

华西雨屏区光皮桦林土壤呼吸对模拟氮沉降的响应

雒守华, 胡庭兴, 张 健, 戴洪忠, 涂利华, 李仁洪, 黄立华

(四川农业大学林学院, 四川省林业生态工程重点实验室, 四川 雅安 625014)

摘 要:从 2008 年 1 月至 12 月,对华西雨屏区光皮桦(*Betula luminifera*)林进行了模拟氮沉降试验,应用 LI-8100 土壤碳通量分析系统和气压过程分离(Barometric Process Separation, BaPS)技术分别研究了 4 个氮沉降水平 0(CK)、5(L)、15(M)、30(H) g N·m⁻²·a⁻¹ 下土壤呼吸的日变化和月动态。结果表明,土壤呼吸具有明显的季节动态,各处理土壤呼吸最高值均出现在 7 月份;氮沉降初期,各处理土壤呼吸差异不明显,5 月份以后各氮沉降处理土壤呼吸开始表现出抑制效应,随着施氮浓度的增加,抑制效应愈加明显(CK>L>M>H);土壤呼吸日变化基本呈现单峰曲线,呼吸速率最高值一般出现在 14:00—16:00。随着氮沉降的增加,对土壤呼吸产生的抑制效应增强,这可能与光皮桦林土壤本身的氮素状态有关。各处理土壤呼吸速率与土壤温度呈极显著指数正相关关系,对土壤呼吸与土壤温度和湿度的偏相关分析得出,温度能解释土壤呼吸的大部分变异(50.1%~79.8%),是影响光皮桦林土壤呼吸的主导因子。随着氮沉降浓度的增加,土壤呼吸的 Q_{10} 值减小,表明氮沉降可能降低了土壤呼吸的温度敏感性。

关键词:氮沉降;土壤呼吸;光皮桦;华西雨屏区

中图分类号:S152.6 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)09-1834-06

Responses of Soil Respiration to Nitrogen Fertilization in *Betula luminifera* Forest, Rainy Area of West China

LUO Shou-hua, HU Ting-xing, ZHANG Jian, DAI Hong-zhong, TU Li-hua, LI Ren-hong, HUANG Li-hua

(College of Forestry, Sichuan Agricultural University, The Key Laboratory of Forestry Ecological Engineering of Sichuan Province, Ya'an 625014, China)

Abstract: Responses of soil respiration to simulated atmosphere nitrogen(N) deposition in *Betula luminifera* forest in rainy area of west China were studied from January to December in 2008. The LI-8100 Automated Soil CO₂ Flux System and Barometric Process Separation(BaPS) technique were used to quantify the daily and monthly variation of soil respiration respectively, following four-levels of N deposition treatment 0(Control Check, CK), 5(Low-N, L), 15(Medium-N, M), 30(High-N, H) g N·m⁻²·a⁻¹. Twelve plots, each with 3 m×3 m dimensions were established, surrounded by a 3 m wide buffer strip. Ammonium nitrate solution was sprayed monthly as 12 equal applications over the entire year. Results showed that; Soil respiration exhibited a clear seasonal pattern, with the highest rate observed in July in every treatment. Soil respiration exhibited significant repressive effect following the increment of N. For instance, the treatment of L, M, H was 27.6%, 35.9%, 47.7% lower than CK in July. Also daily variation of soil respiration from July to November, exhibited a similar pattern with a single-peak curve. The mean values of daily variation also revealed a negative response to increasing level of N addition. This result might imply the N saturation-response mechanisms of *B.luminifera* forest in rainy area of west China. Temperature was the leading factor of soil respiration variation, could explain 50.1%~79.8% monthly variation of soil respiration. Then, following the N gradient the Q_{10} values decreased, indicated N deposition might reduce the temperature sensitivity of soil respiration.

Keywords: nitrogen deposition; soil respiration; *Betula luminifera*; rainy area of west China

森林土壤是全球最大的碳库之一^[1],土壤呼吸是土壤与大气之间碳交换的主要过程,全球每年通过土

壤呼吸向大气中释放的 C 为 75 Pg^[2],是人类燃烧化石燃料排放 CO₂ 的 10 倍^[3],可见土壤呼吸的微小变化将显著影响大气 CO₂ 浓度。化石燃料的燃烧、化肥的使用和固氮作物的种植极大地影响了活性氮的生成和沉降速率^[4-5]。据预测,2020 年我国 NO_x 的排放量将达到 (26.6~29.7)×10⁹ kg,比 2000 年增加 1.34~1.62 倍^[6],这也意味着我国大气氮沉降将在未来快速持续地增

