

# 哀牢山中山湿性常绿阔叶林凋落物对土壤呼吸及其温度敏感性的影响<sup>1)</sup>

武传胜

(哀牢山亚热带森林生态系统研究站(中国科学院西双版纳热带植物园),景东,676209)

沙丽清 张一平

(中国科学院热带森林生态学重点实验室(中国科学院西双版纳热带植物园))

**摘 要** 在哀牢山湿性常绿阔叶林内设置了对照和去除凋落物两个处理,研究凋落物对土壤呼吸的影响。结果表明:去除凋落物对土壤温度和湿度没有影响,但却使土壤呼吸速率显著降低了 40.8%,使土壤呼吸温度敏感性降低了 16.5%;凋落物呼吸与土壤温度和湿度均呈显著的指数性关系。

**关键词** 土壤呼吸;凋落物;温度敏感性

**分类号** S718.5

**Effect of Litter on Soil Respiration and Its Temperature Sensitivity in a Montane Evergreen Broad-Leaved Forest in Ailao Mountains, Yunnan/Wu Chuansheng**( Ailaoshan Station for Subtropical Forest Ecosystem Studies ( Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences ), Jingdong 676209, P. R. China); **Sha Liqing, Zhang Yiping**( Key Laboratory of Tropical Forest Ecology ( Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences ) ) //Journal of Northeast Forestry University. -2012,40( 6) . -37 ~ 40

An experiment was conducted to study the effects of litter on soil respiration in a montane evergreen broad-leaved forest in Ailao Mountains by setting up two treatments ( litter removal from soil surface and no litter removal as control) . Results showed that litter removal had no significant effect on soil temperature and moisture, but significantly reduced soil respiration by 40.8%, and the temperature sensitivity of soil respiration decreased by 16.5%. Litter respiration showed a significant exponential correlation with soil temperature and soil water content.

**Keywords** Soil respiration; Litter; Temperature sensitivity

土壤是陆地生态系统中最大的有机碳库,碳储量高达 1 500 Pg<sup>[1]</sup>,是大气中碳储量的 2 倍,约为植被中储存量的 3 倍<sup>[2-4]</sup>。据估算全球土壤呼吸释放 CO<sub>2</sub> 通量约为 68 Pg · a<sup>-1</sup>,其中 50 Pg · a<sup>-1</sup> 来自于凋落物和土壤有机质分解<sup>[5]</sup>。研究发现:温带阔叶混交林地上凋落物呼吸占总呼吸的 37%<sup>[6]</sup>,在热带森林中地上凋落物呼吸占总呼吸的 33%<sup>[7]</sup>。研究表明去除凋落物后土壤呼吸年均值降低了 19%<sup>[8]</sup>。同凋落物移除相比,凋落物输入数量加倍导致土壤呼吸明显增加<sup>[9]</sup>。凋落物的输入可以增加矿质土壤微生物量<sup>[10]</sup>,并且促进微生物呼吸<sup>[11]</sup>,其释放的可溶性有机碳又能促发激发效应<sup>[11-12]</sup>。因此,凋落物是土壤呼吸的一个重要组成部分,对土壤呼吸产生直接影响。

哀牢山中山湿性常绿阔叶林地表几乎为植被凋

落物所覆盖,厚度一般 3 ~ 7 cm。目前还未见有关该类森林内凋落物对土壤呼吸及其温度敏感性影响的报道,为此,在哀牢山中山湿性常绿阔叶林内设置了对照和去除凋落物两种处理,通过测定这两种处理的土壤呼吸速率,进而估算凋落物输入对土壤呼吸的贡献,为全面了解亚热带常绿阔叶林土壤碳排放提供基础数据。

## 1 试验地概况

研究样地位于中国科学院哀牢山森林生态系统定位站(哀牢山北段国家级自然保护区核心区的徐家坝地区),地处东经 101°01′,北纬 24°32′。该地区年均气温为 11.0℃,年降水量 1 947 mm,干季(12—4月)、湿季(5—11月)分明,85%以上的降水集中在湿季。地表几乎为植被凋落物所覆盖,厚度一般 3 ~ 7 cm;土壤腐殖质呈棕黑色,厚达 10 ~ 15 cm;矿质土层质地疏松,以团粒结构为主。表土层透水性良好,涵养水源的能力很强;有机质质量分数较高,含氮量丰富;C/N 比适中,土壤呈酸性(pH < 5);阳离子交换量较高,高于水平地带的黄棕壤。优势树种主要有景东石栎(*Lithocarpus chintungensis*)、云南

