²·a⁻¹+46%CO(NH₂)₂ 256 kg·hm⁻²·a⁻¹; B: Na₂SO₄ 164 kg·hm⁻²·a⁻¹+46%CO(NH₂)₂ 44 kg·hm⁻²·a⁻¹; C: Na₂SO₄ 28 kg·hm⁻²·a⁻¹+46%CO(NH₂)₂ 256 kg·hm⁻²·a⁻¹; D: Na₂SO₄ 28 kg·hm⁻²·a⁻¹+46%CO(NH₂)₂ 44 kg·hm⁻²·a⁻¹; E: Na₂SO₄ 0 kg·hm⁻²·a⁻¹+46%CO(NH₂)₂ 150 kg·hm⁻²·a⁻¹; F: Na₂SO₄ 192 kg·hm⁻²·a⁻¹+46%CO(NH₂)₂ 150 kg·hm⁻²·a⁻¹; G: Na₂SO₄ 96 kg·hm⁻²·a⁻¹+46%CO(NH₂)₂ 0 kg·hm⁻²·a⁻¹; H: Na₂SO₄ 96 kg·hm⁻²·a⁻¹+46%CO(NH₂)₂ 300 kg·hm⁻²·a⁻¹; I: Na₂SO₄ 96 kg·hm⁻²·a⁻¹+46%CO(NH₂)₂ 150 kg·hm⁻²·a⁻¹. **P<0.01; *P<0.05.

2.2 模拟氮-硫沉降对杉木凋落物中C和N释放的影响

2.2.1 C和N残留率的动态变化

在模拟氮-硫沉降条件下经过1a的处理周期杉木凋落物中C和N残留率的变化见表3。结果表明:在1a的处理过程中,前2个月杉木凋落物中C残留率呈明显的下降趋势,各处理组(除处理G和H外)的C残留率在2008年1月均小幅上升;但在此后的5个月中各处理组的C残留率均逐月下降;至2008年7月,除处理B外各处理组的C残留率均显著增加;至2008年10月,从A处理至I处理凋落物的C残留率依次为48.61%、45.00%、43.15%、46.20%、42.03%、44.43%、51.03%、44.69%和46.68%。方差分析结果显示不同处理组及不同取样时间杉木凋落物的C残留率均有极显著差异(P<0.01);LSD多重比较结果显示处理G[Na₂SO₄ 96 kg·hm⁻²·a⁻¹和46%CO(NH₂)₂ 0 kg·hm⁻²·a⁻¹]的C残留率与其余处理组(除处理A外)有显著差异(P<0.05)。

在不同的模拟氮-硫沉降水平下,随处理时间延长各处理组杉木凋落物的N残留率在分解过程中总

体呈下降趋势。具体表现为:前2个月N残留率呈明显的下降趋势,其后2个月基本保持平衡,至2008年3月均小幅上升,2008年4月至10月逐渐下降;至2008年10月从A处理至I处理凋落物的N残留率依次为46.13%、49.08%、51.77%、45.03%、52.04%、48.78%、44.93%、49.58%和48.15%。整体上看:处理E[Na₂SO₄ 0 kg·hm⁻²·a⁻¹和46%CO(NH₂)₂ 150 kg·hm⁻²·a⁻¹]的杉木凋落物N残留率最大,处理G的N残留率最小,其余处理条件下杉木凋落物交替进行N释放与N富集,且释放量大于富集量。方差分析结果显示不同处理组及不同取样时间杉木凋落物的N残留率有极显著差异(P<0.01);LSD多重比较结果显示处理G的N残留率与其余处理组有显著差异(P<0.05)。

2.2.2 C和N的分解模型

采用Olson指数模型对不同氮-硫沉降水平下杉木凋落物中C和N的分解模型进行拟合,结果见表4。由表4可见:各处理组杉木凋落物的C和N分解模型的相关系数均达到显著水平(P<0.05),拟合效果较好。各处理组C和N的平均分解系数分别为0.704和0.600,平均周转期分

别为4.090和4.947 a,说明杉木凋落物的C释放速率大于N释放速率。按照杉木凋落物的C释放速率从大至小各处理组依次排序为H、I、B、F、C、A、E、D、G,按照N释放速率从大至小各处理组依次排序为D、F、I、G、A、H、C、B、E。