收稿日期:2010-03-30

基金项目:国家“十一五”重大科技支撑计划项目(2006BA01A11-03);
四川省重点学科建设项目(SZD0419)

作者简介:雒守华(1984—),男,山西吕梁人,硕士研究生,主要从事全球变化和碳循环研究。E-mail:luoshouhua3@126.com

通讯作者:胡庭兴 E-mail:hutx001@yahoo.com.cn

加。大气氮沉降的增加影响各种生态系统的特征和过程,并引发了一系列严重的生态问题,如河口、海口和江湖等水域氮富集和陆地生态系统氮超负荷^[7],森林植物组成和多样性降低^[8],甚至森林衰退^[9]等。土壤呼吸作为陆地生态系统地下部分关键的生态过程,受到氮沉降增加的影响,主要有促进^[10]、抑制^[11]和无变化^[12]3种响应方式。土壤呼吸对大气氮沉降增加的响应方式将直接影响生态系统的碳动态,并在很大程度上决定其在全球碳循环中的角色(碳源或碳汇)。

在氮沉降增加的情况下,土壤呼吸的变化方向 and 变化幅度反映了生态系统对环境胁迫的敏感程度和响应模式^[13]。由于土壤呼吸是一个复杂的生物和非生物过程,它不仅受到土壤温度、湿度、养分含量^[14]、大气降水^[15]、凋落物和凋落物质量^[16]等非生物因子的影响,也受到植被类型^[17]、根系生物量、土壤微生物量^[11]等生物因子的影响,同时人类活动如施肥^[18]、耕作方式^[19]、土地利用^[20]等也不同程度的影响着土壤呼吸过程。

华西雨屏区是我国降雨量最为丰富的区域之一,其特殊的地形和气候使得来自成都平原携带有大量 NO_x 等污染物随降水沉降下来,增加了该地区的氮沉降。有研究表明,该地区氮沉降形式主要为湿沉降,2008 年全年总氮湿沉降量达到 8.24 g·m⁻²·a⁻¹^[21],已经超出了该地区氮沉降临界负荷值(>4 g·m⁻²·a⁻¹)^[22]。四川省自 2000 年实施退耕还林工程以来,境内形成了大面积的人工林,而以光皮桦为优势树种的防护林占了很大的比例,经过 10 多年的生态恢复,已形成稳定的生态系统。本研究以该区光皮桦林为对象,通过模拟大气氮沉降研究光皮桦林土壤呼吸的日变化和月动态,并探讨其响应机制,为评估未来大气氮沉降对该区森林土壤碳收支状况提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

华西雨屏区为四川盆地西部边缘独特的自然地理区域,东西宽 50~70 km,南北长 400~450 km,总面积约 2.5 万 km²,包括四川盆地西部边缘的亚高山、中山及山前丘陵,即平武、北川、江油、绵竹、彭县、都江

堰、汶川、崇州、天全、宝兴、雅安、洪雅、峨眉、峨边、马边至雷波一线,是我国西部地区以阴湿为主要特征的罕见的气候地理单元^[23]。研究区位于华西雨屏区核心地带的四川省洪雅县柳江镇(29°95' N, 103°38' E),属中亚热带湿润性山地气候,年均气温 14~16 °C,1 月平均气温 6.6 °C,7 月平均气温 25.7 °C,20 a (1980—2000)平均年降水量 1 489.8 mm,年内降水分配不均,主要集中于 6—8 月,年平均相对空气湿度 82%。试验地建立在光皮桦纯林内,林分密度 1 100 株·hm⁻²,郁闭度 0.7,林龄 8 a,平均胸径 15 cm,林内凋落物蓄积量 0.95 t·hm⁻²。土壤为紫色土,0~10 cm 土层基本理化性质如表 1 所示。

1.2 试验设计

2007 年 12 月,在光皮桦林内选择具有代表性的林地(立地条件一致),建立 12 个 3 m×3 m 的样方,每个样方间设>3 m 的缓冲带。以喷洒 NH₄NO₃ 溶液模拟大气氮沉降,分 4 个施氮水平,分别为:0(对照,CK)、5(低氮,L)、15(中氮,M)、30(高氮,H)g N·m⁻²·a⁻¹,每个水平 3 个重复。于 2008 年 1 月至 12 月,将各水平年施氮量均分 12 等份,于每月中旬进行施氮处理,具体方法是将 NH₄NO₃ 溶解于 1 L 水中,用喷雾器均匀喷洒于样方内,对照组仅喷洒等量的水。每个样方内随机打入 3 个 PVC 环(内径 18 cm,高 10 cm,环上沿距离土壤表面 2 cm),用于测定土壤呼吸日变化。

