

模拟酸雨胁迫对马尾松和杉木幼苗土壤呼吸的影响

谢小赞¹, 江 洪^{1,2,*}, 余树全¹, 刘源月², 原焕英¹, 李雅红³

(1. 浙江林学院国际空间生态与生态系统生态研究中心, 杭州 311300; 2. 南京大学国际地球系统科学研究所, 南京 210093;

3. 西南大学三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400715)

摘要: 利用 LI-8100 测定模拟酸雨不同处理下 (pH2.5、4.0 和 5.6) 盆栽马尾松 (*Pinus Massoniana*) 和杉木幼苗 (*Cunninghamia lanceolata*) 的土壤呼吸速率及土壤温度、含水量, 研究酸雨对其土壤呼吸的影响。结果表明: 模拟酸雨喷淋下马尾松和杉木土壤 pH 值呈现下降的趋势且下降幅度同酸雨酸度呈现正相关性; 马尾松和杉木各个处理下土壤呼吸速率季节变化显著, 且同地下 10cm 土壤温度季节变化趋势一致, pH2.5 处理下的土壤呼吸速率平均值分别为 $1.79 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $1.12 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 比对照组 (pH5.6) 土壤呼吸速率平均值 $1.57 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $1.54 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 分别高 14% 和低 39%; 马尾松和杉木各个处理下土壤呼吸速率同 10cm 土壤温度之间均呈现显著的指数关系 ($P < 0.001$), 与 5cm 土壤含水量之间相关性不明确; 在 $P = 0.05$ 水平上进行多元回归分析, 可以得到土壤呼吸速率同土壤温度和含水量的综合拟合方程, 和单因素 (温度、含水量) 拟合相比能够更好地解释土壤呼吸的变化情况; 马尾松和杉木在 pH2.5 和 4.0 处理下的土壤呼吸温度系数 Q_{10} 值分别为 1.36、2.01 和 1.51、2.25, 同对照组 1.14 和 1.58 相比, 均有明显差异, 且两者 Q_{10} 值的变化呈先增大后减小的趋势。这证明酸雨是影响马尾松和杉木土壤 CO_2 通量的一个重要因素。

关键词: 模拟酸雨; 土壤呼吸; 马尾松; 杉木; Q_{10} 值

文章编号: 1000-0933(2009)10-5713-08 中图分类号: Q142, Q945, S154.1, S718.5 文献标识码: A

Effect of simulated acid rain on soil respiration of *Pinus massoniana* and *Cunninghamia lanceolata*

XIE Xiao-Zan¹, JIANG Hong^{1,2,*}, YU Shu-Quan¹, LIU Yuan-Yue², YUAN Huan-Ying¹, LI Ya-Hong³

1 International Research Center of Spatial Ecology and Ecosystem Ecology, Zhejiang Forestry University, Hangzhou 311300, China

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

3 Key Laboratory of Ecological Environment in Three-Gorges Reservoir Area, Ministry of Education, Southwest University, Chongqing 400715, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(10): 5713 ~ 5720.

Abstract: In order to understand the impact of acid rain on soil respiration of *Pinus massoniana* and *Cunninghamia lanceolata*, a field study with 3 simulated acid rain levels (pH 2.5, 4.0 and 5.6) were conducted. Measurement of soil respiration was made using a LI-8100 soil CO_2 efflux system, the soil temperature at 10 cm depth and soil moisture at 5 cm depth also were recorded at the same time. Results show that: (1) The soil pH values for *P. massoniana* and *C. lanceolata* decreased with the increase of rain acidity; (2) The soil respiration of *P. Massoniana* and *C. lanceolata* under different acid rain levels fluctuated with distinct seasonal patterns and the soil respiration rate was influenced significantly by soil temperature. The mean rate of soil respiration under pH2.5 level were 1.79 and $1.12 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, and increased 14% and decreased 39% under control level (pH5.6) respectively. (3) Significant relationships between soil respiration and soil temperature at 10 cm under different acid rain levels of *P. massoniana* and *C. lanceolata* were found, which could be best described by exponential equations. However, the relationships between soil respiration and soil moistures at 5 cm

基金项目: 国家科技部 973 资助项目 (2005CB422207, 2002CB111504, 2002CB410811, 2005CB422208); 国家自然科学基金资助项目 (40671132); 国家科技部数据共享平台建设资助项目 (2006DKA32300-08); 国家科技部国际合作资助项目 (200073819); 国家科技基础性工作专项资助项目 (2007FY110300-08)

收稿日期: 2009-04-03; 修订日期: 2009-07-08

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

depth were found in all levels are not significant. The relationships between soil respiration and soil temperature at 10 cm and soil moisture at 5 cm depth were described by multiple regression equation. The regression equations had more predicative capability than those using only temperature or moisture as a single independent variable. (4) The Q_{10} (temperature sensitivity coefficient of soil respiration) values at pH 2.5 and 4.0 levels of *P. Massoniana* and *C. lanceolata* were 1.36, 2.01 and 1.51, 2.25, respectively. Compared with which at control level, the Q_{10} values tended to increase with rain acidity (pH4.0), and then (pH2.5) decreased. The results indicated that acid rain is an important factor in affecting soil CO_2 efflux of *P. Massoniana* and *C. lanceolata*.

