

模拟酸雨对杉木幼苗-土壤复合体系 土壤呼吸的短期效应

刘源月¹, 江洪^{1,2,*}, 李雅红³, 原焕英²

(1. 南京大学国际地球系统科学研究所,南京 210093; 2. 浙江林学院国际空间生态与生态系统生态研究中心,杭州 3113003;
3. 西南大学生命科学学院,三峡库区生态环境教育部重点实验室,重庆 400715)

摘要:为了解酸雨对土壤碳释放的作用,选取对酸沉降敏感的杉木(*Cunninghamia lanceolata*)幼苗-土壤复合系统,分成重度酸雨(pH值2.5)、中度酸雨(pH值4.0)和对照(pH值5.6)3个处理区组,进行了2a模拟酸雨胁迫盆栽实验。通过分析酸雨短期作用下土壤酸化的状况以及土壤呼吸的变动,发现:(1)对照组土壤pH值虽有下降,但土壤缓冲体系无显著变化。重度酸雨组土壤pH值持续下降至3.71,土壤残留交换性Ca²⁺和Mg²⁺含量明显降低,土壤缓冲体系转成铝缓冲体系,土壤明显酸化。中度酸雨组土壤pH值略低于对照,土壤残留交换性Ca²⁺含量维持在40.15—42.76 μg·g⁻¹(烘干土),而交换性Mg²⁺含量下降,土壤缓冲体系无显著变化。(2)非模拟酸雨胁迫状况下(对照组),2007年和2008年年均土壤呼吸速率分别为1.41 μmol·m⁻²·s⁻¹和1.42 μmol·m⁻²·s⁻¹,土壤呼吸作用稳定。模拟酸雨短期内以抑制土壤呼吸为主。重度酸雨使土壤呼吸作用持续减弱,2007年和2008年年均土壤呼吸速率分别下降了14%和28%;中度酸雨虽未造成土壤的显著酸化,但该处理组年均土壤呼吸速率2007年增加了8%,2008年则降低了15%。模拟酸雨对土壤呼吸的影响随着酸雨的持续而加强。

关键词:杉木;针叶幼苗-土壤体系;模拟酸雨;土壤呼吸

A short-term effect of simulated acid rain on the soil respiration of the compound system of Chinese fir seedling-soil

LIU Yuanyue¹, JIANG Hong^{1,2,*}, LI Yahong³, YUAN Huanying²

1 International Institute for Earth System Science, Nanjing University, Nanjing 210093, China

2 International Research Center of Special Ecology and Ecosystem, Zhejiang Forestry University, Hangzhou 311300, China

3 Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, School of Life Science, Southwest University, Chongqing 400715, China

Abstract: Chinese subtropical forest zones have been damaged by long term acid rains. The acid rain usually increases the decomposition rates of soil organic carbon and impacts the release of soil carbon by accelerating the soil acidification. Consequently, an uncertainty of the variation of soil carbon is leaded by the effect. Meanwhile, the effluxes of carbon dioxide CO₂ released from soil into the air contribute to a potential climate change.

In order to figure out the effect of acid rain on the release of soil carbon, an acid rain menace control experiment was carried out on a compound system of *Cunninghamia lanceolata* seedling-soil. The system is sensitive to the acid rain stress in Zhejiang Province and is located in the middle Chinese subtropical areas, which is suffered from the severe acid rain pollution in a long term. The *Cunninghamia lanceolata* seedling-soils constructed in plots were divided into three groups, which represented the severe acid rain treatment ST (pH 2.5), the moderate acid rain treatment MT (pH 4.0) and the check experiment CK (pH 5.6). Then the samples were sprayed by artificial acid rains with different pH values in a green

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40671132);科技部973资助项目(2005CB422207和2005CB422208);科技部国际合作资助项目(20073819),科技部重大科技基础资助项目(2007FY110300),浙江省重大科技专项资助项目(2008C13G2100010);浙江林学院科学发展基金资助项目(2006FR039)