1) 国家重点基础研究发展计划项目(2010CB833501);中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-Q1-05-04)。

第一作者简介:武传胜,男,1983年10月生,哀牢山亚热带森林生态系统研究站(中国科学院西双版纳热带植物园),实习研究员。

通信作者:沙丽清,中国科学院热带森林生态学重点实验室(中国科学院西双版纳热带植物园),副研究员。E-mail: shalq@xtbg.ac.cn。

收稿日期:2011年10月12日。

责任编辑:李金荣。

越桔 (*Vaccinium duclouxii*)、滇木荷 (*Schima noron-hae*) 等,林下主要以箭竹 (*Sinarundinaria nitida*) 为主<sup>[3]</sup>。

## 2 研究方法

在站区的中山湿性常绿阔叶林内随机选取4块10 m×10 m样地,在样地内随机选取2个1 m×1 m的小样方,分别作为对照(CK)和去除凋落物处理。在去除凋落物处理的上方搭建高1 m尺寸为1 m×1 m的去凋棚,防止新鲜凋落物进入。在每个小样方中心放置一个外径为200 mm的PVC管(与自制的外直径为200 mm的PVC管呼吸箱相配套)。

采用Li-840(Li-Cor, Lincoln, NE, USA)气体分析仪测定土壤呼吸速率( $R_s$ ),同时在呼吸箱周围5 cm处取5个点,分别用6310针式温度计和TDR(Time Domain Reflectometer)测量地下5 cm和0~5 cm处土壤温度( $T_s$ )和土壤体积含水量( $W_s$ ),取5个点的均值作为该点的土壤温度和土壤体积含水量,并且用6310针式温度计和气压计记录当时的气温( $T_a$ )和气压( $P$ ),以供土壤呼吸速率计算时使用。

土壤呼吸速率按照下面公式进行计算:

$$R_s = \frac{VP}{RST} \cdot \frac{dc}{dt}$$

式中: $V$ 为呼吸箱体积( $m^3$ ); $S$ 为呼吸箱底面积( $m^2$ ); $R$ 为气体常数( $8.314 Pa \cdot m^3 \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$ ); $T$ 为呼吸箱内空气温度(K); $P$ 表示呼吸箱内气压(Pa); $dc/dt$ 表示观测时间内呼吸箱内 $CO_2$ 体积分数随时间的变化率。

采用单因子指数模型分别拟合土壤呼吸与土壤温度和土壤水分的关系,即 $R_s = ae^{bT_s}$ ,  $R_s = ae^{bW_s}$ ,式

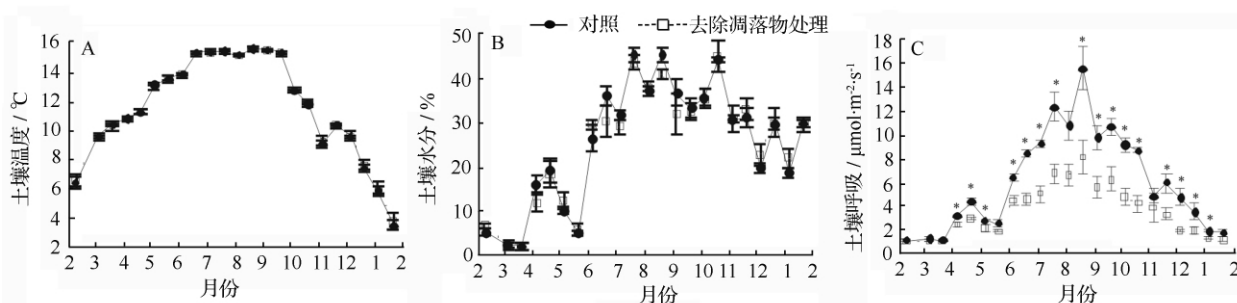
中: $a$ 和 $b$ 为拟合后的常数项; $R_s$ 为土壤呼吸; $T_s$ 为土壤温度; $W_s$ 为土壤水分。采用 $R_s = ae^{bT_s} W_s^c$ 双因子模型拟合土壤呼吸与土壤温度和土壤水分的关系,式中: $a$ 、 $b$ 和 $c$ 为拟合后的常数项, $b$ 和 $c$ 分别为温度敏感系数和水分敏感系数; $R_s$ 为土壤呼吸; $T_s$ 为土壤温度; $W_s$ 为土壤水分。土壤呼吸对温度的敏感性通常用 $Q_{10}$ 表示,即土壤温度增加10℃后土壤呼吸速率增加的倍数,通过 $R_s = ae^{bT_s}$ 和 $Q_{10} = e^{10b}$ 模型来计算其数值。CK与去除凋落物处理两处理之差为凋落物呼吸速率( $R_{sl}$ )。