Key Words: simulated acid rain; soil respiration; *Pinus massoniana*; *Cunninghamia lanceolata*; Q_{10} value

土壤呼吸是指土壤向大气释放 CO_2 的过程,包括植物根系呼吸、土壤微生物呼吸、土壤动物呼吸以及土壤碳矿物质的化学氧化部分,其中根系呼吸约占土壤呼吸的 30% ~ 90% 左右^[1,2]。土壤呼吸是陆地生态系统碳循环的主要组成部分,也是土壤碳库的主要输出途径,可占到生态系统呼吸总量的 60% ~ 90%^[3],其微小变化不但会引起大气中 CO_2 浓度的明显改变,更会影响森林土壤贮存 C 能力^[4]。酸雨指 pH 值小于 5.6 包含降雨、降雪、冰雹等各种形式的降水^[5],酸雨不仅污染湖泊、河流,腐蚀建筑物,损害动植物,严重影响土壤和森林生态系统,而且对人类健康和社会的可持续发展也造成了不可估量的影响^[6~9]。随着工业革命以来工业化进程的不断推进,大量化石燃料的燃烧利用以及对森林植被的不断破坏,使得酸雨出现的频率和强度也日渐增加,逐渐成为世界性的环境问题。中国南方地区已成为继欧洲和北美之后的世界第三大酸雨区^[10],浙江省的酸雨污染尤为严重,据浙江省环境监测中心站统计,2003 年浙江省降水 pH 年均值为 4.5,平均酸雨率为 84.6%,且分布面积呈逐渐扩大的趋势^[11,12]。

酸雨范围的增加及其强度的加强势必会影响地区生态系统的结构和功能。目前酸雨对土壤影响的研究已有大量报道,如:在模拟酸雨喷淋下,土壤可溶性 Al 和 Mn 含量升高,可能会对植物生长造成抑制^[13];在酸雨量较大(2000mm)、酸度较高(pH < 3.5)时,土壤酶活性会随着降雨酸度的增加而降低,抑制效应明显^[14]。但在酸根离子大量输入的情况下,对土壤呼吸释放强度的变化的研究尚未见报道。马尾松(*Pinus massoniana*)和杉木(*Cunninghamia lanceolata*)是浙江省森林的主要组成树种,两者组成的林地占浙江省乔木林地面积的 50% 以上^[15],其巨大的覆盖面积使得其对区域碳平衡有着重要影响。本试验通过模拟不同 pH 酸雨处理来研究其对马尾松和杉木土壤呼吸的影响,并探讨土壤水热因子与土壤呼吸间的关系,试图为在酸雨胁迫下估计该地区针叶林碳收支提供科学数据和参数。

1 试验地概况

试验地设在浙江省杭州临安市浙江林学院东湖校区(119°42'E, 30°14'N),属中纬度北亚热带季风气候,温暖湿润,四季分明,年平均降雨量 1400mm,年平均气温为 15.8℃。根据临安地区酸雨的监测资料和自然降水化学成分的测定结果^[12],设置 pH5.6、4.0 和 2.5 共 3 个处理, pH5.6 设为对照(CK)。模拟酸雨按 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{:HNO}_3$ 体积分数 8:1 的比例配制母液,再用蒸馏水进行稀释配制。于 2006 年 6 月下旬选取其长势一致的马尾松和杉木 2 年生小苗,移植于内径 22cm,高 27cm 的花盆中,每个处理分别种植 15 盆植株,置于大棚内,上有塑料薄膜用以遮挡自然降水。盆内土壤是当地的黄红壤,经实验室分析,移植土壤平均 pH 值为 5.2,速效磷、速效钾及速效氮含量分别为 4.37、42.75mg/kg 和 107.88mg/kg,全氮含量为 0.067%。从 2006 年 7 月开始喷淋,实验喷淋年酸雨总量按多年平均降雨量 × 酸雨频率,年平均为 1372mm。参照浙江临安地区 20a 月均降雨量,分配酸雨溶液月喷淋量,月均酸雨量分成 8 次均匀喷淋。

2 研究方法

2.1 土壤呼吸速率及土壤 pH 值的测定

分别于 2007 ~ 2008 年的 5、7 月和 11 月份共进行 6 期试验,利用 LI-8100 开路式土壤碳通量测量系统测

定模拟酸雨胁迫下马尾松和杉木幼苗的土壤呼吸速率。在测定前将直径 10cm 的 PVC 环插入土壤 2cm 左右,将环内的植物活体去除,砸实 PVC 环防止漏气,并保持环在整个试验期间位置不变。测定在插入 PVC 环 24h 后进行,因为经过 24h 后土壤呼吸速率会逐步恢复到 PVC 环插入前的水平,减少放置 PVC 环对土壤扰动而对呼吸速率造成的影响。测定时将 LI-8100 的短期测量室置于 PVC 环之上并用其携带的温湿度探针同步测定地表下 10cm 处土壤温度及 5cm 处含水量。每种植物每个梯度选取 3 个植株进行测量,即采取 3 个重复,每次测定均是在喷洒酸雨两天后进行。