收稿日期:2009-09-24; 修订日期:2009-01-20

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hongjiang1.china@gmail.com

house for 2 years. The artificial acid rain was consisted of H_2SO_4 (98%) and HNO_3 (75%) at the volume ratio of 8:1, and was diluted by pure water into spay solutions, of which pH values were 2.5, 4.0 and 5.6 respectively. The trend of soil acidification and the variation of soil respiration in the seedling-soil system were experimentally analyzed with a response model of soil carbon release developed to simulated acid rain stress. The results showed that (1) the pH-value of soil treated with CK decreased, but the soil-buffer system had not been strongly changed. The mass of hydrogen ion H^+ rushing into soil due to a severe acid rain (pH 2.5) made the pH-value decrease to 3.71. Meanwhile the residual of Ca^{2+} and Mg^{2+} decreased sharply. After which the soil-buffer system changed into aluminum buffer system and the soil was apparently acidified. Moderate acid rain (pH 4.0) did not significantly acidify soil, although the pH-values of soil and the residual of Mg^{2+} in soil slightly dropped. On the other hand, the residual of Ca^{2+} remained $40.15 - 42.76 \mu g \cdot g^{-1}$ (oven-dried soil). (2) The mean annual effluxes of soil carbon of control group did not strongly vary, which were $1.41 \mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ in 2007 and $1.42 \mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ in 2008. The acid rain inhibited the soil respiration of *Cunninghamia lanceolata* seedling-soil mainly in the first 2 years. Compared to CK, the inter-annual effluxes of soil respiration of the conifer seedling-soil sprayed by a severe acid rain (pH 2.5) dropped by 14% and 28% respectively in the two years. Even though the moderate acid rain (pH 4.0) could not make a severe soil acidification, it enhanced the release of soil carbon by 8% in 2007 and reduced the effluxes of soil respiration by 15% in 2008. Moreover, the effect of acid rain on the release of soil carbon became more significant with the prolongation of simulated acid rain.

Key Words: *Cunninghamia lanceolata*; conifer seedling-soil system; simulated acid rain; soil respiration

酸雨一直是我国亚热带地区面临的严重区域污染问题,2005年后呈加重扩大态势^[1]。酸雨危害的主要对象是森林生态系统,常以土壤酸化的方式致植物-土壤复合系统的结构与功能发生改变,其中土壤碳累积与释放功能变化直接与“碳素循环”相关。有研究表明土壤碳通过土壤呼吸作用以 CO_2 的形式进入大气圈将会导致温室效应加剧^[2-3]。

中国亚热带地区森林土壤释放 CO_2 (土壤呼吸,soil respiration, SR)与气候变化的关系已广受关注^[4-6],现有研究广泛采用原位(*in situ*)测定方法,探讨了气温、土壤温度,土壤含水量等与土壤碳释放的动态联系^[7-10]。而关于酸雨对土壤呼吸作用影响的报道尚不多见,但有研究者发现炼油厂排放二氧化硫后造成的土壤污染会抑制土壤呼吸^[11]。Bewley 等和 Pennanen 等分别以 H_2SO_4 和 HNO_3 淋溶土壤后,发现土壤基础呼吸受抑制^[12-13]。因仅对土壤进行了酸化处理,植物-土壤体系碳释放对酸雨的响应是不明确的。此外,在自然状态下影响土壤呼吸的因子间存在复杂的交互作用,准确区分相关效应有很大难度^[14-16],酸雨对土壤呼吸的作用效应有可能被气候因子掩盖。因此,采用胁迫控制方法研究酸雨和植物-土壤碳释放的关系,将有助于深刻认识酸雨对环境的影响。

浙江位于我国中亚热带,全省平均酸雨率超过 80%,酸雨问题十分典型^[17-19]。该省森林覆盖面积高达 57%,显著特点是广种对酸雨敏感的杉木、马尾松,且林地近半数为幼龄林,幼树多。与成年树种相比,幼树对酸雨胁迫的抗性存在差异。并且该省地带性土壤又以易受酸雨酸化的酸性红壤为主,土壤性质易变异^[20-21]。因此,本文在此亚热带典型/代表性地区,以其广泛分布的针叶树种杉木幼苗为研究对象,用盆栽方式建立杉木植物-土壤复合体系,分区组喷淋不同强度的模拟酸雨(Simulated acid rain,SAR)。通过分析 2007—2008 年酸雨与土壤呼吸之间的动态关系,揭示土壤碳释放模式的变化,从而为进一步研究亚热带主要针叶树(或林)-土壤复合系统的土壤碳释放对区域环境问题(酸雨)的响应提供基础数据支持,并丰富区域碳释放研究的资料。

1 方法与材料

1.1 实验地概况

实验温室设于浙江杭州临安市浙江林学院校区($118^{\circ}51' - 119^{\circ}52'E$, $29^{\circ}56' - 30^{\circ}23'N$),占地面积 $20 m^2$ 。

所在地是中纬度北亚热带季风气候,多年年均降水量1407.7 mm,历年平均气温28.1℃。

1.2 实验材料

实验材料包括2年生杉木幼苗和模拟酸雨。杉木(*Cunninghamia lanceolata*)为浙江省主要针叶林构成树种,也是亚热带重要的速生造林树种,喜暖湿气候,适宜在土质疏松,肥厚的酸性、微酸性土壤上生长。临安地区酸雨为硫酸型, $V(\text{SO}_4^{2-}) : V(\text{NO}_3^-) = 8:1$,常年酸雨pH值3.8—4.0,酸雨频率97%,据此用 H_2SO_4 (98%)及 HNO_3 (75%)按 $V(\text{SO}_4^{2-}) : V(\text{NO}_3^-) = 8:1$ 配制成酸雨母液。用水将母液稀释成pH值为2.5、4.0和5.6的3种溶液,分别代表重度酸雨处理(ST),中度酸雨处理(MT)和对照组(CK)。