用SPSS18.0进行指数回归和偏相关分析,并采用独立样本 $T$ 检验进行差异性检验;用Sigma-plot11.0进行作图。

## 3 结果与分析

### 3.1 凋落物对土壤温度、湿度的影响

CK和去除凋落物处理的土壤5 cm处温度( $T_s$ )无显著差异(图1(A)),两者全年温度变化范围分别为3.5~15.6℃和3.7~15.6℃。月均最低值均出现在1月份,分别为4.7℃和4.9℃,月均最高值均出现在9月份,均为15.4℃;年均值均为11.4℃。两处理的土壤0~5 cm处土壤体积含水量( $W_s$ )无显著差异(图1(B)),两者全年土壤水分变化范围分别为2.2%~45.4%和2.1%~43.7%。月均最低值均出现在3月份,分别为2.3%和2.2%,而月均最高值分别出现在8月份和10月份,分别为41.2%和40.3%;年均值分别为25.8%和25.5%。由此表明凋落物对土壤温湿度没有影响。



\* 表示对照和去除凋落物处理间差异显著。

图1 土壤温度、土壤水分和土壤呼吸的季节动态

### 3.2 凋落物对土壤呼吸的影响

CK和去除凋落物处理的土壤呼吸季节动态变化趋势一致,均呈单峰曲线,8月下旬达到峰值(图1(C)),分别为 $(15.60 \pm 1.80)$ 和 $(8.15 \pm 1.39) \mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ ,除了2010年2、3月份和5、11月上旬以及2011年1月下旬外,其他时间内两处理之间差异均

显著( $p < 0.05$ )。基于全年数据,CK和去除凋落物处理的土壤呼吸年均值分别为 $(5.91 \pm 0.28)$ 和 $(3.50 \pm 0.35) \mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ ,差异极显著( $p < 0.01$ ),去除凋落物后土壤呼吸速率降低了40.8%。

### 3.3 凋落物对土壤呼吸温度敏感性的影响

CK和去除凋落物处理下土壤呼吸与土壤温度

间均呈显著的指数性关系,分别解释土壤呼吸季节变化的55.4%和59.7%(图2)。经计算CK和去除凋落物处理的 $Q_{10}$ 分别为5.8和4.9。去除凋落物后,土壤呼吸对温度的敏感性降低了16.5%。根据