土壤 pH 值的测定是在喷淋模拟酸雨 1a 后开始测定,分别在 2007 年 11 月和 2008 年 5、8 月对马尾松和杉木每个处理进行取土,带回实验室进行分析测定。

2.2 数据的分析

本论文用 SPSS13.0 对数据进行处理分析, Sigmaplot10.0 辅助作图。利用 One-Way ANOVA 检验马尾松和杉木不同模拟酸雨处理及种间土壤呼吸速率的差异显著性,以及回归分析方法建立土壤温度、湿度与土壤呼吸之间的统计关系。

土壤呼吸速率与土壤温度之间关系采用指数模型: $y = ae^{bt}$ 。式中, y 为土壤呼吸; a 为温度为 0℃ 时的土壤呼吸^[16]; b 为温度反应系数; t 为温度。 Q_{10} 值通过下式确定^[17]: $y = e^{10b}$, b 为温度反应系数。

3 结果

3.1 模拟酸雨处理下土壤 pH 值的变化

在模拟酸雨持续喷淋下,马尾松和杉木的土壤 pH 值变化如图 1 所示,随着时间的推移,各个酸雨处理下土壤的 pH 值都呈现下降的趋势,且酸雨酸度越大,其值越小,其中最小的 pH 值出现在 2008-08 期杉木 pH2.5 处理,为 3.84;最大的 pH 值为 2007-11 期杉木 CK 处理,为 5.49。通过统计分析,两树种各处理土壤 pH 值在 2007-11 期分别同 2008-05、2008-07 两期处理间存在显著差异 ($P < 0.05$)。

3.2 土壤呼吸速率季节动态变化

马尾松和杉木的土壤呼吸速率呈现出明显的季节性,在测试时间内呈现单峰曲线(图 2),7 月份的土壤呼吸速率比 5 月份和 11 月份都要大,这与 10cm 土壤温度的变化趋势基本是相吻合的(图 3)。计算马尾松和杉木 3 个处理土壤呼吸速率均值,分别为 1.79、1.47、1.57 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 1.12、1.33、1.54 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,马尾松 pH2.5 处理下的土壤呼吸速率要大于 CK,而杉木恰恰相反。对马尾松和杉木模拟酸雨 3 个处理下的土壤呼吸速率进行方差分析,表明马尾松 pH2.5 处理与 CK、pH4.0 处理与 CK 间存在着显著差异 ($P < 0.05$);杉木 pH2.5 处理与 pH4.0 处理、pH2.5 处理与 CK 的土壤呼吸速率存在显著差异 ($P < 0.05$)。除开上述不同处理组间的差异外,对马尾松和杉木两树种相同处理进行比较,发现两者 pH2.5 和 pH4.0 处理下存在显著差异 ($P < 0.05$),CK 差异不显著。

对马尾松和杉木模拟酸雨 3 个处理下的土壤呼吸速率进行方差分析,表明马尾松 pH2.5 处理与 CK、pH4.0 处理与 CK 间存在着显著差异 ($P < 0.05$);杉木 pH2.5 处理与 pH4.0 处理、pH2.5 处理与 CK 的土壤呼吸速率存在显著差异 ($P < 0.05$)。除开上述不同处理组间的差异外,对马尾松和杉木两树种相同处理进行比较,发现两者 pH2.5 和 pH4.0 处理下存在显著差异 ($P < 0.05$),CK 差异不显著。

3.3 土壤呼吸速率与温度的关系

模拟酸雨处理下马尾松和杉木的土壤呼吸速率同土壤温度之间的关系密切,呈现显著的指数相关 ($P < 0.001$),如图 4 所示。

从各个关系式决定系数 R^2 来看,随着酸雨酸度的增加,马尾松土壤呼吸的 R^2 值增大,杉木变化情况相反。

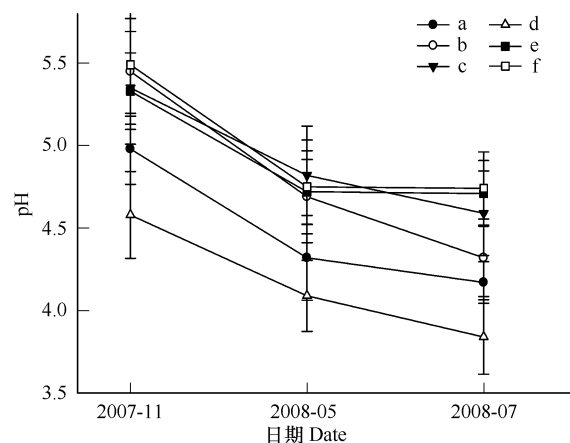


图 1 模拟酸雨影响下马尾松和杉木土壤 pH 值的变化

Fig. 1 The soil pH value changes of *P. massoniana* and *C. lanceolata* under simulated acid rain

a, b, c, d, e, f 分别为马尾松 pH2.5、4.0、5.6 和杉木 2.5、4.0、5.6 处理 a, b, c, d, e, f pH2.5、4.0、5.6 levels of *P. massoniana* and *C. lanceolata*