1.3 喷淋实验设计

实验所取土壤属亚热带红壤类中的黄红壤,按“S”法取自温室附近无凋落物覆盖的裸地表层(0—15cm)土壤,取样点为10点,去石砾,混合均匀后作盆栽栽培土,土壤基本属性见表1。

表1 实验盆栽土壤基本属性

Table 1 The basic physiochemical natures of soil in experimental plot

pH	全氮 Total N/ (g·kg ⁻¹)	有机碳 Organic carbon/ (g·kg ⁻¹)	速效钾 Rapidly available K/ (mg·kg ⁻¹)	速效氮 Rapidly available N/ (mg·kg ⁻¹)	速效磷 Rapidly available P/ (mg·kg ⁻¹)
5.18	7.30	12.4	71.0	57.3	2.91

借鉴酸雨胁迫控制实验^[22-23],2006年春季选长势基本一致的幼苗30株,栽培于22 cm×27 cm的盆中(距盆中心3—5 cm),每盆植苗1株,置半密封式温室常规管理。经2个月恢复生长后,随机将每种幼苗分成3个区组,进行2个不同梯度的酸雨处理(pH值2.5和pH值4.0)和1个对照处理(pH值5.6),每个处理10个重复。每次从叶片开始喷洒模拟酸雨,至其滴液并进入土壤。酸雨喷淋总量按多年平均降水量×酸雨频率计,为1 365 mm。参照临安1959—1980年20a月均降水量分配月喷淋量,分成8次均匀喷淋,适当补水将总加水量调为实际月降水量。

1.4 土壤呼吸测定

于2007—2008年每年4—5月、7—8月、11—12月份,对每区组幼苗随机选取3—5株测定土壤呼吸速率(Efflux,E)。测定前距植物根2—3 cm处将PVC环(直径10 cm)插入土壤2—3 cm,去除环内植物活体及表面凋落物,砸实PVC环防漏气,并保持环在测试期间位置不变。为减小放置PVC环扰动土壤对呼吸速率造成的影响,环插入24 h后再使用LI-8100(LI-COR Inc., Lincoln, NE, USA)配短期叶室(10 cm)置环上测定土壤呼吸速率。每次测定均在喷淋酸雨两天后进行,测定时间定于9:00—12:00,每盆测定时间设为12 min。LI-8100温度探针及适配EC-10土壤水分探头(Decagon Devices Inc., Pullman, WA, USA)同步实时测定土壤表层的温度(Soil temperature, T_s , ℃)(<10 cm)和5 cm处的土壤体积含水量(以土壤相对湿度表示,Soil relative humidity, RH_s , %),便携式温度湿度仪(Testo 608-T1, Testo AG, Lenzkirch, GER)同步测温室气温和空气湿度。

1.5 土壤酸化指标测定

为反映土壤在酸雨作用下的变异情况,每个处理区组随机选择5盆土壤,在测试季节任选一天,距植物基部3—5 cm处,以内径1 cm的土钻(特制)按5点法采集0—10 cm表层土壤,去除粗根,混匀后作为混合土壤样品(400—500 g)。分取200—300 g风干后的土壤制样,过2 mm筛备用。取10 g土壤(20目)参照玻璃电极法使用FE20K酸度计(Mettler-Toledo Inc., Greifensee, Zürich, CH)测土壤pH值(土液比1:2.5)。取1.00 g土样(100目)采用ICP-MS(Agent 7500i, Agilent Technologies Inc., CA, USA)测定残留的交换性 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量。每一指标测定均做3个重复。

1.6 数据分析

采用SPSS 13.0,根据Kolmogorov-Smirnov test及Levene's test检验数据的正态均一性;运用线性或非线性回归分析不同酸雨处理的土壤呼吸速率平均值与酸雨pH值或土壤pH值的关系,one-way ANOVA($\alpha =$

0.05) 及 Dunnett's ($\alpha = 0.05$) 方法检验差异显著性。若土壤性质与土壤呼吸线性不相关时则采用 Pearson 系数 ($\alpha = 0.05$) 判断二者的关系。相关图由 OriginPro 7.0 绘制。

2 结果

2.1 模拟酸雨对土壤酸化状况的影响

2.1.1 土壤 pH 值变化

土壤 pH 值下降是土壤酸化的直接标志, 能有效反映酸沉降下土壤酸化的敏感性。实验初始栽培土是偏酸性的黄红壤 (pH 值 5.18), 对照土壤 pH 值 2007 年先降低 0.38 个单位, 而后恢复到 5.17, 此后降低到 4.74, 土壤 pH 值降低了 0.44, 但土壤缓冲体系未发生显著变化(表 2)。中度酸雨组 (pH 值 4.0) 的土壤 pH 值略低于对照, 且变动趋势与对照一致, 和实验开始时相比没有继续发生进一步的酸化。但是重度酸雨 (pH 值 2.5) 短期内就使大量 H⁺ 进入土壤, 土壤 pH 值持续下降, 2008 年已降到 3.71, 土壤缓冲体系也趋于转成铝缓冲体系 (pH 值 2.8—4.2)。