结合不同处理组的模拟氮-硫沉降水平可以看出:在 Na_2SO_4 96 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 和46% $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 300 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 的水平下杉木凋落物中C释放速

率最快;在 Na_2SO_4 28或96 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 的水平下C释放速率随氮沉降水平的提高而增大;在 Na_2SO_4 164 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 的水平下,N沉降对杉木凋落物的C释放有抑制作用;在46% $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 44 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 的水平下,C释放速率随硫沉降水平的提高而增大;在46% $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 256 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 的水平下,硫沉降对杉木凋落物的C释放有抑制作用。在 Na_2SO_4 28 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 和46% $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 44 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 的

表3 在模拟氮-硫沉降条件下2007年10月至2008年10月杉木凋落物中C和N的残留率

Table 3 Residual rates of C and N in litter of *Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook. from Oct. 2007 to Oct. 2008 under condition of simulated nitrogen-sulfur deposition

时间 Time (YYYY-MM)	不同处理组的C残留率/% ¹⁾ C residual rate in different treatment groups ¹⁾									平均 Average	
	A	B	C	D	E	F	G	H	I		
2007-10	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00aA
2007-11	90.29	86.74	82.51	87.28	80.38	83.60	88.72	84.48	86.53	85.61	85.61bB
2007-12	76.84	74.68	70.32	73.06	69.24	75.98	81.89	81.07	84.11	76.35	76.35cC
2008-01	81.03	76.04	71.89	75.88	72.90	81.32	85.30	77.00	80.90	78.03	78.03cC
2008-02	74.78	68.57	63.44	69.94	63.54	67.89	75.12	63.05	72.41	68.75	68.75dD
2008-03	66.11	62.50	58.40	63.88	57.41	62.69	70.44	60.93	65.04	63.04	63.04eE
2008-04	64.51	61.25	60.88	62.58	58.16	60.83	63.44	58.95	61.10	61.30	61.30eE
2008-05	58.74	56.77	53.56	59.52	55.26	56.79	62.79	49.77	56.61	56.65	56.65fF
2008-06	54.94	52.02	47.81	51.30	49.92	47.56	54.44	47.22	50.02	50.58	50.58gG
2008-07	58.42	49.84	53.37	55.67	61.71	57.99	58.11	59.51	56.31	56.77	56.77fF
2008-08	55.48	51.07	51.20	52.69	50.41	51.77	56.37	50.06	52.31	52.37	52.37gG
2008-09	46.49	45.37	40.74	45.87	37.27	44.31	49.93	42.80	46.09	44.32	44.32hH
2008-10	48.61	45.00	43.15	46.20	42.03	44.43	51.03	44.69	46.68	45.76	45.76hH
平均 Average	67.40abAB	63.83dCDE	61.33eE	64.91cdBCD	61.40eE	64.24cdCD	69.04aA	63.04deDE	66.01bcBC		

时间 Time (YYYY-MM)	不同处理组的N残留率/% ¹⁾ N residual rate in different treatment groups ¹⁾									平均 Average	
	A	B	C	D	E	F	G	H	I		
2007-10	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00aA
2007-11	87.24	91.27	93.48	89.20	95.50	92.46	85.61	92.53	91.74	91.00	91.00bB
2007-12	74.22	81.30	94.01	86.50	88.07	80.79	71.27	82.43	81.81	82.27	82.27cCD
2008-01	77.57	79.06	80.54	75.87	83.36	77.17	71.76	77.64	75.04	77.56	77.56dE
2008-02	75.66	78.13	84.14	79.90	83.19	81.02	70.79	78.44	76.67	78.66	78.66dE
2008-03	82.93	85.07	87.04	84.46	89.46	83.06	80.05	84.26	81.32	84.18	84.18cC
2008-04	75.58	82.25	85.28	79.77	87.89	78.53	72.05	77.85	77.00	79.58	79.58dDE
2008-05	70.33	72.87	76.85	67.32	78.30	73.01	69.03	75.96	72.49	72.91	72.91eF
2008-06	62.93	68.03	73.92	66.12	77.09	67.50	58.89	66.49	64.23	67.24	67.24fG
2008-07	58.24	60.72	62.39	56.04	66.02	54.77	51.00	61.84	61.84	59.21	59.21gH
2008-08	53.38	56.38	58.94	52.94	64.76	55.09	52.81	54.46	52.54	55.70	55.70hI
2008-09	50.59	52.14	55.20	51.76	57.36	51.26	48.51	53.72	51.01	52.39	52.39jJ
2008-10	46.13	49.08	51.77	45.03	52.04	48.78	44.93	49.58	48.15	48.39	48.39jK
平均 Average	70.37cC	73.56bB	77.20aA	71.92bcBC	78.70aA	72.57bBC	67.44dD	73.48bB	71.83bcBC		