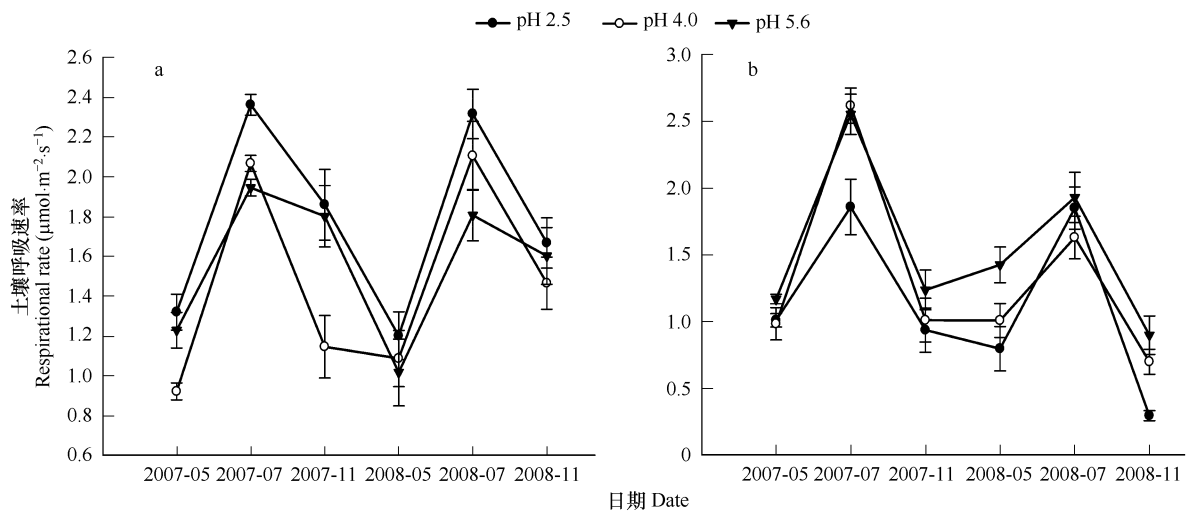


图2 模拟酸雨3个梯度下马尾松(a)和杉木(b)土壤呼吸速率的季节变化

Fig. 2 Seasonality changes of soil respiration of *P. massoniana* (a) and *C. lanceolata* (b) under simulated acid rain

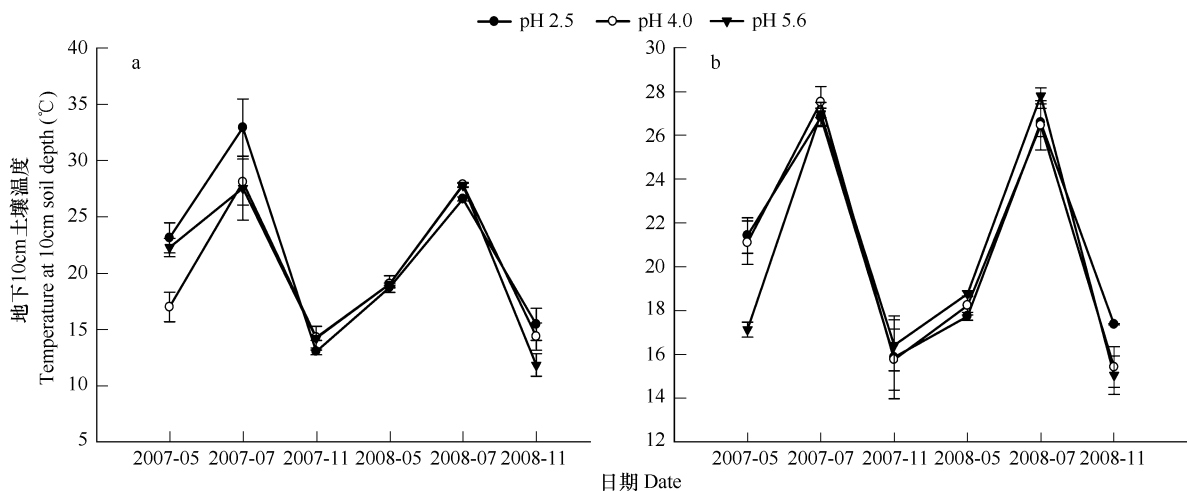


图3 模拟酸雨3个梯度下马尾松(a)和杉木(b)土壤温度的季节变化

Fig. 3 Seasonality changes of soil temperature of *P. massoniana* (a) and *C. lanceolata* (b) under simulated acid rain

