

黄土丘陵沟壑区典型人工林土壤 CO₂ 释放规律及其影响因子

胡婵娟^{1,2}, 刘国华¹, 傅伯杰^{1,*}, 靳甜甜^{1,2}, 郭 雷^{1,2}, 苏常红^{1,2}

(1. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 为了解黄土丘陵沟壑区人工林土壤有机碳排放特征, 于 2007 年 8 月、2007 年 10 月和 2008 年 5 月对黄土丘陵沟壑区杏树、沙棘和刺槐 3 种人工林下土壤 CO₂ 释放速率及相关环境因子进行研究, 探讨了半干旱地区侵蚀环境下不同植被土壤 CO₂ 释放速率的变化规律及影响因子。杏树、沙棘和刺槐 3 种人工林土壤 CO₂ 释放存在差异, 日平均释放速率分别为 0.83 ~ 2.61 μmol · m⁻² · s⁻¹、0.83 ~ 3.32 μmol · m⁻² · s⁻¹ 和 0.80 ~ 3.45 μmol · m⁻² · s⁻¹, 刺槐和沙棘人工林土壤 CO₂ 释放速率高于杏树林, 3 种人工林的土壤 CO₂ 释放速率日变化及季节性变化表现一致, 春季和夏季的土壤 CO₂ 释放高于秋季。相关分析表明, 土壤温度是影响土壤 CO₂ 释放的主要因子, 但在干旱的春季和夏季, 土壤水分是土壤 CO₂ 释放的主要限制因子, 同时, 土壤理化性质和微生物生物量也对土壤 CO₂ 释放有显著影响。

关键词: 黄土高原; 土壤 CO₂ 释放; 土壤微生物; 人工林

文章编号: 1000-0933(2009)09-4700-10 中图分类号: Q142, Q948, S154.36, S718.5 文献标识码: A

Soil CO₂ emission and the driving factors of typical artificial woodlands in the hilly area of the Loess Plateau

HU Chan-Juan^{1,2}, LIU Guo-Hua, FU Bo-Jie^{1,*}, JIN Tian-Tian^{1,2}, GUO Lei^{1,2}, SU Chang-Hong^{1,2}

1 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(9): 4700 ~ 4709.

Abstract: To understand soil CO₂ emission variation trend and driving factors of different artificial woodlands under semi-arid and erosion environment in the hilly area of the Loess Plateau, soil CO₂ emission beneath three typical plantations of *Prunus armeniaca*, *Hippophae rhamnoides*, and *Robinia pseudoacacia* were measured on August 2007, October 2007 and May 2008. Meanwhile some environmental factors which related with soil CO₂ emission were also measured. The results showed that: (1) soil CO₂ emission for different artificial woodlands was different and the daily value was 0.83 — 2.61 μmol · m⁻² · s⁻¹, 0.83 — 3.32 μmol · m⁻² · s⁻¹, and 0.80 — 3.45 μmol · m⁻² · s⁻¹ for *Prunus armeniaca*, *Hippophae rhamnoides*, and *Robinia pseudoacacia* respectively, the soil CO₂ emission of *Hippophae rhamnoides* and *Robinia pseudoacacia* were higher than that of *Prunus armeniaca*; (2) different artificial woodlands had similar soil CO₂ emission diurnal and seasonal variation trend, soil CO₂ emission was higher in spring and summer; (3) significant correlation between soil CO₂ emission and environmental factors was found after regression and correlation analysis, soil temperature was main factor from the whole year but in the spring and summer which were droughty the soil moisture was the main factor, besides, soil physiochemical characters and soil microbial biomass also could influence soil CO₂ emission.

基金项目: 国家重点基础研究发展资助项目(2007CB4072005); 国家自然科学基金委创新群体资助项目(40621061); 国家科技支撑计划资助项目(2006BAD09B10)

收稿日期: 2008-12-16; 修订日期: 2009-03-16

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: bjfu@cashq.ac.cn

Key Words: the Loess Plateau; soil CO₂ emission; soil microorganism; artificial woodland

土壤作为一个巨大的碳库,是大气 CO₂ 重要的源或汇。全球陆地生态系统通过土壤呼吸排放的总碳量约为 76.5 PgC/a,比全球陆地净初级生产力的量还要高 30 ~ 60 PgC/a^[1],因而土壤呼吸是全球碳循环中一个主要流通途径^[2],即使发生较小的变化也会导致大气 CO₂ 浓度明显的改变^[3],由此可见,研究土壤呼吸对于探讨全球变化及其影响都具有十分重要的意义。

土壤呼吸是指土壤释放 CO₂ 的过程,主要包括土壤微生物、植物根系以及土壤动物呼吸和土壤中含碳物质化学氧化过程^[4,5],其中土壤微生物呼吸和植物根系呼吸所排放的二氧化碳占土壤呼吸总量的绝大部分,因而土壤呼吸还常常被作为土壤生物活性^[6] 和土壤肥力以及透气性的指标^[7]。土壤呼吸不仅受土壤温度、土壤含水量、降水、凋落物,以及土壤 C、N 含量等非生物因子的影响,而且受植被类型和盖度的影响。不同的植被下,温度、湿度、土壤有机质含量、凋落物的质量和储量、根系的密度和分布深度不同,这些都会对土壤呼吸产生不同的影响^[8]。了解土壤呼吸与影响因子之间的关系,能够为估计和预测陆地生态系统土壤呼吸的变化奠定基础,能为探索陆地生态系统在碳循环方面的源-汇功能提供有力证据^[9,10]。目前,在全球气候变化背景下,土壤 CO₂ 释放是陆地生态系统碳循环研究的核心内容之一。虽然我国相应的研究开展得比较晚,但在近年来已引起了足够的重视,相继进行了不同区域以及不同生态系统方面的研究,然而这些工作主要集中在热带、亚热带和温带森林^[11~13]、典型草原^[14] 以及荒漠植被^[15,16] 等自然生态系统土壤呼吸规律的探讨。与自然状态下相比较,人类活动对土壤 CO₂ 释放的影响非常严重,尤其是在我国,大量的人工林建设,不仅改变了原有的下垫面状况,同时也对生态系统的碳循环产生了一定的影响,因此,为了全面评价我国人工林的固碳潜力,有必要对人工林建设过程中土壤 CO₂ 的释放进行研究。