表 2 模拟酸雨作用下土壤 pH 值的变化

Table 2 The pH-values of seedling-soil system of Chinese fir treated with SAR

酸雨的 pH 值 pH-value of acid rain	土壤 pH 值 pH-value of soil					
	2007 年 Year 2007			2008 年 Year 2008		
	4 月 Apr.	8 月 Aug.	11 月 Nov.	4 月 Apr.	8 月 Aug.	11 月 Nov.
2.5	4.40 *	4.32 *	4.12 *	4.09 *	3.84 *	3.71 *
4.0	4.74	4.77	5.13	4.52	4.71	4.72
5.6	4.80	4.88	5.17	4.50	4.74	4.74

* 代表以 pH 5.6 实验组为对照, 采用 Dunnett's 检验 (检验水平 $\alpha = 0.05$) 有显著差异性 ($P < 0.05$)

2.1.2 土壤酸化特征离子含量的变化

土壤交换性 Ca²⁺、Mg²⁺ 是表征土壤酸化状况的重要盐基离子。当酸雨进入杉木土壤后, 土壤的缓冲作用使土壤 pH 值在中度酸雨影响下保持相对稳定, 如图 1 所示, 土壤残留的交换性 Ca²⁺ 含量维持在 40.15—42.76 μg·g⁻¹ (烘干土), 介于对照组的变动范围内。交换性 Mg²⁺ 含量 2007 年与对照组相近, 2008 年有较明显的下降, 减少比率最大为 30%。在重度酸雨作用下, 土壤交换性 Ca²⁺ 含量下降了 2.3%—6.5%, 交换性 Mg²⁺ 含量低于其它两个处理组, 其中 Ca²⁺ 含量减少与酸雨显著相关 ($F = 5.86, P = 0.039$)。

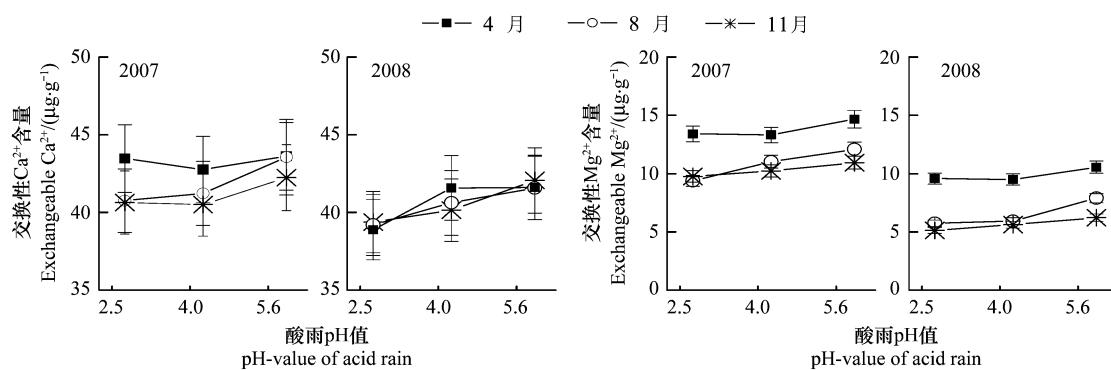


图 1 土壤残留交换性 Ca²⁺ 与 Mg²⁺ 含量变化

Fig. 1 The variation of the residual of exchangeable Ca²⁺ and Mg²⁺ in soil

误差线代表标准偏差 SD

2.2 杉木土壤呼吸对模拟酸雨的响应

据全年数据计算杉木幼苗-土壤复合体系的年均土壤呼吸速率 E 值, 对照组 2007 年年均 E 值为 1.41 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 略低于 2008 年的 1.42 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。中度酸雨组年均 E 值 2008 年较 2007 年下降了 21%,

重度酸雨组则由2007年 $1.21\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 下降到 $1.04\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。与对照组相较,中度酸雨组年均E值先增加了8%,而后降低到 $1.20\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,而重度酸雨组连续下降。不同处理的大小差别为:2007年4.0>pH 5.6>pH 2.5;2008年pH 5.6>pH 4.0>pH 2.5。