1.3 研究方法

土壤呼吸月动态采用 BaPS 系统(UMS GmbH Inc., Germany)于 2008 年 1 月至 12 月每月测定 1 次,施氮前在每个样方内采用环刀(直径 5 cm,高 5 cm)分上下两层取 0~10 cm 原位土样,随机取 3 组,立即用保鲜膜密封并冷藏保存带回。取土样同时用 IQ-150 土壤原位 pH 计(IQ Inc., USA)测定 5 cm 处土壤温度和 pH 值。每个样方的 3 组(共 6 个环刀)土样放入 BaPS 系统的分析室内密闭,设定取样时的土壤温度为恒温水浴温度(控温精度为±0.05 °C),输入土壤重量、pH 值等参数后开始测定,测定时间为 12 h。经 BaPS 系统测定结束后的土样,立即称 20.00 g 于铝盒,105 °C 烘干 24 h 至恒重,测定土壤含水量。

表 1 土壤基本理化性质(0~10 cm)

Table 1 Basic physical and chemical properties of soil(0~10 cm)

土壤 Soil	容重 Bulk density/ g·cm ⁻³	最大持水量 Maximum moisture capacity/%	总孔隙度 Total porosity/ %	有机碳 Organic C/ g·kg ⁻¹	全氮 Total N/ g·kg ⁻¹	有效氮 Available N/ mg·kg ⁻¹	有效磷 Available P/ mg·kg ⁻¹	速效钾 Available K/ mg·kg ⁻¹	pH
0~10 cm	1.29±0.05	39.06±4.01	50.29±6.01	9.18±1.53	1.54±0.21	69.88±6.53	14.11±0.85	2.64±0.18	4.88±0.15

采用 LI-8100 土壤碳通量分析系统 (LI-COR Inc., USA) 分别于 2008 年 7、8、10、11 月在施氮前测定土壤呼吸日变化, 每 2 h 测定一轮 (8:00—18:00), 并通过 Vantage Pro2 戴维斯气象站 (Davis Inc., USA) 收集林内气温和降雨量等数据。

1.4 数据处理

BaPS 系统每 10 min 记录 1 次土壤上部空间 CO_2 浓度, 最终由线性回归得出的数据为 12 h 内土壤 CO_2 通量的平均值^[24]; LI-8100 系统所得土壤呼吸日变化数据为不同时间点每个水平 9 个测定点土壤 CO_2 通量的平均值。在此基础上采用 SPSS 13.0 (SPSS Inc., USA) 对数据进行相关性分析以及 one-way ANOVA 分析, 若差异显著, 再进行 LSD 多重比较分析 ($P=0.05$)。

土壤呼吸速率与土壤温度的单因素指数模型为 $R_s = ae^{bt}$ 。式中: R_s 为土壤呼吸速率, $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 或 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$; t 为土壤温度, $^{\circ}\text{C}$; a 为 $t=0^{\circ}\text{C}$ 时的土壤呼吸速率, b 为温度反应常数。

通常用 Q_{10} 值表示土壤呼吸对温度变化的敏感性, 即温度每升高 10°C 土壤呼吸的变化倍数。 Q_{10} 值计算方法为 $Q_{10} = e^{10b}$, 式中 b 是上述土壤呼吸与土壤温度指数模型 $R_s = ae^{bt}$ 中的温度反应常数。