本研究选择半干旱黄土丘陵沟壑区为研究区域,该区域由于人类活动强烈导致水土流失严重,长期以来,为治理水土流失,已在该区域进行了大量的植被建设和恢复工作,因此,在该区域开展植被恢复过程中土壤 CO₂ 释放的研究具有一定的代表性。在野外实验过程中选择区域内杏树、沙棘和刺槐 3 种典型人工林为研究对象,研究不同人工林建设过程中土壤 CO₂ 释放规律及其与环境因子之间的关系,为我国乃至全球碳循环研究提供半干旱地区特别是侵蚀十分严重的黄土丘陵沟壑区的基础数据,同时也为探讨不同植被恢复过程中土壤 CO₂ 释放规律提供理论基础。

1 试验材料与方法

1.1 研究区域概况

本试验的研究区位于陕西省延安市羊圈沟小流域(36°42'N,109°31'E),流域面积 2.02 km²,该区属于黄土高原典型丘陵沟壑地貌,地形破碎,沟壑纵横。海拔 1025 ~ 1250 m,暖温带半干旱季风气候,年平均降雨量 550 mm,降雨量年内和年际间变化很大,70% 的降雨集中在每年的 7 ~ 9 月份。该区域土壤类型主要是黄绵土,抗蚀性差,水土流失严重。植被主要是种植的刺槐、沙棘、杏树等人工林以及撂荒后形成的荒草地。

在研究区域内,选择同一坡向,同一坡位的杏树(*Prunus armeniaca*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)和刺槐(*Robinia pseudoacacia*) 3 种人工林为研究对象,划分 3 块样地,样地的基本特征为经纬度 36°42'07"N,109°31'24"E,海拔 1143 m,坡向东偏南 20°,坡度为 30°。样地面积约 200 m²,林下草本主要有茵陈蒿(*Artemisia capillaris*)、太阳花(*Portulaca grandiflora*)、紫花地丁(*Herba Violae*)、长芒草(*Stipa bungeana*)等。

1.2 土壤 CO₂ 释放的测定方法

本研究采用动态箱式法测定土壤 CO₂ 释放(LI-8100 红外分析仪及 10 cm 短期监测气室;LI-COR Biosciences, Lincoln, Nebraska)。于 2007 年 8 月、2007 年 10 月及 2008 年 5 月对 3 个样地土壤 CO₂ 释放进行测定。在测定的前一天,将 7 个 PVC 垫圈埋入样地较为平坦的地段,随机分布,去除地表的草本和凋落物。于第二天 9:00 ~ 17:00 点监测土壤 CO₂ 释放的日变化,分析时采用 7 个样点的平均值。

测定土壤 CO₂ 释放的同时,测定 0 ~ 5 cm 深度内的土壤温度(LI-8100TC, LI-COR Inc, Nebraska, USA,

$\pm 1.5^{\circ}\text{C}$, $0 \sim 5^{\circ}\text{C}$)、土壤体积水分含量 (ML2X, England, $\pm 0.01\%$, $0 \sim 40^{\circ}\text{C}$; $\pm 0.02\%$, $40 \sim 70^{\circ}\text{C}$) 以及地表附近 (地上 5cm) 的空气温湿度 (Testo-615, Germany, $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$)。

1.3 土壤样品的采集及分析

在监测土壤 CO_2 释放的同时,在样地设置的垫圈附近采集 $0 \sim 10\text{cm}$ 土样进行混合,每个样地采集 3 个混合土样,一部分风干用于土壤理化性质的测定,一部分 4°C 保存用于土壤微生物量的测定。另外在每个样地用环刀法采集 3 个土样用于测定土壤容重。具体的测定方法为:土壤有机碳用重铬酸钾氧化外加加热法;全氮用半微量凯式法^[17];土壤微生物量碳采用氯仿熏蒸- 0.5molL^{-1} 的 K_2SO_4 浸提法,用 $0.5\text{molL}^{-1}\text{K}_2\text{SO}_4$ 溶液浸提氯仿熏蒸和未熏蒸土壤中的可溶性碳,土液比为 1:4,浸提溶液中的有机碳采用 UV-Persuate 全自动有机碳分析仪 (Tekmar-Dohrmann Co. USA) 测定, $K_c = 0.45$ ^[18]。

1.4 数据分析方法

采用 Excel 2003 和 SPSS 软件进行数据处理和统计分析,采用单因素方差分析 (one-way ANOVA) 和最小显著差异法 (LSD) 比较不同数据组间的差异,用 Pearson 相关系数评价不同因子间的相关关系,采用非线性回归法拟合和检验回归方程。

2 结果与分析

2.1 不同人工林土壤基础理化性质及土壤微生物生物量的变化

如表 1 所示,沙棘林具有相对较高的土壤总氮和容重,但 3 种人工林之间未有显著性差异。pH 值的大小顺序为杏树林 > 沙棘林 > 刺槐林。土壤有机碳和微生物生物量碳均存在明显的季节性变化 (图 1),但季节性变化趋势不同,有机碳 8 月份和 5 月份高于 10 月份,但在不同的月份 3 种人工林间均无显著性差异 ($P > 0.05$),微生物生物量碳 10 月份最高,且在 8 月份和 10 月份 3 种人工林间差异性显著 ($P < 0.05$)。

表 1 不同人工林的土壤理化性质

Table 1 Soil physiochemical characteristics of different artificial woodlands

林型 Types	总氮 Total nitrogen ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	容重 Bulk density ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	pH
杏树林 <i>Prunus armeniaca</i> woodland	$0.45 \pm 0.005\text{ A}$	$1.14 \pm 0.020\text{ A}$	$8.47 \pm 0.028\text{ A}$
沙棘林 <i>Hippophae reamnoides</i> woodland	$0.45 \pm 0.006\text{ A}$	$1.21 \pm 0.019\text{ A}$	$8.43 \pm 0.035\text{ A}$
刺槐林 <i>Robinia pseudoacacia</i> woodland	$0.43 \pm 0.010\text{ A}$	$1.18 \pm 0.055\text{ A}$	$8.39 \pm 0.006\text{ A}$

同一列数据后不同大写字母代表相同年份不同的人工林之间的差异显著 ($P < 0.05$) Data in same column under different capital letters meant significant difference at 0.05 level among different kinds of artificial woodlands