不同测试月内,杉木土壤呼吸4月、8月高于11月份(图2)。2007年4月和8月,中度酸雨组土壤呼吸速率较高,而重度酸雨组降低,呈现pH 4.0>pH 5.6>pH 2.5的格局。11月份,中度酸雨组的土壤呼吸速率最低,是 $(0.91\pm0.083)\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。2008年土壤呼吸速率整体上低于2007年,中度酸雨组和重度酸雨组的土壤呼吸均低于对照,除8月外,变化趋势为pH 5.6>pH 4.0>pH 2.5。中度酸雨使土壤呼吸发生显著差异的月份主要在4月份,重度酸雨使其发生显著差异的月份是:2007年4月,2008年4月和11月,尤其11月份,土壤呼吸速率仅是对照的30%,为 $(0.33\pm0.032)\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ($P=0.008, n=8$)。

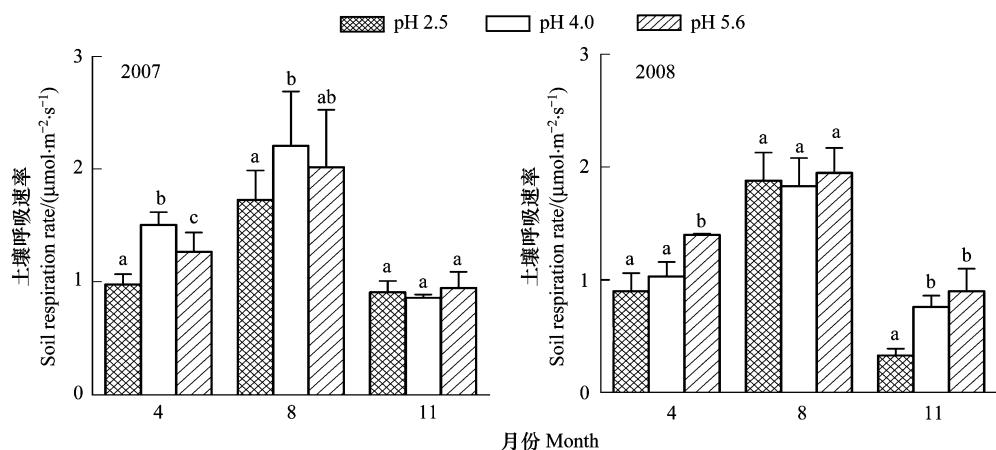


图2 模拟酸雨对杉木幼苗-土壤的土壤呼吸变化的影响

Fig. 2 The variation of soil respiration of Chinese fir seedling-soil system treated with SAR

图中误差线代表标准偏差 SD ,不同字母代表差异显著($\alpha=0.05$)

3 讨论

(1) 实验结果表明,土壤呼吸有明显地季节变化。季节是水热条件的综合反映,可能会掩盖模拟酸雨的作用。因此以年为时间尺度,采用General linear model(Univariate Analysis of Variance)辨析土壤呼吸的水热季节效应与酸雨效应,并通过多元逐步回归方法掌握不同年、季中各因素的作用。如表3所示,水热季节变化对土壤呼吸的影响极显著($P=0.000, n=8$),酸雨效应在2008年极显著($P=0.000, n=8$),但二者对土壤呼

表3 模拟酸雨与季节变化和土壤呼吸的相关性($\alpha=0.05$)

Table 3 The correlation of SAR and seasonal change with SR ($\alpha=0.05$)

Time	土壤温度 $T_s/^\circ\text{C}$			土壤相对湿度 $RH_s/\%$			多元回归 Regression model	R^2	效应分析(显著性 P) Effect analysis (significance P)		
	ST	MT	CK	ST	MT	CK			pH_{SAR}	S	$pH_{SAR} \times S$
2007-04	21.85	23.49	23.35	40.96	39.94	38.11	$E = -1.657 + 0.129 T_s$	0.381	0.074	0.000	0.528
2007-08	29.14	29.15	29.31	82.26	82.07	78.68	$E = -1.455 + 0.118 T_s$	0.258			
2007-11	16.32	15.04	15.59	54.58	53.18	58.19					
2008-04	17.76	18.24	18.84	42.15	43.66	43.41	$E = 0.478 + 0.155 pH$	0.719	0.002	0.000	0.128
2008-08	29.36	27.47	26.75	72.47	70.96	70.02					
2008-11	13.82	15.33	15.08	54.82	55.55	55.44	$E = -0.069 + 0.182 pH$	0.753			

注:ST, MT 和 CK 分别代表重度酸雨处理, 中度酸雨处理和对照处理; R^2 表示回归方程的判定系数;回归方程空白处表示3因素均与土壤呼吸无线性关系;效应分析以年为时间尺度, 值为General linear model(Univariate Analysis of Variance)显著性检验中的概率值, 检验水平为 $\alpha=0.05$; pH_{SAR} 代表酸雨 pH 效应, S 为季节效应, $pH_{SAR} \times S$ 表示酸雨与季节的交互效应; 表中计算所用自由度均是 $n=8$