2 结果与分析

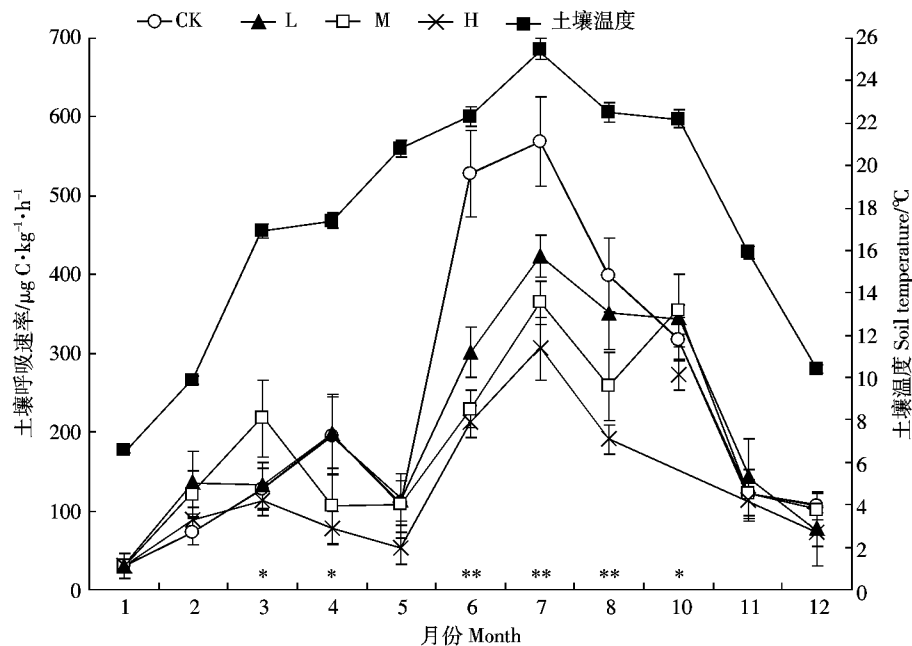
2.1 土壤呼吸月动态

CK 样地代表光皮桦林自然状态下的土壤呼吸, 具有明显的季节特征 (见图 1), 其最大值为 $584.2 \mu\text{g} \text{C} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ (7 月份), 最小值为 $30.54 \mu\text{g} \text{C} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ (1 月份); 氮处理 (L, M, H) 样地的土壤呼吸表现出同样的季节动态, 但波动幅度明显小于 CK。

氮沉降初期, 各处理间差异不明显, 随着氮沉降的持续增加, 施氮到 5 月份以后, 土壤呼吸开始表现出抑制效应, 并随着施氮浓度梯度的增加处理间表现出的抑制效应愈明显, 在 6、7、8 月份土壤呼吸至少有 3 个处理两两之间差异达到显著水平 ($P<0.05, n=3$), 其中 7 月份 L, M, H 较 CK 的土壤呼吸速率分别下降了 27.6%、35.9%、47.7%。

2.2 土壤呼吸日变化

由图 2 可见, 7、8 月和 10 月各处理土壤呼吸日变化呈单峰曲线, 各处理的呼吸速率最大值均出现在 14:00—16:00。随着氮沉降的增加, 土壤呼吸表现出的抑制作用越明显, 4 次日变化平均值均为 $\text{CK} > \text{L} > \text{M} > \text{H}$ 。在 11 月份除 CK 外, 氮处理样地未出现最大呼