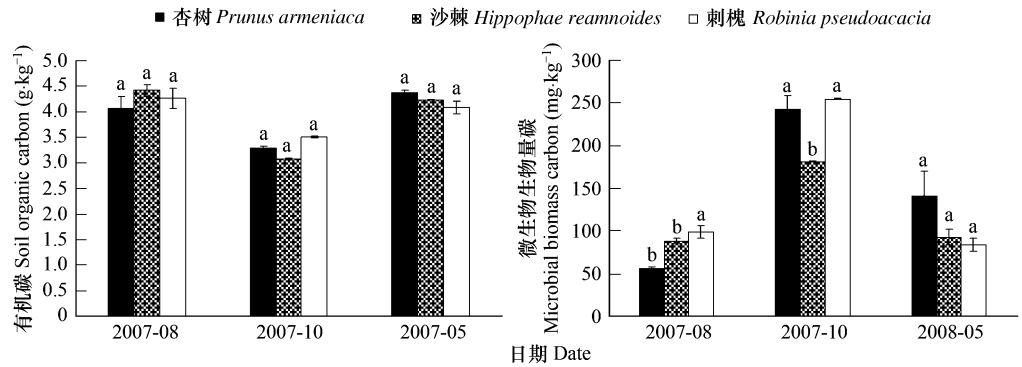


图 1 不同人工林有机碳及微生物生物量碳的变化

Fig. 1 Soil organic carbon and soil microbial biomass carbon of different artificial woodlands

图中小写字母不同代表在 $P < 0.05$ 水平上差异显著 Different small letters in the figure meant significant difference at 0.05 level;下同 the same below

2.2 不同人工林土壤 CO₂ 释放速率的日变化及季节变化

图 2 显示,杏树、沙棘和刺槐 3 种人工林土壤 CO₂ 释放速率在春季和夏季具有相似的日变化趋势,8 月和 5 月份的白天的最高值出现在 10:00 左右,除刺槐林和 5 月份的沙棘林在午后出现另一个峰值外,土壤 CO₂ 释放速率的值从 10:00 后便呈现递减的趋势。秋季的日变化趋势与春季和夏季不同,10 月份土壤 CO₂ 释放速率最高值推迟出现在 12:00 ~ 14:00 之间的中午时分,夏季和春季太阳辐射强,温度较高,土壤水分较低,土壤水分抑止了土壤呼吸随温度升高而升高的趋势,到了 10 月份,温度降低,水分的蒸发减少,土壤 CO₂ 释放的日变化趋势与温度变化趋势趋于一致。如图 3 所示,3 种人工林相比较,3 个季节杏树林全天的土壤 CO₂ 平均释放速率均低于沙棘林和刺槐林,其中 8 月份和 5 月份刺槐林的土壤 CO₂ 释放速率最高,10 月份沙棘林最高,但

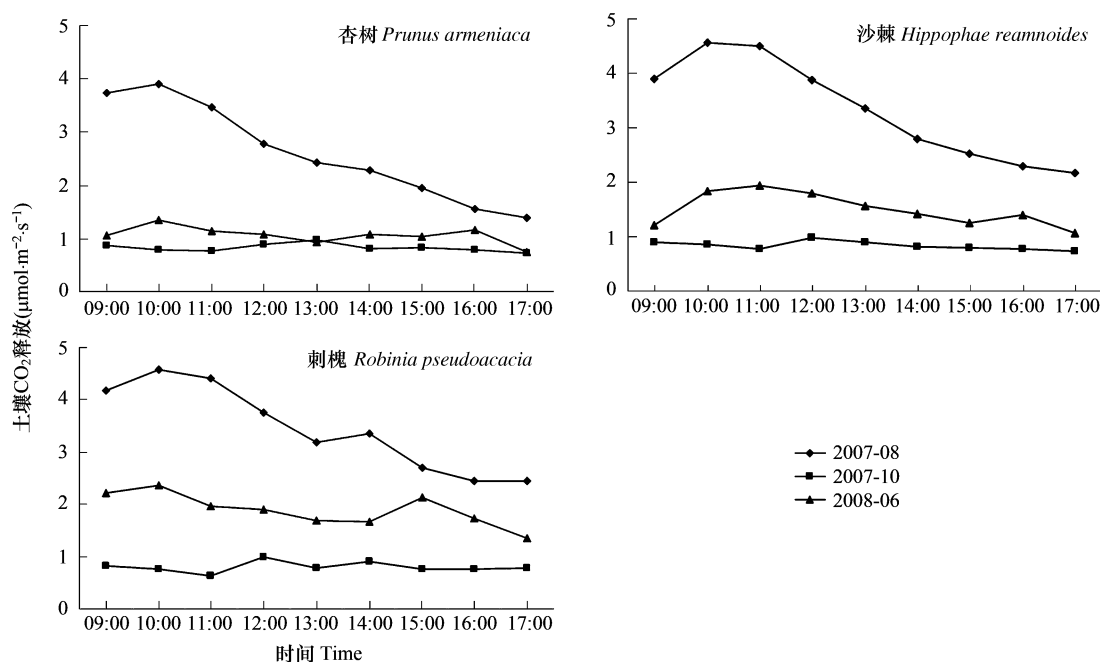


图 2 不同人工林土壤 CO₂ 释放的日变化动态

Fig. 2 Diurnal dynamics of soil CO₂ emission across different artificial woodlands

方差分析显示,3 种人工林之间除 5 月份差异显著外其他两月份差异均未达到显著水平 ($P > 0.05$)。3 种人工林存在相似的季节变化趋势,均表现为夏季 > 春季 > 秋季,3 个月份间差异均达到显著水平 ($P < 0.05$)。

2.3 不同人工林环境因子的变化特征

3 种人工林土壤温度在不同的月份日变化趋势较为相似,8 月份的土壤温度最高值出现在 12:00 左右,10 月份和 5 月份土壤温度的日变化曲线的峰值出现在 14:00 左右,总体来说土壤温度的季节变化明显,表现为 8 月份最高,变化范围为 25 ~ 40℃,5 月份其次,变化范围为 15 ~ 25℃,10 月份最低,在 10 ~ 15℃ 之间变化,3 种人工林相比,杏树林和沙棘林的土壤温度稍高于刺槐林。3 种人工林土壤水分 10 月份最高,5 月份最低,从日变化趋势来看 8 月份土壤水分呈现递减趋势,而其他两月份变化幅度较小,表现相对平稳。在水分含量