吸的交互作用并不显著($P = 0.528, n = 8$)。与多项研究结果相似^[24-25],土壤呼吸受土壤温度的驱动影响,2007年呼吸变化的66.1%由其决定($P = 0.002, n = 8$),满足 $E = -0.561 + 0.087Ts$ 的关系。与文献24报道不同,接近饱和的土壤相对湿度对土壤呼吸的作用不明确(Pearson系数 $r = 0.081, P = 0.131, n = 8$)。模拟酸雨的影响逐渐增强,2008年与土壤温度共同解释土壤呼吸92.5%的变化($n = 24$),满足 $E = -1.124 + 0.091Ts + 0.121pH$ 的关系,优于土壤温度单独对其变化的解释($R^2 = 85.4\%, n = 24$)。4月和11月份时曲线模拟已剔除土壤温度与土壤相对湿度的影响,模拟酸雨成为土壤呼吸的主要驱动因素,70.0%以上的土壤呼吸的变异由其变化引起。

(2)非酸雨胁迫下,即对照组土壤呼吸速率相对稳定。模拟酸雨处理后,模拟酸雨对杉木土壤呼吸产生作用,主要是通过两种途径。一是对地上部分即植物幼苗的光合作用施加影响^[26],改变植物的固碳能力,使分配至地下的碳发生变动。在相近实验条件下,已有研究发现植物光合能力受限^[27]。当土壤根系或异养微生物可利用碳源变化后,各自代谢或活性受限的直接表现之一即是土壤呼吸速率的增减^[28]。

其二,模拟酸雨进入土壤后改变了土壤的pH值、化学性质等,导致土壤酸化,进而影响植物根系和土壤微生物的活动。在重度酸雨处理下,杉木土壤pH值随着酸雨作用的持续显著下降。通过曲线估计,2007年土壤pH值与土壤呼吸间呈 $E = -20.898 + 3.112 pH^2 - 0.444 pH^3$ 的三次曲线关系($R^2 = 0.472, n = 9$),2008年为弱指数相关($R^2 = 0.172, n = 9$)。在一定程度上,模拟酸雨通过改变土壤pH值使土壤呼吸发生了改变。一般情况下,土壤微生物能在pH3—8的范围内保持活性,当土壤pH值降低,土壤微生物基础呼吸量和微生物量会不同程度下降,主导土壤微生物利用和转化有机碳的土壤真菌、细菌数量受抑制,微生物总数降低,结果即是土壤有机质分解速率减慢,在一定时间内减少CO₂的产生量^[29-33]。Bååth和Högberg等也证实,微生物生长对土壤pH值存在耐受范围,会对土壤呼吸产生直接影响^[14, 34]。本研究与Rech等的研究结果类同,土壤pH值越低,土壤呼吸速率越低^[35]。但Bewley等也发现土壤酸化(pH < 3)未对土壤呼吸产生影响,原因是土壤中的蒙脱石削弱H₂SO₄的毒性,从而使真菌数量在酸化环境中增长^[12]。

短期处理的中度酸雨(pH 4.0)并未对杉木土壤原来的缓冲体系造成明显冲击,其pH值与对照组相当,但供试土壤本身即为偏酸性可能是一个原因。偏酸性的环境有利于土壤中可溶性有机质的增加,因此中度酸雨在未改变土壤微生物适生pH值条件下,可能通过这种途径提供更多碳源供生物利用,从而表现出土壤有机质的下降和土壤呼吸的增加。Vanhala等即认为SO₂和NO_x污染地区的土壤呼吸受抑制的原因之一与土壤有机碳含量相关^[11]。对土壤有机质含量的测定也发现,2007年土壤有机质含量中度酸雨处理下降31%,而重度酸雨处理组仅下降10%。但目前的研究尚未能建立起土壤有机碳与土壤呼吸的明确关系,需要进一步的实验观测。

致谢:感谢余树全教授的指导,感谢浙江林学院生态中心对实验的协助。

References:

- [1] Zhao Y X, Hou Q. An analysis on spatial/temporal evolution of acid rain in China (1993—2006) and its causes. *Acta Meteorologica Sinica*, 2008, 66 (6): 1032-1042.
- [2] Matthews E. Global litter production, pools, and turnover times: Estimates from measurement data and regression models. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102 (15): 18771-18800.
- [3] Cox P M, Betts R A. Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model. *Nature*, 2000, 408: 184-187.
- [4] Yan J H, Zhang D Q, Zhou G Y, Liu J X. Soil respiration associated with forest succession in subtropical forests in Dinghushan Biosphere Reserve. *Soil Biology & Biochemistry*, 2009, 41 (5): 991-999.
- [5] Yang Y S, Chen G S, Wang X G, Xie J S, Dong B, Li Z, Gao R. Effect of clear-cutting on soil respiration of Chinese fir plantation. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42 (4): 584-590.
- [6] Chang J G, Liu S R, Shi Z M, Chen B Y, Zhu X L. Soil respiration and its components partitioning in the typical forest ecosystems at the transitional area from the northern subtropics to warm temperate, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27 (5): 1791-1802.
- [7] Lovelo C E. Soil respiration and belowground carbon allocation in mangrove forests. *Ecosystems*, 2008, 11(2): 342-354.