凋落物呼吸速率与土壤温度的指数关系式(图3),凋落物呼吸的 $Q_{10}$ 估算为10.6。因此凋落物对土壤呼吸的温度敏感性存在影响。

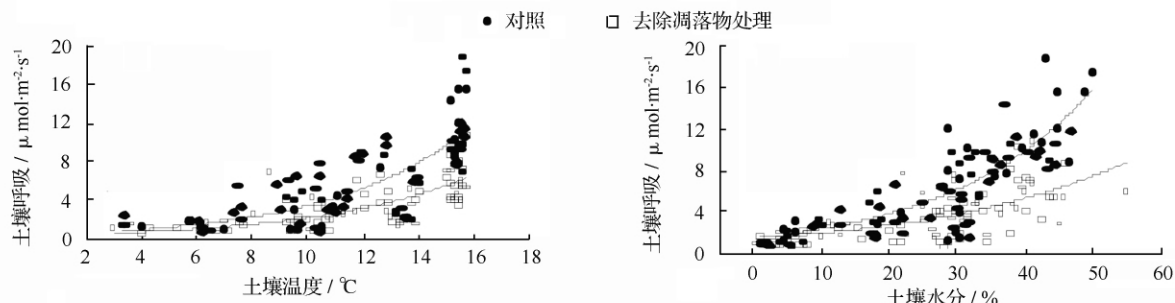


图2 土壤呼吸与土壤温度、土壤水分的关系

### 3.4 凋落物呼吸季节动态及其影响因子

凋落物呼吸呈明显的季节动态,为单峰曲线,与CK季节动态一致,8月下旬呼吸值最大,为 $7.46 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,高呼吸速率主要维持在6—10月,达全年呼吸量的77.1%。根据凋落物呼吸与土壤温度和土壤水分的偏相关性分析,凋落物呼吸与土壤温度( $r=0.72, p<0.01$ )和土壤水分( $r=0.86, p<$

$0.01$ )的相关性均极显著。土壤温度和湿度分别解释了凋落物呼吸变化的39.2%和78.0%(图3),双因子模型显示土壤温度和土壤水分解了凋落物分解变化的91%( $R_{sl}=0.008e^{0.096T_s}W_s^{1.306}, R^2=0.91, p<0.01$ )。由此可见,影响凋落物呼吸的环境因子主要是土壤温湿度,其中土壤湿度对其变化影响更明显。

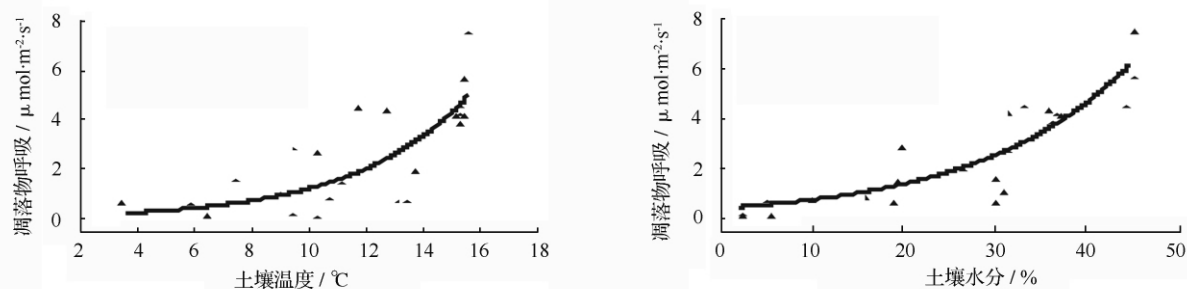


图3 凋落物呼吸与土壤温度、土壤水分的关系

## 4 讨论

哀牢山中山湿性常绿阔叶林土壤呼吸季节变化明显,变化趋势与冯文婷等<sup>[4]</sup>的研究结果相同,但是他们在测定土壤温湿度时去除了呼吸箱周围的凋落物及腐殖质层,因而所得的结果略高于本研究,但其土壤呼吸速率月均值的最高值和最低值(分别为 $4.45$ 和 $0.80 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )则低于本研究中的 $13.19$ 和 $1.11 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,这可能与植物生长的年际变化和凋落物的去除有关。在本研究中,去除凋落物显著降低了土壤呼吸速率,凋落物呼吸的年均贡献率高达40.8%,高于陈光水等<sup>[5]</sup>收集国内62个森林样地数据得出的20.2%,与温带混交硬木林的37%接近<sup>[6]</sup>。凋落物对土壤呼吸存在直接和间接贡献,前者是自身的分解,后者是凋落物分解过程中,可溶性有机物质进入土壤,对土壤有机质的分解产生影响。研究发现这些可溶性有机物质能