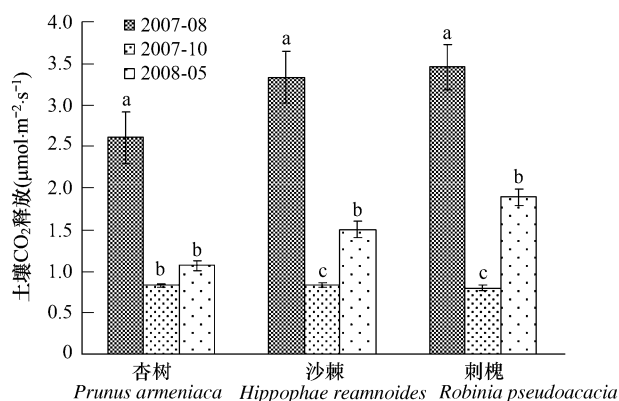


图 3 不同人工林土壤 CO₂ 释放的季节变化

Fig. 3 Seasonal dynamics of soil CO₂ emission across different artificial woodlands

小写字母不同代表不同月份之间的差异显著 ($P < 0.05$) Different small letters meant significant difference at 0.05 level among different months

相对较高的 8 月和 10 月份,刺槐林的土壤含水量高于沙棘林和杏树林,而在干旱的 5 月份,沙棘林的水分则相对较高。空气温度 8 月份 > 5 月份 > 10 月份,空气湿度则为 10 月份 > 8 月份 > 5 月份,空气温度在中午及午后相对较高,而空气湿度在上午及傍晚相对较高。

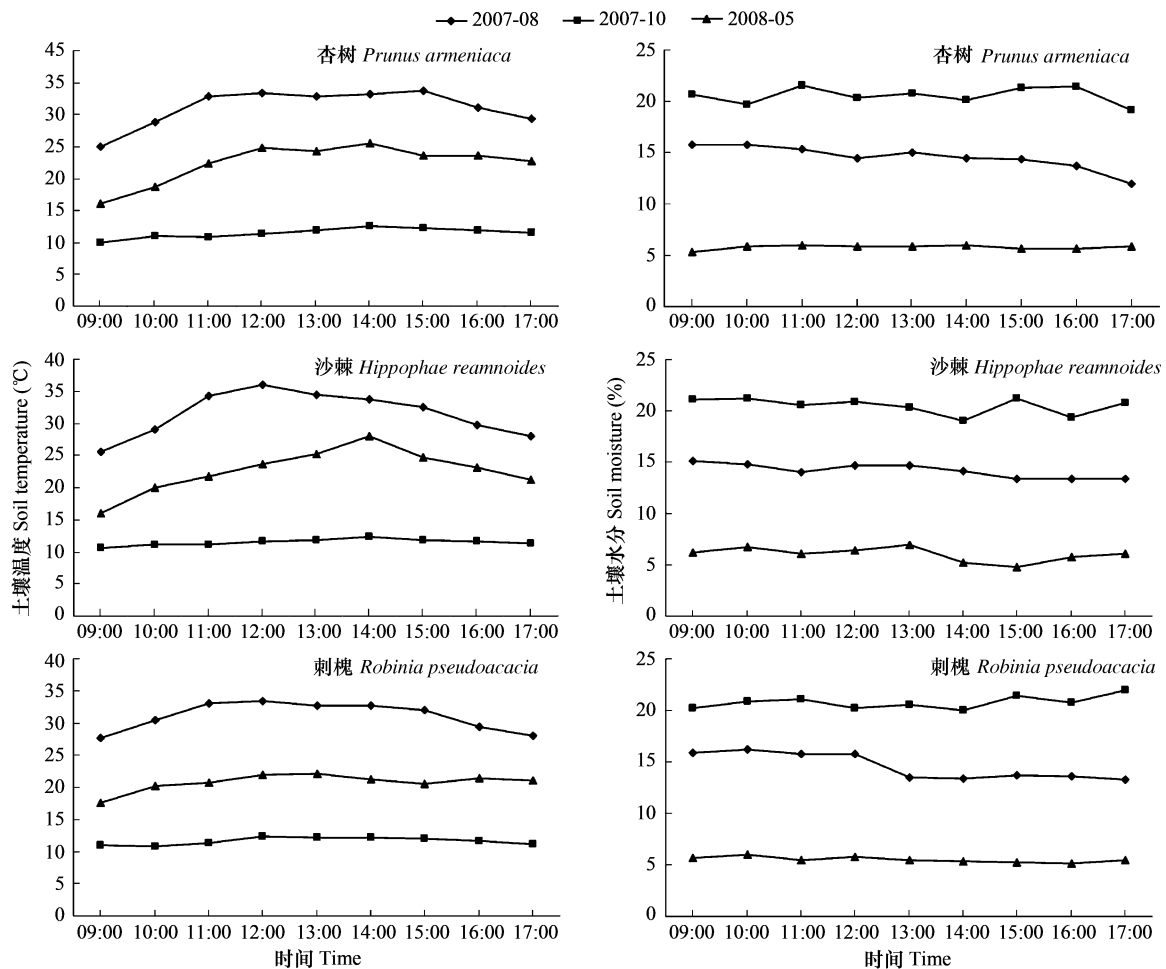


图 4 不同人工林土壤温度和土壤水分的日变化动态

Fig. 4 Diurnal dynamics of soil temperature and soil moisture across different artificial woodlands

2.4 不同人工林土壤 CO₂ 释放与影响因子之间的关系

2.4.1 土壤 CO₂ 释放与土壤温度之间的关系

如图 6 所示,土壤 CO₂ 释放速率与土壤温度进行回归分析后发现,3 种不同人工林土壤 CO₂ 释放与土壤温度间均存在显著的指数回归关系, R^2 值分别为 0.5816、0.7828 及 0.7935,全年来看,土壤温度对土壤呼吸的变化具有很高的贡献率。土壤 CO₂ 释放与土壤温度进行指数拟合后计算温度敏感系数 Q_{10} 值 ($R = \alpha e^{\beta T}$ $Q_{10} = e^{10\beta}$, R 为土壤 CO₂ 释放, T 为土壤温度, α 及 β 是常数)。杏树、沙棘和刺槐 3 种人工林整体来看 Q_{10} 值分别为 1.54、1.78 及 1.91,刺槐林对温度的敏感性稍高,但从不同的月份来看,杏树林在 8 月份,沙棘林在 10 月份及 3 种人工林在 5 月份随着温度的升高土壤 CO₂ 释放并没有显著增长。