¹⁾ A: Na_2SO_4 164 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ + 46% $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 256 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; B: Na_2SO_4 164 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ + 46% $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 44 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; C: Na_2SO_4 28 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ + 46% $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 256 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; D: Na_2SO_4 28 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ + 46% $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 44 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; E: Na_2SO_4 0 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ + 46% $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 150 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; F: Na_2SO_4 192 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ + 46% $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 150 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; G: Na_2SO_4 96 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ + 46% $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 0 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; H: Na_2SO_4 96 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ + 46% $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 300 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; I: Na_2SO_4 96 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ + 46% $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 150 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$. 同行或同列中不同的大写和小写字母分别表示不同处理间或不同月份间差异极显著 ($P < 0.01$) 和显著 ($P < 0.05$)。Different capitals and small letters in the same row or in the same column indicate the extremely significant difference ($P < 0.01$) and the significant difference ($P < 0.05$) among different treatment groups or different months, respectively.

表 4 在模拟氮-硫沉降条件下 2007 年 10 月至 2008 年 10 月杉木凋落物中 C 和 N 分解的 Olson 指数模型¹⁾
 Table 4 Olson exponential models for C and N decomposition in litter of *Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook. from Oct. 2007 to Oct. 2008 under condition of simulated nitrogen-sulfur deposition¹⁾

C 分解的 Olson 指数模型 Olson exponential model for C decomposition rate					N 分解的 Olson 指数模型 Olson exponential model for N decomposition rate				
处理 Treatment	方程 Equation	分解系数 Decomposition coefficient	$t_{0.95}$	r^2	处理 Treatment	方程 Equation	分解系数 Decomposition coefficient	$t_{0.95}$	r^2
A	$y = 0.919e^{-0.684t}$	0.684	4.256	0.941 1 **	A	$y = 0.920e^{-0.585t}$	0.585	4.978	0.833 5 **
B	$y = 0.883e^{-0.729t}$	0.729	3.939	0.968 5 **	B	$y = 0.966e^{-0.584t}$	0.584	5.070	0.844 8 **
C	$y = 0.828e^{-0.691t}$	0.691	4.062	0.920 9 **	C	$y = 1.027e^{-0.600t}$	0.600	5.037	0.868 1 **
D	$y = 0.875e^{-0.671t}$	0.671	4.266	0.945 5 **	D	$y = 0.981e^{-0.666t}$	0.666	4.469	0.871 8 **
E	$y = 0.815e^{-0.655t}$	0.655	4.261	0.837 4 **	E	$y = 1.015e^{-0.532t}$	0.532	5.659	0.826 5 **
F	$y = 0.883e^{-0.714t}$	0.714	4.021	0.910 9 **	F	$y = 0.972e^{-0.627t}$	0.627	4.733	0.862 9 **
G	$y = 0.938e^{-0.670t}$	0.670	4.376	0.948 9 **	G	$y = 0.882e^{-0.597t}$	0.597	4.808	0.808 6 **
H	$y = 0.883e^{-0.760t}$	0.760	3.778	0.879 0 **	H	$y = 0.967e^{-0.589t}$	0.589	5.029	0.868 8 **
I	$y = 0.931e^{-0.760t}$	0.760	3.848	0.951 5 **	I	$y = 0.956e^{-0.623t}$	0.623	4.736	0.885 0 **