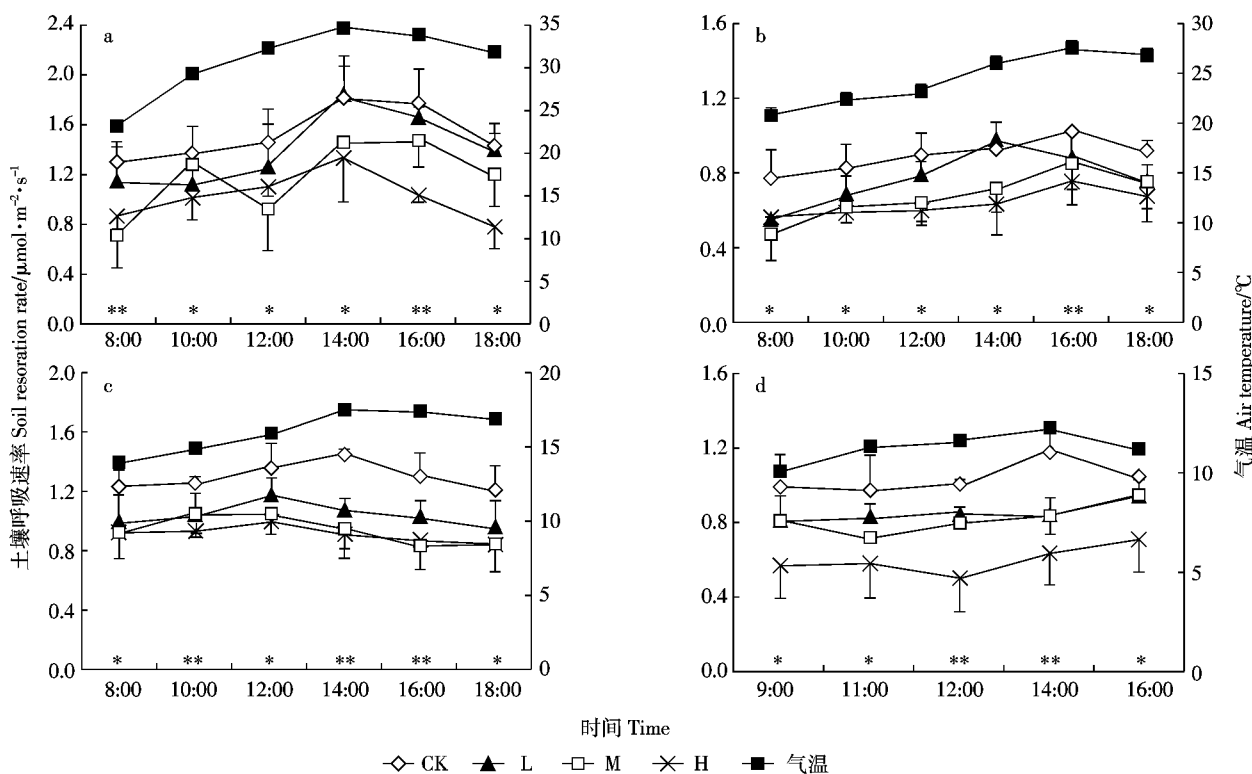


注: CK, L, M, H 分别表示不同氮沉降水平: 0 (对照, CK)、5 (低氮, L)、15 (中氮, M)、30 (高氮, H) $\text{g N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; (*) 表示至少有两个处理之间差异显著, (**) 表示至少有 3 个处理两两之间差异显著 ($P<0.05, n=3$)。下同。

Note: CK, L, M, H denote 4 levels N input: 0 (control check, CK), 5 (Low-N, L), 15 (Medium-N, M), 30 (High-N, H) $\text{g N m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; asterisk (*) denote that at least two treatment means are significantly different, and double asterisk (**) denote that at least three treatment means are significantly different in every two ($P<0.05, n=3$). The same below.

图 1 各处理土壤呼吸速率月动态

Figure 1 Monthly dynamic of soil respiration rate



(a,b,c,d 分别表示测定日期为 7-16,8-17,10-16,11-15)

(a,b,c,d respectively denote datas measured at 7-16,8-17,10-16,11-15)

图2 各处理土壤呼吸日变化

Figure 2 Daily variation of soil respiration

吸值,这是由于当日 14:00 后开始降雨,土壤湿度的增加可能一定程度上激活了微生物活性和增强了植物根系呼吸,故氮处理样地土壤呼吸呈上升趋势,而未测得最大值。

2.3 土壤呼吸与土壤温度和湿度的关系

各处理土壤呼吸的月动态与土壤温度的变化存在极显著指数正相关关系($P<0.001, n=9$),相关系数范围为 0.534~0.933,根据两者的指数关系方程,计算出各处理(CK、L、M、H)的 Q_{10} 值分别为 3.94、3.19、2.69、2.41。对各处理土壤呼吸与温度和湿度进行偏相关分析表明,土壤温度单独解释了土壤呼吸变异的 79.8%、74.8%、61.7%、50.1%,土壤湿度仅占 31.2%、-0.2%、3.2%、4.8%。

3 讨论

3.1 土壤呼吸对氮沉降的响应

本研究表明氮沉降抑制了土壤呼吸,与许多研究结果一致^[11,25-26]。土壤呼吸对氮沉降响应模式(增大、减小或者无响应)有所不同可能与土壤本身的氮状况有关。施氮初期,氮沉降使得土壤的呼吸速率暂时增

加(2—3 月),这可能是由于施氮使得土壤中有有效氮含量增加,减缓了土壤氮限制,促进了植物根系生长以及土壤微生物数量和活性升高,从而提高了根呼吸和微生物呼吸通量^[1]。氮沉降后期,当土壤中有有效氮含量累积到一定程度,超出了植物和微生物的需求即不再成为限制因子时,氮沉降的增加促进土壤呼吸的作用将会减弱甚至产生抑制作用^[11]。Richard 等^[27]通过对红松林(*Pinus resinosa* Ait.)和落叶混交林进行了 13 a 的模拟氮沉降试验,发现初期氮沉降促进了土壤呼吸速率,但在长期氮沉降条件下土壤呼吸受到抑制。本模拟试验在施氮 5 个月后即对土壤呼吸产生抑制作用,这可能是由于试验样地在退耕还林前为农耕地,早年农户对土地长期的施肥,加之该区域本身较高的大气氮沉降量,使得土壤全氮含量本底值较高 $[(1.54\pm 0.21)\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}]$,因而少量的氮沉降施加量即可使土壤达到“氮饱和”状态^[28]。一般认为,土壤达到氮饱和状态将造成植物体内养分失衡、土壤 N 流失增大和土壤酸化,使得植物根系损伤、菌根功能下降^[29],甚至对土壤动物的活动产生负向效应^[30],可见持续的高氮沉降量将对植物根系以及土壤动物、微生物的活