2.4.2 土壤 CO₂ 释放与土壤水分之间的关系

土壤 CO₂ 释放速率与土壤水分进行回归分析,研究发现二者存在极显著相关关系 ($P < 0.001$),回归方程为二项式方程,全年来看,土壤 CO₂ 释放随土壤水分的变化曲线为单峰曲线,土壤体积含水量为 15% 左右时土壤 CO₂ 释放速率最高。由图 7 可以看出,3 种人工林土壤 CO₂ 释放随土壤水分的变化存在相似的趋势,在 5 月和 8 月份含水量相对较低的情况下,随着土壤水分的升高土壤 CO₂ 释放速率呈现增长趋势,而在土壤水分

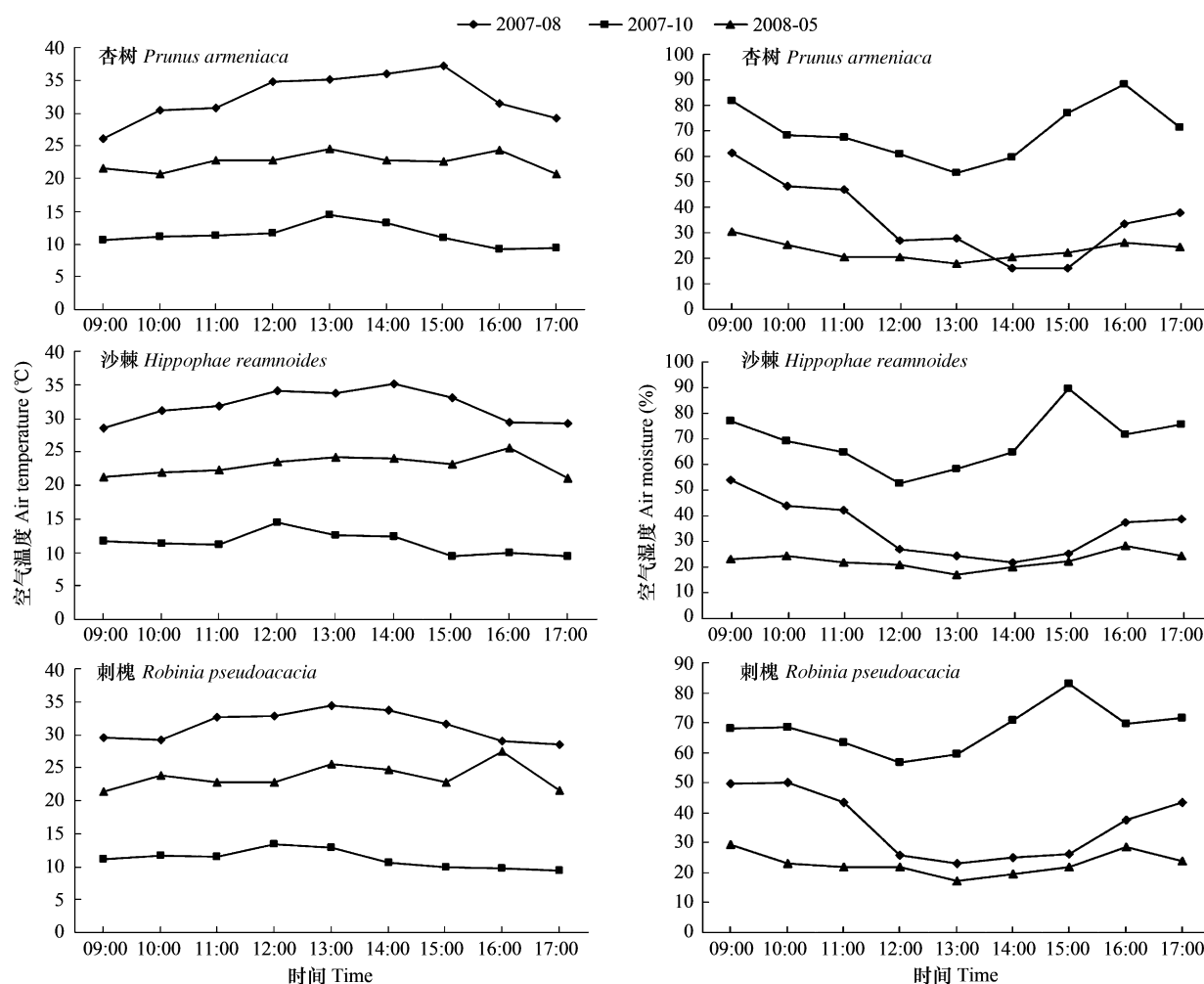


图5 不同人工林空气温度和空气湿度的日变化动态

Fig. 5 Diurnal dynamics of air temperature and air moisture across different artificial woodlands

相对较高的10月份,土壤CO₂释放受土壤水分的影响较小,变化幅度很小。可见,在半干旱的黄土丘陵沟壑地区,土壤水分对土壤CO₂释放的抑止主要发生在春季与夏季。

2.4.3 土壤CO₂释放与土壤有机碳及土壤微生物之间的关系

利用3种人工林不同月份土壤CO₂日平均释放速率,计算出人工林下土壤的日碳通量,日碳通量($\text{gC} \cdot \text{m}^{-2}$) = 日平均释放速率($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) $\times 24 \times 3600 (\text{s}^{-1}) \times 10^{-6} \times 12 (\text{g} \cdot \text{mol}^{-1})$ 。将日碳通量与有机碳及微生物生物量碳进行回归分析,如图8所示,日碳通量与有机碳和微生物生物量碳都存在显著的回归关系,但随着有机碳的升高,土壤日碳通量显著升高,随着土壤微生物生物量碳的增加,土壤日碳通量却呈现递减的趋势。

3 讨论

植被是影响土壤呼吸的主要因子之一,虽然在同一区域气候、地貌等差异不是很大,但研究发现,刺槐、沙棘和杏树3种人工林土壤CO₂的释放存在显著的差异,刺槐与沙棘高于杏树,这种差异主要出现在干旱季节(5月)。相关的研究也表明在该区域不同的植被群落土壤呼吸存在显著性差异^[19]。但是,由于区域的气候条件相对一致,3种人工林的土壤CO₂释放季节性变化规律具有相似性,8月份显著高于10月份和5月份,土壤CO₂释放存在明显的季节变化与影响土壤呼吸的环境因子的季节性变化关系密切。

土壤温度和土壤水分是影响土壤呼吸的主要环境因子,其中土壤温度能够直接影响气体扩散速率,对土壤CO₂释放的影响较其它环境因子更为直接^[20];土壤水分含量则因其对生态系统代谢具有重要的生理、物理