¹⁾ A: Na₂SO₄ 164 kg · hm⁻² · a⁻¹+46% CO(NH₂)₂ 256 kg · hm⁻² · a⁻¹; B: Na₂SO₄ 164 kg · hm⁻² · a⁻¹+46% CO(NH₂)₂ 44 kg · hm⁻² · a⁻¹; C: Na₂SO₄ 28 kg · hm⁻² · a⁻¹+46% CO(NH₂)₂ 256 kg · hm⁻² · a⁻¹; D: Na₂SO₄ 28 kg · hm⁻² · a⁻¹+46% CO(NH₂)₂ 44 kg · hm⁻² · a⁻¹; E: Na₂SO₄ 0 kg · hm⁻² · a⁻¹+46% CO(NH₂)₂ 150 kg · hm⁻² · a⁻¹; F: Na₂SO₄ 192 kg · hm⁻² · a⁻¹+46% CO(NH₂)₂ 150 kg · hm⁻² · a⁻¹; G: Na₂SO₄ 96 kg · hm⁻² · a⁻¹+46% CO(NH₂)₂ 0 kg · hm⁻² · a⁻¹; H: Na₂SO₄ 96 kg · hm⁻² · a⁻¹+46% CO(NH₂)₂ 300 kg · hm⁻² · a⁻¹; I: Na₂SO₄ 96 kg · hm⁻² · a⁻¹+46% CO(NH₂)₂ 150 kg · hm⁻² · a⁻¹. ** P<0.01; * P<0.05.

水平下,杉木凋落物中 N 释放速率最快;在 Na₂SO₄ 28 kg · hm⁻² · a⁻¹的水平下,N 释放速率随氮沉降水平的升高而降低;在 Na₂SO₄ 164 kg · hm⁻² · a⁻¹的水平下,氮沉降可促进凋落物的 N 释放;在 46% CO(NH₂)₂ 44 kg · hm⁻² · a⁻¹的水平下,凋落物中 N 释放速率随硫沉降水平的升高而降低;在 46% CO(NH₂)₂ 150 或 256 kg · hm⁻² · a⁻¹的水平下,硫沉降可促进杉木凋落物中的 N 释放。

2.3 模拟氮-硫沉降条件下邓恩桉和杉木凋落物的 C/N 值动态变化

在模拟氮-硫沉降条件下经过 1 a 的处理周期邓恩桉和杉木凋落物 C/N 值的变化见表 5。在不同氮-硫沉降水平下各处理组凋落物的 C/N 值呈波动但总体减小的趋势。除处理 A、D 和 G 外,各处理条件下其 C/N 值在前 2 个月呈明显增大的趋势,2008 年 1 月大幅减小,2008 年 2 月则小幅增大,2008 年 3 月

表 5 在模拟氮-硫沉降条件下 2007 年 10 月至 2008 年 10 月邓恩桉和杉木凋落物的 C/N 值
 Table 5 Value of C/N in litters of *Eucalyptus dunnii* Maiden and *Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook. from Oct. 2007 to Oct. 2008 under condition of simulated nitrogen-sulfur deposition

时间 Time (YYYY-MM)	不同处理组邓恩桉凋落物的 C/N 值 ¹⁾									平均 Average
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	
2007-10	45.21	45.21	45.21	45.21	45.21	45.21	45.21	45.21	45.21	45.21cB
2007-11	48.80	48.01	47.92	48.01	47.21	48.31	46.94	49.54	48.08	48.09bA
2007-12	46.14	51.89	50.65	46.24	50.94	50.33	45.85	51.56	50.51	49.35aA
2008-01	42.87	44.01	41.67	40.62	44.89	42.93	42.60	44.71	42.09	42.93dC
2008-02	47.06	49.67	50.49	48.07	45.40	45.45	47.76	47.40	48.82	47.79bA
2008-03	38.28	40.95	40.17	40.18	38.40	37.54	43.19	38.50	39.37	39.62eD
2008-04	32.95	33.23	33.33	33.16	32.16	31.86	35.09	31.95	32.96	32.97fE
2008-05	32.87	31.25	29.49	31.37	29.87	30.15	32.82	28.86	30.85	30.84gF
2008-06	30.47	30.30	30.14	30.10	28.57	27.31	33.25	28.56	29.31	29.78ghFG
2008-07	28.18	28.00	28.10	28.40	26.94	26.59	31.46	27.50	28.19	28.15iH
2008-08	29.89	28.89	28.39	29.72	28.31	28.47	31.47	28.24	29.44	29.20hiGH
2008-09	30.95	29.82	29.13	30.61	28.87	28.72	31.71	28.65	29.81	29.81ghFG
2008-10	29.41	29.09	28.23	29.02	27.79	27.78	30.36	27.86	28.98	28.72hiGH
平均 Average	37.16bcABC	37.72abAB	37.15bcABC	36.98bcABC	36.50cBC	36.20cC	38.29aA	36.81bcBC	37.20bcABC	