- [8] Yi Z G, Fu S L, Yi W M, Zhou G Y, Mo J M, Zhang D Q, Ding M M, Wang X M, Zhou L X. Partitioning soil respiration of subtropical forests with different successional stages in south China. *Forest Ecology and Management*, 2007, 243 (2/3) : 178-186.
- [9] Yan J H, Wang Y P, Zhou G I, Zhang D Q. Estimates of soil respiration and net primary production of three forests at different succession stages in South China. *Global Change Biology*, 2006, 12 (5) : 810-821.
- [10] Yi Z G, Yi W M, Zhou G Y, Zhou L X, Zhang D Q, Ding M M. Soil carbon effluxes of three major vegetation types in Dinghushan Biosphere Reserve. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23 (8) : 1673-1678.
- [11] Vanhala P, Kiikkilä O, Fritze H. Microbial responses of forest soil to moderate anthropogenic air pollution. *Water, Air, & Soil Pollution*, 1996, 86(1/4) : 173-186.
- [12] Bewley R J F, Stotzky G. Simulated acid rain (H_2SO_4) and microbial activity in soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 1983, 15 (4) : 425-429.
- [13] Pennanen T, Fritze H, Vanhala P, Kiikkilä O, Neuvonen S, Bååth E. Structure of a microbial community in soil after prolonged addition of low levels of simulated acid rain. *Applied Environmental Microbiology*, 1998, 64 (6) : 2173-2180.
- [14] Bååth E. Adaptation of soil bacterial communities to prevailing pH in different soils. *FEMS Microbiological Ecology*, 1996, 19 (4) : 227-237.
- [15] Niklińska M, Klimek B. Effect of temperature on the respiration rate of forest soil organic layer along an elevation gradient in the Polish Carpathians. *Biological Fertilized Soils*, 2007, 43 (5) : 511-518.
- [16] Yang J Y, Wang C K. Effects of soil temperature and moisture on soil surface CO_2 flux of forests in northeastern China. *Journal of Plant Ecology*, 2006, 30 (2) : 286-294.
- [17] Lin F M, Jiao L, Sheng K, Wu Y Y. Acid rain pollution and its origin of Hangzhou. *Environmental Monitor Management and Technology*, 2004, 16 (3) : 17-21.
- [18] Mou Y M, Zhu G L. The study of acid rain distribution of Zhejiang Province based on GIS. *Bulletin of Science and Technology*, 2005, 21 (3) : 356-359.
- [19] Song X D, Jiang H, Yu S Q, Zhou G M, Song Y. Spatial distribution and forecast of acid rain in Zhejiang Province. *Environmental Pollution and Protection*, 2009, 31 (1) : 13-16.
- [20] Shan S D, Yu J Y, Yu W. Acid rain and soil ecosystem. *Environmental Science and Natural Resources*, 2000, 8 (2) : 20-23.
- [21] Xu D F, Zhong T X, Xu D M, Liu G S. Effects of acid deposition on soil geochemical cycles. *Geology-Geochemistry*, 2002, 30 (4) : 68-74.
- [22] Byres D P, Dean T J, Johnson J D. Long-term effects of ozone and simulated acid rain on the foliage dynamics of slash pine (*Pinus elliottii* var. *elliottii* Engelm.). *New Phytologist*, 1992, 120 (1) : 61-67.
- [23] Qi Z M. Effect of Simulated Acid Rain on Eco-physiological Characteristics of *Eucommia ulmoides* Oliv. Chongqing: Southwest Normal University, 2001 : 52.
- [24] Chang S C, Tseng K H, Hsia Y J, Wang C P, Wu J T. Soil respiration in a subtropical montane cloud forest in Taiwan. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, 148 (5) : 788-798.
- [25] Almagro M, López J, Querejeta J I, Martínez M. Temperature dependence of soil CO_2 efflux is strongly modulated by seasonal patterns of moisture availability in a Mediterranean ecosystem. *Soil Biology & Biochemistry*, 2009, 41 (3) : 594-605.
- [26] Jiang F W, Jiang H, Li W, Lu M J, Li J, Jin Q, Wang Y H, Cao Q. Effects of acid rain stress on physiological characters of *Lindera megaphylla* Hemsl. seedlings in summer and autumn. *Ecology and Environment*, 2008, 17 (6) : 2374-2380.
- [27] Jin Q, Jiang H, Yu S Q, Jin J, Wang Y H. Research on the growth and photosynthesis of typical seedlings in subtropical regions under acid rain stress. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29 (6) : 3322-3327.
- [28] Zhao Y T, Li X F, Han S J, Hu Y L. Soil enzyme activities under two forest types as affected by different levels of nitrogen deposition. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19 (12) : 2769-2773.
- [29] Six J, Frey S D, Thiet R K, Batten K M. Bacterial and fungal contributions to carbon sequestration in agro-ecosystems. *Soil Science Society America Journal*, 2006, 70 : 555-569.
- [30] Yang X H, Nie C R, Mai Z M. Effect of acid rain on the main microbial strains of peanut soil in South China. *Journal of Peanut Science*, 2004, 33 (2) : 26-29.
- [31] Zhang P H. Effect of Simulated Acid Rain on Physical-Chemical Properties, Microorganisms, Biological Activities in Soil and Chinese Medicine Herbs. Hangzhou: Zhejiang University, 2004 : 19-20.
- [32] Fontaine S, Mariotti A, Abbadie L. The priming effect of organic matter: A question of microbial competition?. *Soil Biology & Biochemistry*, 2003, 35 (6) : 837-843.
- [33] Zimmermann S, Frey B. Soil respiration and microbial properties in an acid forest soil: effects of wood ash. *Soil Biology & Biochemistry*, 2002, 34 (11) : 1727-1737.
- [34] Höglberg M N, Bååth E, Nordgren A, Arnebrant K, Höglberg P. Contrasting effects of nitrogen availability on plant carbon supply to mycorrhizal