促进微生物呼吸<sup>[14]</sup>,并促发激发效应<sup>[11-12]</sup>。Schaefer等<sup>[14]</sup>发现在哀牢山中山湿性常绿阔叶林去除凋落物后土壤呼吸的减少量大于凋落物的碳输入量。然而研究发现,退耕还湿地的凋落物添加降低了土壤呼吸速率的5%<sup>[17]</sup>,这可能是因为凋落物层增加了 $\text{CO}_2$ 从土壤向大气扩散的阻力。Maier和Kress<sup>[18]</sup>发现在北卡罗来纳州的火炬松林中,凋落物层较厚的地下15 cm处矿质土壤中的 $\text{CO}_2$ 体积分数高于凋落物层较薄的;陈四清等<sup>[19]</sup>报道过内蒙古温性草原地表凋落物层能减缓土壤向大气排放 $\text{CO}_2$ ;骆土寿等<sup>[20]</sup>证实了海南岛尖峰岭热带山地雨林内凋落物层对土壤呼吸的屏蔽作用。由此可见,凋落物对土壤呼吸的贡献可能最终取决于凋落物分解与屏蔽作用之间的平衡。

土壤呼吸对温度的敏感性通常用 $Q_{10}$ 表示,Janssens等<sup>[21]</sup>认为 $Q_{10}$ 值不只是对温度敏感性的一种量度,而是对温度、根生物量和活性、水分条件和

其他因子响应的综合结果,并受植被类型的影响<sup>[2]</sup>。去除凋落物后土壤呼吸的 $Q_{10}$ 值降低了,这与Boone等<sup>[23]</sup>的研究结果相似,可能的解释是凋落物通过自身呼吸的高温度敏感性影响土壤呼吸的 $Q_{10}$ 。本研究中凋落物呼吸的 $Q_{10}$ 高达10.6,凋落物的去除必然会降低土壤呼吸的 $Q_{10}$ 。然而施政等<sup>[24]</sup>在武夷山森林生态系统中发现去除凋落物后土壤呼吸对温度的敏感性有增加趋势,王光军等<sup>[25-26]</sup>在枫香和樟树林以及杉木林中也发现同样的趋势。这可能是土壤中的可溶性有机碳在无新鲜凋落物的输入下被迅速消耗,留下较多的难以分解的惰性碳,众多研究发现土壤有机质分解对温度的敏感性随着基质的惰性增加而增强<sup>[27-29]</sup>,因而这种情况下凋落物的移除能够增加土壤呼吸的温度敏感性。

考虑到凋落物对土壤呼吸及其温度敏感性的影响,如果在测定土壤呼吸时,为了方便而去除凋落物,那么势必影响到对土壤呼吸的准确估算,进行影响对全球碳排放的估计。因此,在测定陆地生态系统土壤呼吸时,应尽量减少对凋落物层的干扰。