影响效应而成为生态系统水平上影响土壤 CO₂ 释放的重要因素之一。对杏树、沙棘和刺槐 3 种人工林土壤 CO₂ 释放规律的研究发现,土壤温度在全年尺度上是土壤 CO₂ 释放的主要控制因子,土壤 CO₂ 释放与土壤温度的季节性变化相同且回归分析显示土壤温度能够解释全年土壤 CO₂ 释放 58% ~ 80% 的变异,其中,3 种人工林相比,对温度的敏感性刺槐林 > 沙棘林 > 杏树林。但是土壤温度作为影响土壤 CO₂ 释放的主要因子,在相对干旱的春季和夏季,土壤 CO₂ 释放速率的变化与土壤温度的变化并不同步,最高值出现在温度相对较低的 10 点,随着温度的升高土壤 CO₂ 并未显著增长,而递减的趋势与土壤水分的日变化趋势则十分相似。继而对土壤 CO₂ 释放和土壤水分进行回归分析,研究发现 3 种人工林下土壤 CO₂ 释放和土壤水分间均存在显著相关性,8 月份和 5 月份随着土壤水分的增加土壤 CO₂ 释放显著增加,而在水分含量相对较高的 10 月,土壤 CO₂ 释放随水分的增加变化幅度较小,这表明在半干旱的黄土丘陵沟壑地区,土壤温度较高,土壤水分相对较低的季节,土壤水分应该是土壤 CO₂ 释放的主要限制因子,过低的土壤水分使得根系或微生物缺乏必须的生存环境,从而产生的 CO₂ 量会减少,这也与前人的研究结果相符合^[21]。以往的研究表明当土壤水分含量适中时,温度是土壤呼吸最重要的影响因子;而在干旱的夏季和热带的干季,土壤水分是显著影响土壤 CO₂ 释放的因子。温度较高时,水分限制降低了本应随温度上升的土壤 CO₂ 释放量,尤其在干旱、半干旱地区,干旱胁迫导致的根系呼吸降低程度在高温地区比低温地区更加明显^[22]。Conant 等人的研究也表明,对于半干旱生态系统而言,温度影响土壤 CO₂ 释放的季节变化,但是在干旱的夏季,较低的土壤水分是其主要限制因子^[23]。

微生物的呼吸是土壤呼吸的重要组成部分,微生物是影响土壤 CO₂ 释放的重要生物因子,相关研究表明土壤微生物的呼吸在土壤呼吸中占 50% 左右^[20],在有些地区可以达到 65% ~ 82% 左右^[12]。本研究中杏树、沙棘和刺槐 3 种人工林土壤微生物对土壤 CO₂ 释放速率也表现出一定影响,微生物生物量碳的含量 8 月份和 10 月份刺槐林高于沙棘林和杏树林,与土壤 CO₂ 释放速率的大小关系一致,但是土壤 CO₂ 释放与土壤微生物未见相似的季节性变化趋势,且二者的回归关系也表明随着微生物生物量碳的增加,土壤 CO₂ 释放量呈降低趋势,这说明土壤微生物的呼吸总量一方面与微生物生物量有关,还与其他方面诸如微生物的生物活性有关,微生物易受环境因素的影响,10 月份微生物的量最高,但 10 月份较低的温度有可能抑止微生物的活性,因此随着微生物生物量的增加土壤呼吸并没有呈现明显的增加趋势。

研究中选择 3 种人工林处在相同的坡位和坡向,受侵蚀的影响程度相似,且种植的年代相对较短,土壤的养分含量 3 种人工林间未见显著差异,总体来讲,土壤 CO₂ 释放随着有机碳的增加而增加,这与相关研究中随着有机碳和全氮含量的增加,土壤 CO₂ 释放速率呈现增高的趋势^[24] 相似,但也有一些研究表明土壤 CO₂ 释放随着 pH 值的增加而增加,随着土壤有机碳的增加却降低^[25]。研究发现 3 种人工林土壤呼吸高低与容重的变化没有相似的趋势,以往的研究表明,土壤容重用来定性衡量土壤透气性及其孔隙度,土壤容重的增加,降

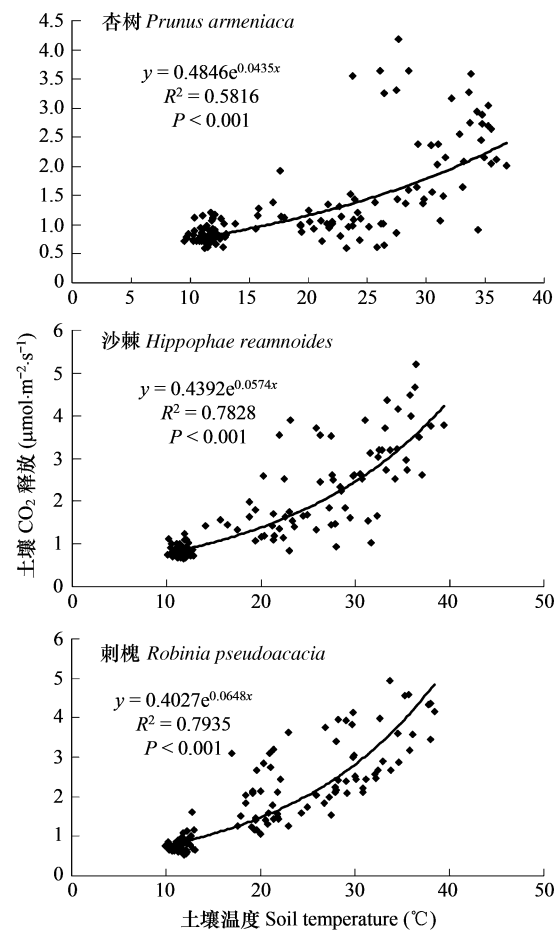


图6 不同人工林土壤 CO₂ 释放与土壤温度之间的关系
Fig. 6 Relationships between soil CO₂ emission and soil temperature under different artificial woodlands