3.4 土壤呼吸速率与土壤水分的关系

马尾松和杉木地下5cm处湿度的变化范围分别为15.86%~41.59%和19.02%~48.13%。如图4所示,除马尾松pH4.0处理下其土壤呼吸速率与湿度呈现指数关系外,其余处理都呈现二次方程关系。马尾松pH4.0处理以及杉木pH2.5和4.0的处理下土壤湿度同土壤呼吸速率间呈现显著相关关系,其余处理下不显著。所有处理下其决定系数 R^2 值都小于0.5。

3.5 土壤呼吸速率与环境因子关系的多元回归分析

鉴于土壤呼吸与温度之间的指数关系以及土壤含水量之间关系,以10cm土壤温度和5cm土壤含水量为变量,采用多元线性回归中的stepwise方法,在95%的置信区间内,分析土壤呼吸速率与两变量间的关系,得到线性模型,结果见表1。

从表1可以看出土壤呼吸速率受土壤温度与含水量的共同影响,但马尾松和杉木植物在不同酸雨浓度处理下其土壤呼吸受温度和湿度的影响程度不一样,pH5.6处理下的马尾松土壤呼吸速率同土温和土壤含水量拟合曲线能够解释土壤呼吸77.2%的变化情况,杉木pH2.5、4.0和5.6处理下的拟合曲线分别能够解释土

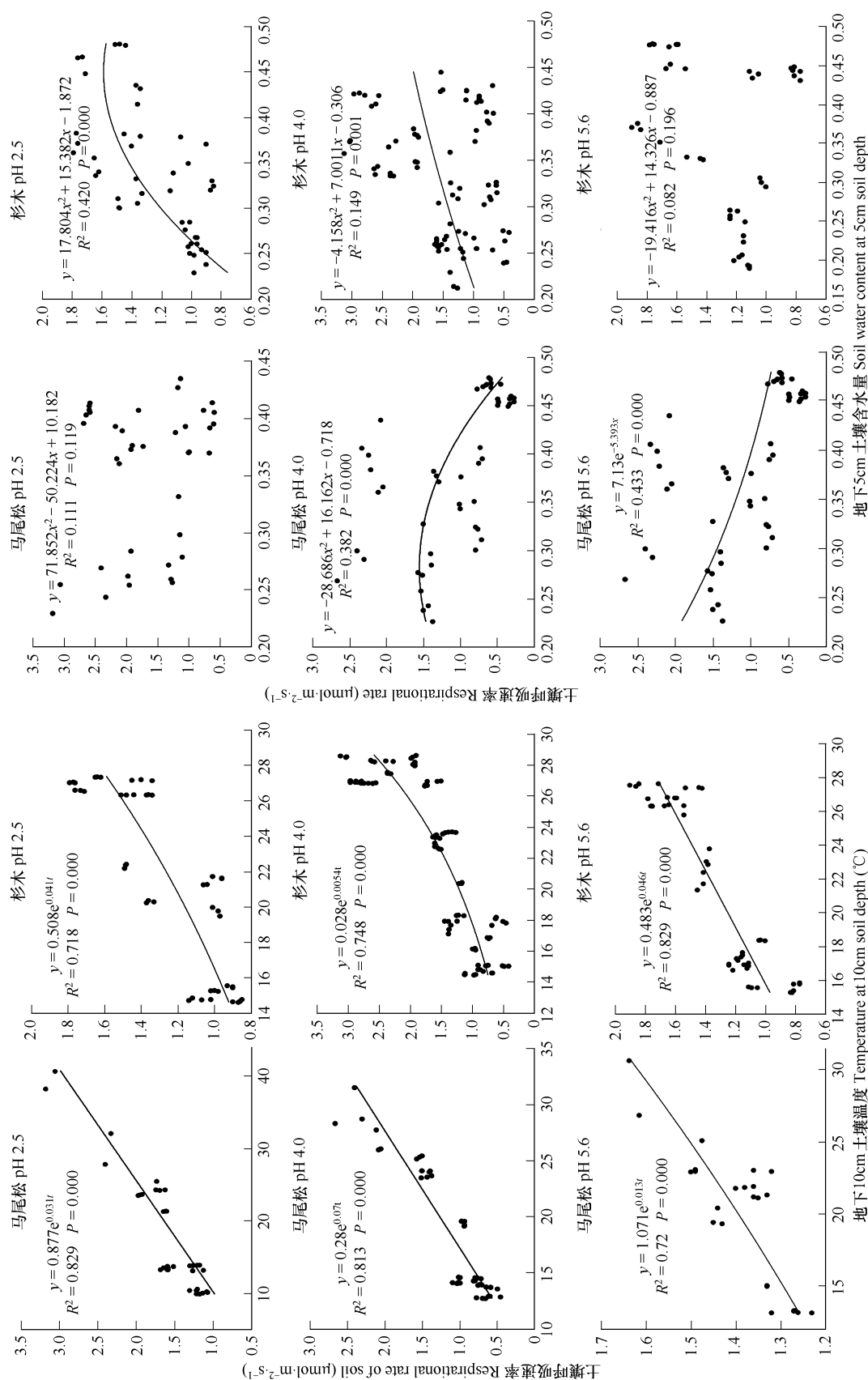


图 4 模拟酸雨 3 个梯度马尾松和杉木土壤呼吸速率与土壤温度和土壤含水量的关系

Fig 4 The relationship of soil respiration between soil temperature and water content