- fungi and saprotrophs-A hypothesis based on field observations in boreal forest. *New Phytologist*, 2003, 160 (1): 225-238.
- [35] Reth S, Reichstein M, Falge E. The effect of soil water content, soil temperature, soil pH-value and the root mass on soil CO₂ efflux-A modified model. *Plant and Soil*, 2005, 268 (1): 21-33.

参考文献:

- [1] 赵艳霞,侯青. 1993—2006年中国区域酸雨变化特征及成因分析. *气象学报*, 2008, 66 (6): 1032-1042.
- [5] 杨玉盛,陈光水,王小国,谢锦升,董彬,李震,高人. 皆伐对杉木人工林土壤呼吸的影响. *土壤学报*, 2005, 42 (4): 584-590.
- [6] 常建国,刘世荣,史作民,陈宝玉,朱学凌. 北亚热带-南暖温带过渡区典型森林生态系统土壤呼吸及其组分分离. *生态学报*, 2007, 27 (5): 1791-1802.
- [10] 易志刚,蚁伟民,周国逸,周丽霞,张德强,丁明懋. 鼎湖山三种主要植被类型土壤碳释放研究. *生态学报*, 2003, 23 (8): 1673-1678.
- [16] 杨金艳,王传宽. 土壤水热条件对东北森林土壤表面CO₂通量的影响. *植物生态学报*, 2006, 30 (2): 286-294.
- [17] 林丰妹,焦荔,盛侃,吴意跃. 杭州市酸雨污染现状及成因分析. *环境监测管理与技术*, 2004, 16 (3): 17-21.
- [18] 牟永铭,朱光良. 基于GIS技术的浙江省酸雨区分布研究. *科技通报*, 2005, 21 (3): 356-359.
- [19] 宋晓东,江洪,余树全,周国模,宋瑜. 浙江省酸雨的空间分布格局及其未来变化趋势预测. *环境污染与防治*, 2009, 31 (1): 13-16.
- [20] 单胜道,俞劲炎,于伟. 酸雨与土壤生态系统. *生态农业研究*, 2000, 8 (2): 20-23.
- [21] 许第发,钟天祥,徐冬梅,刘广深. 酸沉降对土壤地球化学过程的影响. *地质地球化学*, 2002, 30 (4): 68-74.
- [23] 齐泽民. 模拟酸雨对杜仲的生理生态特性的影响. 重庆: 西南师范大学, 2001: 52.
- [26] 蒋馥蔚,江洪,李巍,鲁美娟,李佳,金清,王艳红,曹全. 酸雨胁迫下黑壳楠 *Lindera megaphylla* Hemsl. 幼苗在夏季和秋季的生理生态特性. *生态环境*, 2008, 17 (6): 2374-2380.
- [27] 金清,江洪,余树全,金静,王艳红. 酸雨胁迫对亚热带典型树种幼苗生长与光合作用的影响. *生态学报*, 2009, 29 (6): 3322-3327.
- [28] 赵玉涛,李雪峰,韩士杰,胡艳玲. 不同氮沉降水平下两种林型的主要土壤酶活性. *应用生态学报*, 2008, 19 (12): 2769-2773.
- [30] 杨宣华,聂呈荣,麦焯棉. 华南地区酸雨对花生土壤微生物的影响. *花生学报*, 2004, 33 (2): 26-29.
- [31] 张萍华. 模拟酸雨对土壤理化性质、微生物和生物活性及中药的影响. 杭州: 浙江大学, 2004: 19-20.