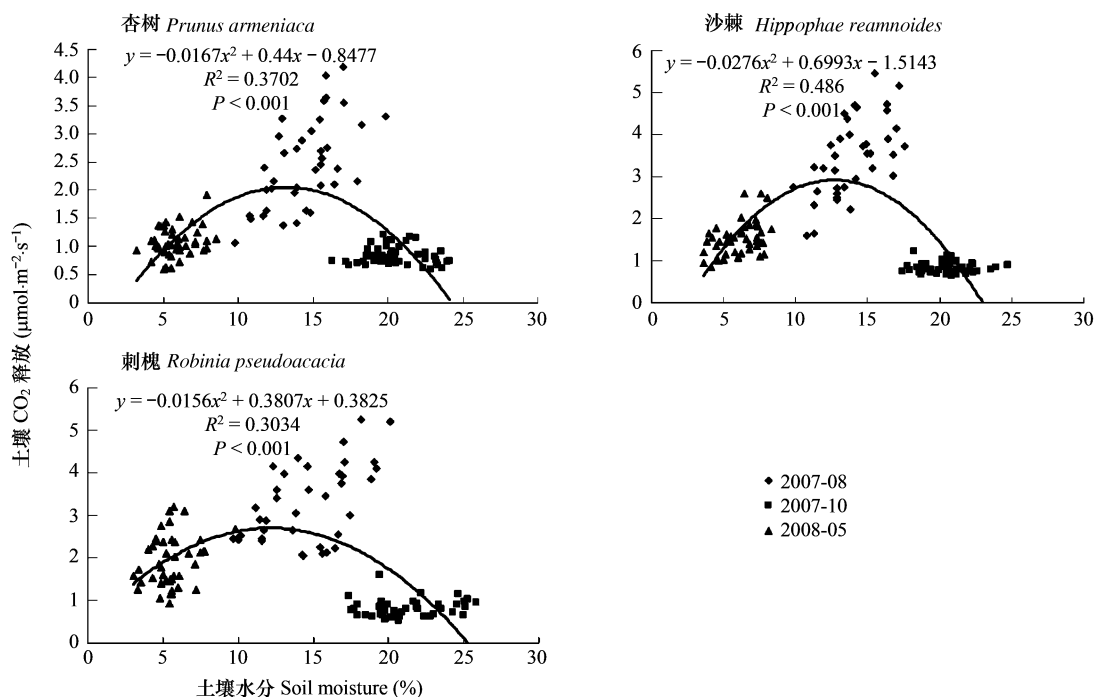
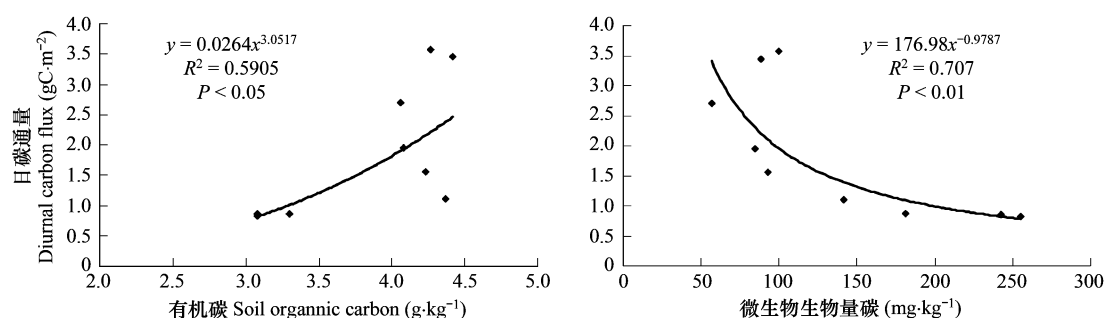
图 7 不同人工林土壤 CO₂ 释放与土壤水分之间的关系Fig. 7 Relationships between soil CO₂ emission and soil moisture under different artificial woodlands

图 8 土壤日碳通量与土壤有机碳及微生物生物量碳之间的关系

Fig. 8 Relationships between soil carbon flux with soil organic carbon and soil microbial biomass carbon

低氧气由空气向土壤中扩散的速率,影响土壤的含氧量,从而降低土壤微生物和土壤酶的活性,抑止土壤呼吸^[26,27],这说明对于该区域 3 种植被的土壤 CO₂ 释放,容重并不是主要的抑止因子。研究中刺槐林 pH 值最低,杏树林最高,而土壤 CO₂ 释放则刺槐林最高,当地的土壤偏碱性,过高的 pH 值有可能抑止微生物的生长,造成土壤呼吸值较低。

通过对土壤 CO₂ 释放各影响因素的研究和分析表明,在黄土丘陵沟壑区,不同人工林土壤 CO₂ 释放主要受土壤温度和水分的协同作用,在相对干旱的季节主要是受土壤水分的胁迫,温度作用相对较小,而在土壤水分相对较多的季节,则主要是受土壤温度的影响。此外,土壤微生物对土壤 CO₂ 的影响也比较大。

4 结论

通过对黄土丘陵沟壑区典型人工林杏树、沙棘和刺槐不同季节土壤 CO₂ 释放及相关影响因子的监测,研究结论如下:

(1) 不同人工林下土壤 CO₂ 释放存在差异,总体来看刺槐林最高。土壤 CO₂ 释放速率日变化的最高值不同的季节出现时间不同,在土壤水分较低的干旱季节出现在 10:00 左右,在土壤水分较高的 10 月份出现在中

午及午后。土壤 CO₂ 释放季节变化敏感,夏季和春季高于秋季。

(2) 土壤温度和水分是影响土壤 CO₂ 释放的主要环境因子,对于黄土丘陵沟壑区,在干旱的夏季和春季土壤水分是主要抑制因子,在秋季,土壤温度是主要抑制因子,3 种人工林相比,刺槐林土壤 CO₂ 释放对温度的响应更为敏感。

(3) 土壤理化性质的差异和土壤微生物也对土 CO₂ 释放有着显著的影响,具体的影响机制还有待进一步的探索和分析。

References:

- [1] Raich J W, Potter C S. Global patterns of carbon dioxide emissions from soils. *Global Biogeochemical Cycles*, 1995, 9: 23—36.
- [2] Schimel D S. Terrestrial ecosystems and the carbon cycle. *Global Change Biology*, 1995, 1: 77—91.
- [3] Cao Y S, Li Z A, Jiang Y Q, Ding S T. A review of soil respiration of terrestrial ecosystems. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2004, 26(1): 138—143.
- [4] Hanson P J, Edwards N T, Garten C T, Andrews J A. Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: A review of methods and observations. *Biogeochemistry*, 2000, 48: 115—146.
- [5] Ma X M, Zhu B, Han G X, Chen Y S, Gao M R, Zhang Z J. The advance in research of soil respiration. *Advance in Earth Sciences*, 2004, 19: 491—495.
- [6] Fu S L, Cheng W X, Susfalk R. Rhizosphere respiration varies with plant species and phenology: a greenhouse pot experiment. *Plant and Soil*, 2002, 239: 133—140.
- [7] Neilson J W, Pepper I L. Soil respiration as an index of soil aeration. *Soil Science Society of American Journal*, 1990, 54: 428—432.
- [8] Zhang D Q, Shi P L, Zhang X Z. Some advance in the main factors controlling soil respiration. *Advances in Earth Science*, 2005, 20(7): 778—785.
- [9] Chen Q S, Li L H, Han X G, Yan Z D. Effects of water content on soil respiration and the mechanisms. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(5): 972—978.
- [10] Buchmann N. Biotic and abiotic factors controlling soil respiration rates in *Picea abies* stands. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32: 1625—1635.
- [11] Wu Z M, Zeng Q B, Li Y D, Zhou G Y, Chen B F, Du Z H, Lin M X. A preliminary research on the carbon storage and CO₂ release of the tropical forest soils in Jianfengling, Hainan Island, China. *Acta Phytocologica Sinica*, 2007, 27(11): 4678—4685.
- [12] 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 Phytocologica Sinica*, 2003, 23(8): 1673—1678.
- [13] Liu S H, Fang J H, Kiyouta M. Soil respiration of mountainous temperate forests in Beijing, China. *Acta Phytocologica Sinica*, 1998, 22(2): 119—126.
- [14] Cui X Y, Chen S Q, Chen Z Z. CO₂ release from typical *Stipa grandis* grassland soil. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11(3): 390—394.
- [15] Zhang L H, Chen Y N, Li W H, Zhao R F. Soil carbon dioxide emission and affecting factors under *Halxylon ammodendron* community in Junggar basin. *Journal of Desert Research*, 2007, 27(2): 266—272.
- [16] Huang X, Li W H, Chen Y N, Ma J X. Soil respiration of desert riparian forests in the lower reaches of Tarim River as affected by air temperature at 10cm above the ground surface and soil water. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(5): 1951—1958.
- [17] Lu R K. Analytical methods of soil agrochemistry. Beijing: Chinese Agriculture Science and Technology Press, 1999.
- [18] Wu J, Joergensen R G, Pommerening B, Chaussod R, Brookes P C. Measurement of soil microbial biomass C by fumigation-extraction-an automated procedure. *Soil Biology and Biochemistry*, 1990, 22: 1167—1169.
- [19] Li H S, Liu G Q, Wang H Z, Li W H, Chen C G. Seasonal changes in soil respiration and the driving factors of four woody plant communities in the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(9): 4009—4106.
- [20] Schlesinger W H. Carbon balance in terrestrial detritus. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1977, 8: 51—81.
- [21] Li R, Li Y, Li J J, Sun L F, Zhang Q W. A preliminary study on soil respiration of eroded sloping land in Chines Loess Plateau. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2008, 29(2): 123—126.
- [22] Bryla D R, Bouma T J, Hartmond U, *et al.* Influence of temperature and soil drying on respiration of individual roots in citrus: Integrating greenhouse observations into a predictive model for the field. *Plant, Cell and Environment*, 2001, 24: 781—790.

- [23] Conant R T, Klopatek J M, Malin R C, *et al.* Carbon pools and fluxes along an environmental gradient in northern Arizona. *Biogeochemistry*, 1998, 43: 43–61.
- [24] Wu Y Q, Liu G H, Fu B J, Guo Y H, Hu C J. Soil CO₂ emission distribution along an elevation gradient and the controlling factors in the forest ecosystem. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(11): 4678–4685.
- [25] Kemmitt S J, Wright D, Coudling K, *et al.* pH regulation of carbon and nitrogen dynamics in two agricultural soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38: 898–911.
- [26] Bauer P J, Frederick J R, Novak J M, *et al.* Soil CO₂ flux from a norfolk loamy sand after 25 years of conventional and conservation tillage. *Soil and Tillage Research*, 2006, 90: 205–211.
- [27] Tejada M, Moreno J L, Hernandez M T, *et al.* Application of two beet vinasse forms in soil restoration: Effects on soil properties in an arid environment in southern Spain. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2007, 119: 289–298.

参考文献:

- [3] 曹裕松,李志安,江远清,丁思统. 陆地生态系统土壤呼吸研究进展. *江西农业大学学报*, 2004, 26(1): 138~143.
- [5] 马秀梅,朱波,韩广轩,陈玉成,高美荣,张中杰. 土壤呼吸研究进展. *地球科学进展*, 2004, 19: 491~495.
- [8] 张东秋,石培礼,张宪洲. 土壤呼吸主要影响因素的研究进展. *地球科学进展*, 2005, 20(7): 778~785.
- [9] 陈全胜,李凌浩,韩兴国,阎志丹. 水分对土壤呼吸的影响及机理. *生态学报*, 2003, 23(5): 972~978.
- [11] 吴仲民,曾庆波,李意德,周光益,陈步峰,杜志鹤,林明献. 尖峰岭热带森林土壤 C 储量和 CO₂ 排放量的初步研究. *植物生态学报*, 1997, 21(5): 416~423.
- [12] 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.
- [13] 刘绍辉,方精云,清田信. 北京山地温带森林的土壤. *植物生态学报*, 1998, 22(2): 119~126.
- [14] 崔晓勇,陈四清,陈佐忠. 大针茅典型草原土壤 CO₂ 排放规律的研究. *应用生态学报*, 2000, 11(3): 390~394.
- [15] 张丽华,陈亚宁,李卫红,赵锐锋. 准噶尔盆地梭梭群落下土壤 CO₂ 释放规律及其影响因子研究. *中国沙漠*, 2007, 27(2): 266~272.
- [16] 黄湘,李卫红,陈亚宁,马建新. 塔里木河下游荒漠河岸林群落土壤呼吸及其影响因子. *生态学报*, 2007, 27(5): 1951~1958.
- [17] 鲁如坤主编. 土壤农业化学分析方法. 北京:中国农业出版社, 1999.
- [19] 李红生,刘广全,王鸿喆,李文华,陈存根. 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. *生态学报*, 2008, 9, 28(9): 4009~4106.
- [21] 李嵘,李勇,李俊杰,李俊杰,孙丽芳,张晴雯. 黄土丘陵侵蚀坡地土壤呼吸初步研究. *中国农业气象*, 2008, 29(2): 123~126.
- [24] 吴雅琼,刘国华,傅伯杰,郭玉华,胡婵娟. 森林生态系统土壤 CO₂ 释放随海拔梯度的变化及其影响因子. *生态学报*, 2007, 27(11): 4678~4685.