壤呼吸 73.4%、78.7% 和 83.3% 的变化情况, 这比只考虑土壤温度一个因素的模型要好, 但用各个自变量的偏回归系数检验表明, 土壤含水量的偏回归不显著, 即其在此多元回归方程中不起显著作用, 如马尾松 pH2.5 和 4.0 处理下土壤含水量在拟合时被剔除, 模拟方程中只有土壤温度一个变量。

表 1 模拟酸雨 3 个梯度下马尾松和杉木土壤呼吸与土壤温度和含水量的多元回归方程

Table 1 Results of regression in common among soil temperature and soil water and soil respiration of *Pinus massoniana* and *C. lanceolata* under three different levels of simulated acid rain

树种 Species	处理 Treatment	变量 Variables		常数 Constant	R^2	Sig.	回归 Regression	剩余 Residual
		T	M					
马尾松 <i>P. massoniana</i>	pH2.5	0.057		0.576	0.849	0.000	7.730	1.374
	pH4.0	0.087		-0.481	0.824	0.000	11.076	2.364
	pH5.6	0.014	0.594	0.975	0.772	0.000	0.219	0.065
杉木 <i>C. lanceolata</i>	pH2.5	0.043	0.900	0.029	0.734	0.000	3.060	1.107
	pH4.0	0.119	2.410	-1.847	0.787	0.000	43.197	11.675
	pH5.6	0.014	0.594	0.975	0.833	0.000	0.219	0.065

3.6 Q_{10} 值的变化

Q_{10} 常用来表示土壤呼吸对于温度变化反应的敏感程度^[17]。本试验中, 模拟酸雨 pH2.5、4.0 和 5.6 处理下的马尾松和杉木 Q_{10} 值分别为 1.36、2.01、1.14 和 1.51、2.25、1.58。随着酸雨酸性的增加, Q_{10} 值呈现出先增大后减小的抛物线趋势。

4 讨论

4.1 模拟酸雨对两树种土壤呼吸速率的影响

黄承才^[18]研究中国东部亚热带的浙江诸暨马尾松人工林时推算其平均土壤呼吸速率为 $1.81 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 方晰等^[19]在位于中国中部亚热带的湖南会同研究推算杉木人工林的平均土壤呼吸速率为 $1.67 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。在本试验中, 马尾松和杉木对照组土壤呼吸速率平均值分别为 1.57 和 $1.54 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 两者无显著差异。

Hutchinson 等^[20]研究表明土壤在短期内对酸雨具有一定的缓冲能力, 但在长期酸雨作用下, 对土壤缓冲体系持续作用, 其 pH 值会明显下降, 本试验中盆栽所用黄红壤在酸雨喷淋后 1~2a 其 pH 值持续下降, 与此研究结果一致。酸雨还会使土壤中的微生物数量下降, 周崇莲等^[21]通过对土壤中重要起分解作用的细菌数量和组成进行分析, 发现重酸雨区马尾松林下土壤中的细菌数比轻酸雨和清洁区分别减少 6 倍和 15 倍, 杉木林下减少 4 倍。高太忠等^[22]研究表明酸雨会增加硝态氮的流失, 而速效磷、速效钾对酸雨不敏感。在本试验中喷淋 pH2.5 和 4.0 的模拟酸雨后马尾松和杉木土壤呼吸速率均值分别为 1.79 、 $1.47 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 1.12 、 $1.33 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 与对照组的 $1.57 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $1.54 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 相比, 杉木呈现逐渐下降的趋势, 而马尾松则是先降低再上升。两个树种同一 pH 值处理下相比较, 马尾松在 pH2.5 和 4.0 处理下的土壤呼吸速率要显著大于杉木 ($P < 0.05$)。马尾松土壤呼吸速率在 pH2.5 处理下较对照大的原因可能是马尾松根系短期内对酸雨的耐受性较强, Burton 等^[23]和 Chapin 等^[24]研究认为根细胞中维持蛋白质周转和溶质梯度所消耗的能量占根系维持呼吸的绝大部分, 如果根系组织中的氮含量保持不变, 那么根系呼吸也不会发生变化, 而酸雨中的 NO_3^- 的施肥作用恰恰增加了马尾松根系细胞的氮含量^[25], 进而使得地下的土壤呼吸速率加强, 但随着酸雨强度的增大和时间的推移, 土壤营养元素淋失将更为严重, 使得这种加速作用可能成为一种短期行为^[26], 不过这还需要进行进一步的观测证实。

4.2 土壤水热条件对两树种土壤呼吸速率的影响

许多研究^[19,27,28]表明土壤呼吸作用受到土壤温度、含水量等多种环境因子的共同调控。土壤呼吸与土下 5~10cm 温度的关系大都可以用一个指数模型来表示, 但与土壤含水量间的规律不明显。方晰等^[19]对亚热带地区湖南会同的杉木人工林研究表明土壤呼吸与温度在一定范围内呈一元线性正相关关系, 黄承才^[18]