性和数量产生不利影响,进而对土壤呼吸速率产生负面效应。

土壤呼吸包括3个生物学过程(植物根呼吸、土壤微生物呼吸和土壤动物呼吸)和1个化学氧化过程(有机质氧化分解释放出 CO_2)。氮沉降的增加使得土壤硝化作用增强,导致土壤pH值降低,抑制了植物根系生长和降低了根系生物量,从而抑制了植物根呼吸^[1,11];氮沉降还可能抑制了土壤微生物和某些土壤酶的活性(如木质素降解酶),从而降低了它们对土壤有机碳的分解^[31];而持续的氮沉降也可能改变土壤动物以及微生物的群落组成结构^[30,32],抑制了其种群生物量,使得土壤动物和微生物呼吸减弱,土壤 CO_2 通量降低,最终导致总的土壤呼吸表现为抑制效应。

3.2 土壤呼吸与温度、湿度的关系

大多数情况下温度与土壤呼吸间存在显著相关性,然而其他的环境因子如降雨、土壤湿度、矿物及粘土含量、养分的获取性、凋落物的数量和质量的变化的变化也影响了土壤呼吸速率,因此可能掩盖了温度对土壤呼吸的影响^[33]。试验观测期间研究区4—5月降雨天数达28d,降雨量达到328.5mm,地表径流量累积达到 $76.5\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{m}^{-1}$,过高的土壤含水量降低了土壤通透性,致使土壤处于缺氧或弱氧状态,微生物活性会大大减弱,植物根系呼吸也受到影响,进而土壤呼吸显著降低,这可能是5月份各处理土壤呼吸速率未表现出随温度的上升而增大的原因。而10月份氮处理样地土壤呼吸速率未随土壤温度的下降而下降,这可能是由于光皮桦林在秋季(9月后)进入其落叶高峰期^[34],凋落量的激增以及细根的分解使得土壤中C含量骤然升高,减缓了施氮样地C相对缺乏的状况,激活了土壤微生物活性,进而促进了土壤有机质分解而释放了较多的 CO_2 。

大多数研究表明,温度是影响土壤呼吸的关键因子,在土壤湿度不成为限制因素的情况下,土壤呼吸随温度变化的指数方程能够解释土壤呼吸的大部分变异^[25,35]。本研究中土壤呼吸动态与温度变化存在极显著指数正相关关系,这与其他研究结果一致^[11,21-22],可能由于温度的变化直接或间接地影响了植物根系活性与微生物代谢活动,从而使得土壤 CO_2 通量产生变化。由于试验区年降雨量丰富,月季间土壤含水量差异不显著,使得湿度不构成本研究土壤呼吸的限制性因素。从土壤呼吸与温度和湿度的偏相关分析中可以看出,湿度对土壤呼吸的影响仅占0.2%~31.2%,而温度则单独解释了土壤呼吸50.1%~79.8%的变异,这

表明与土壤湿度相比,土壤温度才是本研究中土壤呼吸变异的主导因子。

Q_{10} 值作为土壤呼吸对温度变化的敏感性的指标被广泛应用^[21-22],本研究中各处理 Q_{10} 值随着氮沉降浓度的增加而减小($\text{CK}>\text{L}>\text{M}>\text{H}$),表明氮沉降的增加降低了土壤呼吸的温度敏感性,这可能与氮沉降抑制了植物根系和土壤微生物活性有关,从而使得土壤呼吸在季节动态和日变化过程中其变幅均明显小于CK。

参考文献:

- [1] Bowden R D, Davidson E, Savage K, et al. Chronic nitrogen additions reduce total soil respiration and microbial respiration in temperate forest soils at the Harvard Forest[J]. *Forest Ecology and Management*, 2004 (196):43-56.
- [2] Schlesinger W H, Andrews J A. Soil respiration and the global carbon cycle[J]. *Biogeochemistry*, 2000(48):7-20.
- [3] Marland G, Rotty R M. Carbon dioxide emissions from fossil fuels: A procedure for estimation and results for 1950-1982[J]. *Tellus*, 1984(36) B:232-261.
- [4] Galloway J N, Schlesinger W H, Levy H, et al. Nitrogen-fixation anthropogenic enhancement environmental response[J]. *Global Biogeochem Cycles*, 1995(9):235-252.
- [5] Vitousek, P M, Aber J D, Haworth R W, et al. Human alteration of the global nitrogen cycle: Sources and consequences[J]. *Ecological Applications*, 1997, 7(3):737-750.
- [6] Streets D G, Waldhoff S T. Present and future emissions of air pollutants in China: SO_2 , NO_x , and CO[J]. *Atmos Environ*, 2000(34):363-374.
- [7] Schindler D W. Changes caused by acidification to the biodiversity productivity and biogeochemical cycles of lakes[C]// Stenberg, CEW, Wright RW(eds), *Acidification of Freshwater Ecosystems: Implications for the Future*. Chichester, England, John Wiley & Sons, 1994:153-164.
- [8] Bobbink R, Hornung M, Roelofs JGM. The effects of air-borne nitrogen pollutants on species diversity in natural and semi-natural European vegetation[J]. *Ecology*, 1998(86):717-738.
- [9] 李德军, 莫江明, 方运霆, 等. 氮沉降对森林植物的影响[J]. *生态学报*, 2003, 23(9):1891-1900.
Li De-jun, Mo Jiang-ming, Fang Yun-ting, et al. Impact of nitrogen deposition on forest plant[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(9):1891-1900.
- [10] 宋学贵, 胡庭兴, 鲜骏仁, 等. 川西南常绿阔叶林土壤呼吸及其对氮沉降的响应[J]. *水土保持学报*, 2007, 21(4):168-192.
Song Xue-gui, Hu Ting-xing, Xian Jun-ren, et al. Soil respiration and its response to simulated nitrogen deposition evergreen broad-leaved forest, Southwest Sichuan[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21(4):168-192.
- [11] Mo J M, Zhang W, Zhu W X, et al. Nitrogen addition reduces soil respiration in a mature tropical forest in southern China[J]. *Global Change Biology*, 2007(14):1-10.
- [12] Schulze E D. Biological control of the terrestrial carbon sink [J]. *Bio-*