续表 5 Table 5 (Continued)

时间 Time (YYYY-MM)	不同处理组杉木凋落物的 C/N 值 ¹⁾ C/N value in litter of <i>C. lanceolata</i> in different treatment groups ¹⁾										
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	平均 Average	
2007-10	66.03	66.03	66.03	66.03	66.03	66.03	66.03	66.03	66.03	66.03	66.03aAB
2007-11	68.34	62.75	58.28	64.61	55.57	59.70	68.43	60.28	62.27	62.25bABC	
2007-12	68.36	60.65	49.39	55.76	51.91	62.10	75.86	64.93	67.88	61.87bBC	
2008-01	68.98	63.50	58.94	66.03	57.74	69.58	78.49	65.48	71.19	66.66aA	
2008-02	65.26	57.95	49.78	57.79	50.43	55.32	70.07	53.07	62.37	58.00cCD	
2008-03	52.64	48.50	44.30	49.94	42.37	49.83	58.10	47.74	52.80	49.58dF	
2008-04	56.35	49.17	47.13	51.80	43.69	51.15	58.14	50.00	52.39	51.09dF	
2008-05	55.14	51.44	46.01	58.38	46.60	51.36	60.05	43.26	51.57	51.53dEF	
2008-06	57.64	50.49	42.70	51.22	42.76	46.52	61.04	46.89	51.44	50.08dF	
2008-07	66.23	54.20	56.48	65.60	61.71	69.91	75.23	63.54	60.11	63.67abAB	
2008-08	68.63	59.82	57.36	65.71	51.40	62.04	70.47	60.69	65.73	62.43bABC	
2008-09	60.67	57.45	48.74	58.52	42.91	57.08	67.95	52.61	59.68	56.18cDE	
2008-10	54.90	60.13	67.33	67.29	64.32	54.36	74.48	72.34	66.32	64.61abAB	
平均 Average	62.24bB	57.08dCD	53.27eDE	59.90bcdBC	52.11eE	58.08cdC	68.03aA	57.45dC	60.75bcBC		

¹⁾ A: Na_2SO_4 164 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1} + 46\% \text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 256 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; B: Na_2SO_4 164 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1} + 46\% \text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 44 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; C: Na_2SO_4 28 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1} + 46\% \text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 256 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; D: Na_2SO_4 28 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1} + 46\% \text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 44 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; E: Na_2SO_4 0 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1} + 46\% \text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 150 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; F: Na_2SO_4 192 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1} + 46\% \text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 150 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; G: Na_2SO_4 96 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1} + 46\% \text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 0 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; H: Na_2SO_4 96 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1} + 46\% \text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 300 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; I: Na_2SO_4 96 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1} + 46\% \text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 150 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$. 同行或同列中不同的大写和小写字母分别表示不同处理间或不同月份间差异极显著 ($P < 0.01$) 和显著 ($P < 0.05$)。Different capitals and small letters in the same row or in the same column indicate the extremely significant difference ($P < 0.01$) and the significant difference ($P < 0.05$) among different treatment groups or different months, respectively.

至 6 月又大幅减小,其后 4 个月则小幅波动;至 2008 年 10 月,从 A 处理至 I 处理凋落物中的 C/N 值分别比初始值(45.21)下降了 34.95%、35.67%、37.56%、35.80%、38.54%、38.55%、32.86%、38.37% 和 35.91%。方差分析结果显示其 C/N 值在不同处理间有极显著差异 ($P < 0.01$);LSD 多重比较结果显示处理 G 的 C/N 值与其他处理组(除处理 B 外)有显著差异 ($P < 0.05$)。

在不同氮-硫沉降水平下各处理组杉木凋落物的 C/N 值呈波动的趋势。其 C/N 值在前 3 个月变化规律复杂,2008 年 1 月至 3 月均呈下降趋势,2008 年 3 月至 6 月基本不变;至 2008 年 10 月,从 A 处理到 I 处理杉木凋落物的 C/N 值分别比其初始值(66.03)下降了 16.90%、8.94%、-1.97%、-1.91%、2.59%、17.67%、-12.80%、-9.56% 和 -0.44%。方差分析结果显示其 C/N 值在不同处理间有极显著差异 ($P < 0.01$),LSD 多重比较结果显示处理 E 的 C/N 值与其他处理组(除处理 C 外)有显著差异 ($P < 0.05$)。