致谢:感谢中国科学院地理科学与资源研究所徐兴良副研究员对本文撰写提供的宝贵意见。

## 参 考 文 献

- [1] Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate [J]. Chemical and Physical Meteorology, 1992, 44B(2): 81-99.
- [2] Schlesinger W. Biogeochemistry: An analysis of global change [M]. Salt Lake City: Academic Press, 1997.
- [3] Dixon R K, Solomon A M, Brown S, et al. Carbon pools and flux of global forest ecosystems [J]. Science, 1994, 263(5144): 185-190.
- [4] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security [J]. Science, 2004, 304(5677): 1623-1627.
- [5] Bowden R D, Nadelhoffer K J, Boone R D, et al. Contributions of aboveground litter, belowground litter, and root respiration to total soil respiration in a temperature mixed hardwood forest [J]. Canadian Journal of Forest Research-Revue Canadienne De Recherche Forestiere, 1993, 23(7): 1402-1407.
- [6] 周存宇, 张德强, 王跃思, 等. 鼎湖山针阔叶混交林地表温室气体排放的日变化 [J]. 生态学报, 2004, 24(8): 1738-1741.
- [7] Sulzman E W, Brant J B, Bowden R D, et al. Contribution of aboveground litter, belowground litter, and rhizosphere respiration to total soil CO<sub>2</sub> efflux in an old growth coniferous forest [J]. Biogeochemistry, 2005, 73(1): 231-256.
- [8] 黄靖宇, 宋长春, 张金波, 等. 凋落物输入对三江平原弃耕农田土壤基础呼吸和活性碳组分的影响 [J]. 生态学报, 2008, 28(7): 3417-3424.
- [9] Feng W T, Zou X M, Schaefer D. Above- and belowground carbon inputs affect seasonal variations of soil microbial biomass in a subtropical monsoon forest of southwest China [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2009, 41(5): 978-983.
- [10] Lajtha K, Crow S E, Yano Y, et al. Detrital controls on soil solution N and dissolved organic matter in soils: a field experiment [J]. Biogeochemistry, 2005, 76(2): 261-281.
- [11] Park J H, Kalbitz K, Matzner E. Resource control on the production of dissolved organic carbon and nitrogen in a deciduous forest floor [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2002, 34(6): 813-822.
- [12] Kalbitz K, Meyer A, Yang R, et al. Response of dissolved organic matter in the forest floor to long-term manipulation of litter and throughfall inputs [J]. Biogeochemistry, 2007, 86(3): 301-318.
- [13] 吴征镒. 云南哀牢山森林生态系统研究 [M]. 昆明: 云南科学技术出版社, 1983.
- [14] 冯文婷, 邹晓明, 沙丽清, 等. 哀牢山中山湿性常绿阔叶林土壤呼吸季节和昼夜变化特征及影响因子比较 [J]. 植物生态学报, 2008, 32(1): 31-39.
- [15] 陈光水, 杨玉盛, 吕萍萍, 等. 中国森林土壤呼吸模式 [J]. 生态学报, 2008, 28(4): 1748-1761.
- [16] Schaefer D A, Feng W T, Zou X M. Plant carbon inputs and environmental factors strongly affect soil respiration in a subtropical forest of southwestern China [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2009, 41(5): 1000-1007.
- [17] 王丽丽, 宋长春, 郭跃东, 等. 三江平原不同土地利用方式下凋落物对土壤呼吸的贡献 [J]. 环境科学, 2009, 30(11): 3130-3135.
- [18] Maier C, Kress L. Soil CO<sub>2</sub> evolution and root respiration in 11 year-old loblolly pine (*Pinus taeda*) plantations as affected by moisture and nutrient availability [J]. Canadian Journal of Forest Research, 2000, 30(3): 347-359.
- [19] 陈四清, 崔晓勇, 周广胜, 等. 内蒙古锡林河流域大针茅草原土壤呼吸和凋落物分解的 CO<sub>2</sub> 排放速率研究 [J]. 植物学报, 1999, 41(6): 645-650.
- [20] 骆士寿, 陈步峰, 李意德, 等. 海南岛尖峰岭热带山地雨林土壤和凋落物呼吸研究 [J]. 生态学报, 2001, 21(12): 2013-2017.
- [21] Janssens I A, Dore S, Epron D, et al. Climatic influences on seasonal and spatial differences in soil CO<sub>2</sub> efflux, in fluxes of carbon, water and energy of European forests [M]. Berlin: Springer-Verlag, 2003.
- [22] Curiel Yuste J, Janssens I A, Carrara A, et al. Annual  $Q_{10}$  of soil respiration reflects plant phenological patterns as well as temperature sensitivity [J]. Global Change Biology, 2004, 10(2): 161-169.
- [23] Boone R D, Nadelhoffer K J, Canary J D, et al. Roots exert a strong influence on the temperature sensitivity of soil respiration [J]. Nature, 1998, 396: 570-572.
- [24] 施政, 汪家社, 何容, 等. 武夷山不同海拔植被土壤呼吸季节变化及对温度的敏感性 [J]. 应用生态学报, 2008, 19(11): 2357-2363.
- [25] 王光军, 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.
- [26] 王光军, 田大伦, 闫文德, 等. 改变凋落物输入对杉木人工林土壤呼吸的短期影响 [J]. 植物生态学报, 2009, 33(4): 739-747.
- [27] Davidson E A, Janssens I A. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change [J]. Nature, 2006, 440: 165-173.
- [28] Conant R T, Steinweg J M, Haddix M L, et al. Experimental warming shows that decomposition temperature sensitivity increases with soil organic matter recalcitrance [J]. Ecology, 2008, 89(9): 2384-2391.
- [29] Hartley I P, Ineson P. Substrate quality and the temperature sensitivity of soil organic matter decomposition [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2008, 40(7): 1567-1574.