- geosciences, 2006(3):147-166.
- [13] 齐志勇, 王宏燕, 王江丽, 等. 陆地生态系统土壤呼吸研究进展[J]. 农业系统科学与综合研究, 2003, 19(2):116-119.
QI Zhi-yong, WANG Hong-yan, WANG Jiang-li, et al. The development on the research of terrestrial ecosystem soil respiration[J]. *System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture*, 2003, 19(2):116-119.
- [14] 张东秋, 石培礼, 张宪洲. 土壤呼吸主要影响因素的研究进展[J]. 地球科学进展, 2005, 20(7):778-785.
ZHANG D-Q, SHI P-L, ZHANG X-Z, et al. Some advance in the main factions controlling soil respiration [J]. *Advances in Earth Science*, 2005, 20(7):778-785.
- [15] Lee M S, Nakane K, Nakatsubo T, et al. Effects of rainfall events on soil CO₂ flux in a cool temperature deciduous broad leaved forest[J]. *Ecological Research*, 2002(17):401-409.
- [16] 田光军, 田大伦, 闫文德, 等. 去除和添加凋落物对枫香(*Liquidambar formosana*)和樟树(*Cinnamomum camphora*)林土壤呼吸的影响[J]. 生态学报, 2009, 29(2):643-652.
TIAN G-J, TIAN D-L, YAN W-D, et al. Impact of litter addition and exclusion on soil respiration in a *Liquidambar formosana* forest and a nearby *Cinnamomum camphora* forest of central southern China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(2):643-652.
- [17] 李红生, 刘广全, 王鸿喆, 等. 黄土高原四种人工植物群落土壤呼吸季节变化及其影响因子[J]. 生态学报, 2008, 28(9):4099-4106.
LI Hong-sheng, LIU Guang-quan, WANG Hong-zhe, et al. Seasonal changes in soil respiration and the driving factors of four woody plant communities in the Loess Plateau [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(9):4099-4106.
- [18] 刘晓雨, 潘根兴, 李恋卿, 等. 太湖地区水稻土长期不同施肥条件下油菜季土壤呼吸 CO₂ 排放[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(12):2506-2511.
LIU Xiao-yu, PAN Gen-xing, LI Lian-qing, et al. CO₂ Emission under long-term different fertilization during rape growth season of a paddy soil from Tailake Region, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(12):2506-2511.
- [19] 王同朝, 卫 丽, 田 原, 等. 冬小麦-夏玉米一体化垄作覆盖下农田土壤呼吸变化研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(9):1970-1974.
WANG Tong-chao, WEI Li, TIAN Yuan, et al. Dynamic changes of soil respiration on mulched bed planting under winter wheat and summer maize double cropping integration [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(9):1970-1974.
- [20] 王小国, 朱 波, 王艳强, 等. 不同土地利用方式下土壤呼吸及其温度敏感性[J]. 生态学报, 2007, 27(5):1960-1968.
WANG X-G, ZHU B, WANG Y-Q, et al. Soil respiration and its sensitivity to temperature under different land use conditions [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(5):1960-1968.
- [21] 涂利华, 胡庭兴, 黄立华, 等. 华西雨屏区苦竹林土壤呼吸对模拟氮沉降的响应[J]. 植物生态学报, 2009, 33(4):728-738.
TU Li-hua, HU Ting-xing, HUANG Li-hua, et al. The responses of soil respiration to simulated nitrogen deposition in *Pleioblastus amarus* forest, Rainy Area of West China[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2009, 33(4):728-738.
- [22] 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.
DUAN L, HAO J-M, XIE S-D, et al. Estimating critical loads of sulfur and nitrogen for chinese soils by steady state method[J]. *Environmental Science*, 2002, 23(2):7-12.
- [23] 庄 平, 高贤明. 华西雨屏带及其对我国生物多样性保育的意义[J]. 生物多样性, 2002, 10(3):339-344.
ZHUANG Ping, GAO Xian-ming. The concept of the Rainy Zone of West China and its significance to the biodiversity conservation in China[J]. *Biodiversity Science*, 2002, 10(3):339-344.
- [24] Ingwersen J, Butterbach-Bahl K, Gasche R, et al. Barometric process separation: new method for quantifying nitrification, denitrification, and nitrous oxide sources in soil[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1999(63):117-128.
- [25] Ding Wei-xin, Cai Yan, Cai Zu-cong, et al. Soil respiration under maize crops: effects of water, temperature, and nitrogen fertilization[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2007(71):944-951.
- [26] Ding Wei-xin, Yu Hong-yan, Cai Zu-cong, et al. Responses of soil respiration to N fertilization in a loamy soil under maize cultivation[J]. *Geoderma*, 2010(155):381-389.
- [27] Richard D, Bowden R D, Davidson E, et al. Chronic nitrogen additions reduce total soil respiration and microbial respiration in temperate forest soils at the Harvard Forest[J]. *Forest Ecology and Management*, 2004, 196(1):43-56.
- [28] Aber J D, McDowell W, Nadelhoffer K, et al. Nitrogen saturation in temperate forest ecosystems[J]. *Bioscience*, 1998(8):921-934.
- [29] Gunderson P. Nitrogen deposition and the forest nitrogen cycle: Role of denitrification[J]. *Forest Ecology and Management*, 1991(44):15-28.
- [30] 徐国良, 莫江明, 周国逸. 模拟氮沉降增加对亚热带主要森林土壤动物的早期影响[J]. 应用生态学报, 2005, 16(7):1235-1240.
XU Guo-liang, MO Jiang-ming, ZHOU Guo-yi. Early responses of soil fauna in three typical forests of south subtropical China to simulated N deposition addition[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(7):1235-1240.
- [31] Deforest J L, Zak D R, Pregitzer K S, et al. Atmospheric nitrate deposition, microbial community composition, and enzyme activity in Northern Hardwood forests[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2004(68):132-138.
- [32] Frey S D, Norr M, Parrent J L. Chronic nitrogen enrichment affects the structure and function of microbial community in temperate hardwood forest[J]. *Forest Ecology and Management*, 2004(196):159-171.
- [33] Davison E A, Janssens I A. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change[J]. *Nature*, 2006(440):165-173.
- [34] 陈光升. 华西雨屏区几种植被恢复模式凋落物的生态功能研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2008: 20-23.
CHEN Guang-shen. Ecological function of litter in several patterns of vegetation restoration in Rainy Areas of Western China [D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2008: 20-23.
- [35] Qi Y, Xu M. Separating the effects of moisture and temperature on soil CO₂ efflux in a coniferous forest in the Sierra Nevada Mountains[J]. *Plant and Soil*, 2001(237):15-23.