研究表明浙江省马尾松林土壤呼吸与土下 5cm 温度之间存在显著的乘幂关系。Davidson 等^[29]对 Harvard Forest 的温带混交林研究表明,当土壤体积含水量 < 12% 时,土壤呼吸速率与土壤含水量呈正相关;土壤体积含水量 > 12% 时,二者呈负相关。杨金艳等研究东北森林时也发现在一定温度范围内,随着湿度的增高土壤呼吸速率也相应增大,但是到达一个阈值后,便呈现负相关性^[30]。也有其它试验证明了土壤温度对土壤呼吸的影响^[16,31]。本试验中土壤温度是影响土壤呼吸的主要环境因子,土壤呼吸速率同地下 10cm 温度之间呈现显著的指数相关,但同地下 5cm 含水量间的关系不是很明确。

4.3 模拟酸雨对两树种 Q_{10} 的影响

随着酸雨酸性的增加, Q_{10} 值呈现出先增大后减小的抛物线趋势,表明可能存在一个酸度阈值,在达到阈值前土壤呼吸对温度的敏感度随着酸雨酸性的增加而增大,在过了阈值后则敏感度减小。推测原因可能是由于土壤 pH 的改变引起根系呼吸强度、土壤酶活性的不同而导致 Q_{10} 值的差异性变化。另外马尾松各个处理下的土壤呼吸速率虽然要比杉木大,但其 Q_{10} 值要比杉木小,表明杉木对温度的敏感性要比马尾松高。

本文研究了在模拟酸雨对马尾松和杉木土壤呼吸的影响以及其同土壤温度、含水量等水热因子间的关系,但未对酸雨作用下土壤理化性质发生的变化进行监测分析。在未来还需要对土壤酶活性、根系生物量等数据进行同步测定,以使研究结果能够更好地说明酸雨对土壤呼吸带来的综合反应和作用。

References:

- [1] Goulden M L, Munger J W, Fan S M, *et al.* Measurements of carbon sequestration by long-term eddy covariance: methods and a critical evaluation of accuracy. *Global Change Biology*, 1996, 2(3): 169—182.
- [2] Law B E, Falge E, Gu L, *et al.* Environmental controls over carbon dioxide and water vapor exchange of terrestrial vegetation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 113(1-4): 97—120.
- [3] Schimel D S, House J I, Hibbard K A, *et al.* Recent patterns and mechanisms of carbon exchange by terrestrial ecosystems. *Nature*, 2001, 414: 169—172.
- [4] Dixon R K, Solomon A M, Brown S, *et al.* Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science*, 1994, 263: 185—190.
- [5] Smith W H. Air pollution and forests-Interactions between air contaminants and forest ecosystems. New York: Springer-Verlag, 1981, 178—191.
- [6] Hirano Y, Hijii N. Effects of low pH and aluminum on root morphology of Japanese red cedar saplings. *Environmental Pollution*, 1998, 101(3): 339—347.
- [7] Huo S X. Acid rain harm to human health. *Medicine&health Care*, 2004, 7:48.
- [8] Yang X C, Zhu Y P. Effects of Acid Deposition on soil Chemical Properties. *Envirment of Sichuang*, 1995, 14(1): 6—9.
- [9] Feng Z W. Impacts and control strategies of acid deposition on terrestrial ecosystems in China. *Engineering Science*, 2000, 2(9):6—11.
- [10] Ren R. On acid rain in China past, present and its future. *Journal of Beijing Polytechnic University*, 1997, 23(3):129—132.
- [11] Li Z G. The temporal and spatial distribution, causes and trends of acid rain in Zhejiang Province. *Environmental Pollution & Control*, 1988, 4: 10—15.
- [12] ZheJiang Provence envirmint protection bureau. *Zhejiang Provincial Environmental Quality Report(2001—2005)*. Hangzhou, 2006.
- [13] Liu J X, Zhou G Y, *et al.* The cumulative effects of acid rain on the soil and response of *Schima superb* at Dinghushan. *China Environmental Science*, 2003, 23(1)90—94.
- [14] Ling D J, Zhang J E, Ouyang Y. Advancements in Research on Impact of Acid Rain on Soil Ecosystem: A Review. *Soil*, 2007, 39(4): 514—521.
- [15] Wang J X, Yao J H, Nin R Y. *Zhejiang province forest*. Beijing: China Forestry Publishing House, 1993.
- [16] Luo Y, Wan S, Hui D, *et al.* Acclimatization of soil respiration to warming in a tall grass prairie. *Nature*, 2001, 413: 622—625.
- [17] Xu M, Qi Y. Spatial and seasonal variation of Q_{10} determined by soil respiration at a Sierra Nevada forest. *Global Biogeochemical Cycles*, 2001, 15(3): 687—696.
- [18] Huang C C. Research of Soil Respiration of *Pinus massoniana* in Zhejiang Province. Shaoxing University, 1999, 19(5):65—69.
- [19] Fang Xi, Tian D L, Xiang W H, *et al.* Soil CO₂ release rate and its effect factors in Chinese Fir plantation. *Scientia Silvae Sinicae*, 2005, 41(2): 1—7.
- [20] Hutchinson T C, Watmough S A, Sager E P S, *et al.* The impact of simulated acid rain and fertilizer application on a mature sugar maple (*Acer Saccharum* Marsh) forest in central Ontario, Canada. *Water, Air and Soil Pollution*, 1999, 109(1-4):17—39.