3 讨论和结论

上述研究结果表明:在不同的模拟氮-硫沉降条

件下,邓恩桉和杉木凋落物分解过程中 C 和 N 的残留率均呈下降趋势,主要是因为氮-硫沉降时间的延长会逐渐加快凋落物中有机物的分解。从 C 和 N 的释放状态看,N 较难释放,总体表现为“释放-富集-释放”的动态过程,前期凋落物无法适应氮-硫沉降过程而释放 N,适应外界变化之后凋落物则吸收 N,达到饱和和之后表现出 N 释放,形成了动态的变化过程。邓恩桉凋落物 C 释放的 Olson 拟合模型相关性较大,而杉木凋落物 N 释放的 Olson 拟合模型相关性较大;杉木凋落物的 C 周转期大于邓恩桉,而其凋落物的 N 周转期则小于后者。整体上看,在不同的模拟氮-硫沉降条件下邓恩桉凋落物 C/N 值的变化幅度大于杉木凋落物,可能因为邓恩桉凋落物对氮-硫沉降的响应比杉木强烈。在同样的氮-硫沉降水平下,邓恩桉凋落物与杉木凋落物的 C 释放速率的变化相异。在 N 释放速率方面,在 Na_2SO_4 28 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 水平下 2 种植物凋落物的 N 释放速率随氮沉降量的增加而降低,而在 Na_2SO_4 164 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 水平下氮沉降可促进 2 种植物凋落物的 N 释放;在 46% $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 44 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 水平下邓恩桉和杉木凋落物的 N 释放速率随硫沉降量增加而降低,而在 46% $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 150 或 256 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 水平下,硫沉降可促进邓恩

桉和杉木凋落物的N释放。

不同植物凋落物的分解对氮沉降的响应不同。有些研究者认为部分森林、草地和湿地生态系统的氮沉降可促进微生物活性^[20];也有研究者^[21]认为氮沉降可抑制微生物活性进而影响凋落物分解;但 Hobbie 等^[22]却认为凋落物分解对氮沉降的响应不明显,可能与氮沉降量增加对微生物酶系统的影响及群落组成差异有关^[23]。杉木凋落物的C释放速率大于N释放速率,这一结果与樊后保等^[23]的研究结果一致。在模拟氮-硫沉降条件下杉木凋落物的C/N值在2008年1月至3月呈显著下降的趋势,可能由于N分解对氮-硫沉降的响应比C大,与樊后保等^[23]和项文化等^[24]的研究结果相似。杉木凋落物中C/N平均值比邓恩桉凋落物高,也大于樊后保等^[25]测得的杉木凋落物C/N平均值(44.01);本研究中,邓恩桉凋落物的N周转期大于杉木凋落物,也大于樊后保等^[25]测得的杉木凋落物的N周转期。主要原因可能是凋落物中C/N值有一个临界值,高于临界值则表现为N释放、较低则表现为N富集,且试验过程中氮沉降量的增加可能加剧了邓恩桉凋落物的N富集作用。

植物凋落物的分解与气候、土壤和微生物等环境因素密切相关^[25]。随季节的变化本研究区域的气候及降雨量的变化幅度相对较大,可能会增强凋落物对氮-硫沉降的响应,但是否对凋落物的分解有明显影响则有待进一步的实验和研究。

参考文献:

[1] 林开敏,章志琴,叶发茂,等. 杉木人工林下杉木、楠木和木荷叶凋落物分解特征及营养元素含量变化的动态分析[J]. 植物资源与环境学报, 2010, 19(2): 34-39.

[2] 谭艳,吴承祯,洪伟,等. 邓恩桉林地土壤pH空间变异分析[J]. 植物资源与环境学报, 2012, 21(1): 14-19.

[3] HALL S J, MATSON P A. Nitrogen oxide emissions after nitrogen additions in tropical forests[J]. Nature, 1999, 400: 152-155.

[4] 陈建忠. 邓恩桉优树选择标准[J]. 福建林学院学报, 2006, 26(4): 368-371.