- [21] Zhou C L, Qi Y C. Effects of acid rain on activities of soil microorganisms. *Journal of Ecology*, 1988, 7(2): 21–24.
- [22] Gao T Z, Qi P, Zhang Y, *et al.* Effects of simulating acid rain on the migration and transformation of nutrient elements in soil. *Ecology and Environment*, 2004, 13(1): 23–26.
- [23] Burton A, Pregitzer K, Ruess R, *et al.* Root respiration in North American forests: effects of nitrogen concentration and temperature across biomes. *Oecologia*, 2002, 131(4): 559–568.
- [24] Chapin III F S, Matson P A, Mooney H A. *Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology*. New York: Springer-Verlag, 2002. 97–158.
- [25] Shan Y F. *Acid rain, air pollution and plant*. Beijing: China Environmental Science Press, 1994.
- [26] Wood T, Bormann F H. Short-term effects of a simulated acid rain upon the growth and nutrient relations of *Pinus strobus* L. *Water, Air and Soil Pollution*, 1977, 7(4): 479–488.
- [27] Jiang Y L, Zhou G S, Zhao M, *et al.* Soil respiration in a broad-leaved and Korean pine forest ecosystems, Changbai Mountain, China. *Acta Phytocologica Sinica*, 2005, 29(3): 411–414.
- [28] Yi Z G, Yi W M, Zhou G Y, *et al.* Soil carbon effluxes of three major vegetation types in Dinghushan biosphere reserve. *Acta Phytocologica Sinica*, 2003, 23(8): 1674.
- [29] Davidson E A, Belk E, Boone R D. Soil water content and temperature as independent or confounded factors controlling soil respiration in a temperate-mixed hardwood forest. *Global Change Biology*, 1998, 4(2): 217–227.
- [30] Yang J Y, Wang C K. Effects of soil temperature and moisture on soil surface CO₂ flux of forests in Northeastern China. *Journal of Plant Ecology*, 2006, 30(2): 286–294.
- [31] Liang N, Inouce G, Fujinuma Y. A multichannel automated chamber system for continuous measurement of forest soil CO₂ efflux. *Tree Physiology*, 2005, 23: 825–832.

参考文献:

- [8] 杨学春, 朱亚萍. 酸沉降物对土壤化学性质的影响. *四川环境*, 1995, 14(1): 6~9.
- [9] 冯宗炜. 中国酸雨对陆地生态系统的影响和防治对策. *中国工程科学*, 2000(9): 6~10.
- [10] 任仁. 中国酸雨的过去, 现在和将来. *北京: 北京工业大学学报*, 1997, 23(3): 128~132.
- [11] 李柱国. 浙江省酸雨的时空分布、成因和发展趋势. *环境污染与防治*, 1988(4): 10~15.
- [12] 浙江省环境保护局. 浙江省环境质量报告书(2001~2005). 杭州: 浙江省环境监测中心, 2006.
- [13] 刘菊秀, 周国逸, 张德强. 酸雨对鼎湖山土壤的累计效应及荷木的反应. *中国环境科学*, 2003(23): 90~94.
- [14] 凌大炯, 章家恩, 欧阳颖. 酸雨对土壤生态系统影响的研究进展. *土壤*, 2007, 39(4): 514~521.
- [15] 王景祥, 姚继衡, 牛瑞延. *浙江森林*. 北京: 中国林业出版社, 1993.
- [18] 黄承才. 浙江省马尾松林土壤呼吸的研究. *绍兴文理学院学报*, 1999, 19(5): 65~69.
- [19] 方晰, 田大伦, 项文化, 等. 杉木人工林林地土壤 CO₂ 释放量及其影响因子的研究. *林业科学*, 2005, 41(2): 1~7.
- [21] 周崇莲, 齐玉臣. 酸雨对土壤微生物活性的影响. *生态学杂志*, 1988, 7(2): 21~24.
- [22] 高太忠, 戚鹏, 张杨, 等. 酸雨对土壤营养元素迁移转化的影响. *生态环境*, 2004, 13(1): 23~26.
- [25] 单运峰. *酸雨、大气污染与植物*. 北京: 中国环境科学出版社, 1994.
- [27] 蒋延玲, 周广胜, 赵敏, 等. 长白山阔叶红松林生态系统土壤呼吸作用研究. *植物生态学报*, 2005, 29(3): 411~414.
- [28] 易志刚, 蚁伟民, 周国逸, 等. 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): 1674.
- [30] 杨金艳, 王传宽. 土壤水热条件对东北森林土壤表明 CO₂ 通量的影响. *植物生态学报*, 2006, 30(2): 286~294.