[5] 赵亮,周国逸,张德强,等. CO₂浓度升高和氮沉降对南亚热带主要乡土树种及群落生物量的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(8): 1949-1954.

[6] 李德军,莫江明,方运霆,等. 模拟氮沉降对南亚热带两种乔木幼苗生物量及其分配的影响[J]. 植物生态学报, 2005, 29(4): 543-549.

[7] 段洪浪,刘菊秀,邓琦,等. CO₂浓度升高与氮沉降对南亚热带森林生态系统植物生物量积累及分配格局的影响[J]. 植物生态学报, 2009, 33(3): 570-579.

[8] 方运霆,莫江明, GUNDERSEN P, 等. 森林土壤氮素转换及其对氮沉降的响应[J]. 生态学报, 2004, 24(7): 1523-1531.

[9] 鲁显楷,莫江明,董少峰. 氮沉降对森林生物多样性的影响[J]. 生态学报, 2008, 28(11): 5532-5548.

[10] 邢军会,倪红伟,王建波. 二氧化碳浓度升高与氮沉降对三江平原小叶章群落生物量累积及其分配格局的影响[J]. 中国农学通报, 2011, 27(13): 49-54.

[11] 涂利华,戴洪忠,胡庭兴,等. 模拟氮沉降对华西雨屏区撑绿杂交竹林土壤呼吸的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(4): 829-836.

[12] WRIGHT R F, ROELOFS J G M, BREDEMEIER M, et al. NITREX: responses of coniferous forest ecosystems to experimentally changed deposition of nitrogen[J]. Forest Ecology and Management, 1995, 71(1/2): 163-169.

[13] 樊后保,袁颖红,王强,等. 氮沉降对杉木人工林土壤有机碳和全氮的影响[J]. 福建林学院学报, 2007, 27(1): 1-6.

[14] 莫江明,薛璟花,方运霆. 鼎湖山主要森林植物凋落物分解及其对N沉降的响应[J]. 生态学报, 2004, 24(7): 1413-1420.

[15] 段雷,郝吉明,谢绍东,等. 用稳态法确定中国土壤的硫沉降和氮沉降临界负荷[J]. 环境科学, 2002, 23(2): 7-12.

[16] 侯丹,吕广林,张艳荷,等. 邓恩桉胸径生长对模拟硫、氮复合沉降的响应[J]. 福建林学院学报, 2009, 29(2): 125-130.

[17] 吴承祯,洪伟,陈灿,等. 氮、硫沉降下邓恩桉人工林土壤与植株养分特征关系研究[J]. 武夷学院学报, 2013, 32(2): 1-7.

[18] GUNDERSEN P, EMMETT B A, KJØNAAS O J, et al. Impact of nitrogen deposition on nitrogen cycling in forest: a synthesis of NITREX data[J]. Forest Ecology and Management, 1998, 101(1/3): 37-55.

[19] 刘增文,潘开文. Olson 枯落物分解模型存在的问题与修正[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版, 2005, 33(1): 69-70.

[20] BERG B, STAAF H. Decomposition rate and chemical changes of Scots pine needle litter. II. Influence of chemical composition[J]. Ecological Bulletins, 1980, 32: 373-390.

[21] CARREIRO M M, SINSABAUGH R L, REPERT D A, et al. Microbial enzyme shifts explain litter decay responses to simulated nitrogen deposition[J]. Ecology, 2000, 81(9): 2359-2365.

[22] HOBBI E S, VITOUSEK P M. Nutrient limitation of decomposition in Hawaiian forests[J]. Ecology, 2000, 81(7): 1867-1877.

[23] 樊后保,刘文飞,徐雷,等. 氮沉降下杉木(*Cunninghamia lanceolata*)人工林凋落叶分解过程中C、N元素动态变化[J]. 生态学报, 2008, 28(6): 2546-2553.

[24] 项文化,闫文德,田大伦,等. 外加氮源及与林下植物叶混合对杉木林针叶分解和养分释放的影响[J]. 林业科学, 2005, 41(6): 1-6.

[25] 樊后保,刘文飞,杨跃霖,等. 杉木人工林凋落物分解对氮沉降增加的响应[J]. 北京林业大学学报, 2008, 30(2): 8-13.