

# 黄土区刺槐林土壤含水量变化对土壤呼吸强度的影响

吕海波<sup>1,2</sup>, 梁宗锁<sup>1,3</sup>

(1. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100;  
2. 渭南师范学院 化学与生命科学学院, 陕西 渭南 714000; 3. 西北农林科技大学 生命学院, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** 通过室内培养实验来评估土壤含水量的变化对土壤枯落物层、不同深度土壤层及 DOC 淋失后的土壤呼吸的影响。采集安塞纸坊沟 31 a 刺槐林土样及林下混合枯落物, 通过碱液吸收法测定 100%, 20% 和 2% 含水量条件下 3 个深度土样(20, 40 和 60 cm); 去除 DOC 土样(仅 100% 含水量条件下); 3 种处理枯落物混合土样(林下混合枯落物、刺槐枯落物和草本类枯落物)培养过程中 CO<sub>2</sub> 的累计释放量。结果表明, 100% 和 20% 含水量条件下各深度土壤 CO<sub>2</sub> 释放量为 20 cm 土样 > 60 cm 土样 > 40 cm 土样; 20 cm 土样去除 DOC 后 CO<sub>2</sub> 释放量明显减少, 40 cm 明显增加, 60 cm 没有明显变化; 混合枯落物土样在 100% 含水量条件下 CO<sub>2</sub> 释放量最高; 20% 和 2% 含水量条件下刺槐枯落物 CO<sub>2</sub> 释放量明显大于草类, 而 100% 含水量条件下草类枯落物略大于刺槐枯落物。研究证明土壤含水量对 SOC 组分含量和枯落物种类不同的土壤层呼吸强度存在差异性影响, 强降水对 DOC 的淋失可造成表层土壤呼吸的减弱。

**关键词:** CO<sub>2</sub> 释放量; 土壤呼吸; 溶解性有机碳; 土壤深度

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2013)01-0044-05

中图分类号: S153.6

## Effect of Different Soil Water Contents on Soil Respiratory Intensity of *Robinia Pseudoacacia* Forest in Loess Area

LÜ Hai-bo<sup>1,2</sup>, LIANG Zong-suo<sup>1,3</sup>

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. College of Chemistry and Life Science, Weinan Normal University, Weinan, Shaanxi 714000, China; 3. College of Life Science, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** An incubational experiment was designed to assess how soil water content affects the respiratory intensities of litter layers, different soil layers and DOC-removed soil samples. Soil and mixed litter samples were taken in 31 year *Robinia pseudoacacia* forest in Zhifanggou Watershed, Ansai County. The accumulative CO<sub>2</sub>-release amounts of soil samples and DOC-removed soil samples(100% water content only) at three soil depths(20, 40 and 60 cm) and in three controlled litter-mixed soil samples(mixed by complex litters, including *Robinia pseudoacacia* litters and herbage litters) were determined in laboratory under the three soil water contents of 100%, 20% and 2%, respectively. Results showed that the CO<sub>2</sub>-release levels at the different soil depths were in the order of: 20 cm > 60 cm > 40 cm under the controlled 100% and 20% water contents. Under the 100% water content and after DOC was removed, the accumulative CO<sub>2</sub>-release amount of the soil samples at the 20 cm depth decreased, but obviously increased for samples at the 40 cm soil depth and had no remarkable change at the 60 cm soil depth. The accumulative CO<sub>2</sub>-release amount of complex litter-mixed soil samples was the highest under the 100% water content. The amount of simply *Robinia pseudoacacia* litter-mixed samples was obviously higher than that of herbage litter-mixed samples under the 20% and 2% water contents, but slightly lower under the 100% water content. The asynchronous effect of water

收稿日期: 2011-12-21

修回日期: 2012-04-14

资助项目: 中国科学院知识创新项目“土壤—植被—大气界面碳传输的各环节的物理特征和生理生态过程与 C 库的源汇效应研究”(KZCX2-XB2-05-01); 陕西省教育厅项目“大荔沙苑温室西瓜滴灌可行性及最优灌溉制度研究”(12JK0814); 渭南市科技创新项目“渭南地区主要农作物秸秆搭配还田的增肥效果研究”(2012JCYJ-7)

作者简介: 吕海波(1980—), 男(汉族), 山西省永济市人, 在读博士, 讲师, 主要从事土壤有机碳研究。E-mail: lhboboo@163.com。

通信作者: 梁宗锁(1965—), 男(汉族), 陕西省扶风县人, 博士研究生, 教授, 主要从事中草药规范化栽培的理论与技术研究。E-mail: liangzs@ms.iswc.ac.cn。

content levels is suggested on the respiratory intensity of the soil layers with different SOC compositions and litter types. Removed DOC by heavy precipitation from soil subsurface layers can reduce respiratory intensity of surface soil layers.

**Keywords:** CO<sub>2</sub>-release; soil respiration; dissolved organic carbon; soil depth

全球变暖改变了大气环流和水文循环,导致全球和地区范围内降水格局的变化,因此,在全球变化的背景下,了解土壤水分状况对土壤呼吸的影响机理,对于估计和预测未来全球变化的方向以及理解陆地生态系统的碳汇碳源功能都有重要的理论和实践意义<sup>[1]</sup>。目前,国内土壤呼吸强度对大气降水响应方面的研究并不多,已有的也多集中于降水变率大的干旱地区,如有研究发现干旱地区土壤增湿后 CO<sub>2</sub> 出现脉冲式增加<sup>[2-4]</sup>,土壤 CO<sub>2</sub> 通量迅速增加,从而成为土壤年 CO<sub>2</sub> 释放总量的一个重要组成部分<sup>[5]</sup>。

对陕西黄土高原地区降水变化进行研究发现,从 20 世纪 90 年代末期以来,陕西省日降水量大于 25 mm 的强降水日数有增加趋势<sup>[6]</sup>。暴雨量的增加能够改变土壤含水量、增大土壤可溶性有机质(DOM)的淋失,进而影响土壤呼吸强度。一般来说,土壤含水量的变化是通过改变微生物生存环境来影响其呼吸强度的,微生物对 SOC 的矿化分解是土壤呼吸的主要过程之一,而土壤水分是微生物活动必要的需求。微生物产生的胞外酶以及利用的有机物的扩散都需要在液相中进行,因此当含水量低时,会降低胞外酶和呼吸底物的扩散以及微生物的移动,从而降低了微生物与呼吸底物的接触机会,最终影响到土壤呼吸,而土壤水分过高会影响到氧气的扩散,从而影响微生物活动和 SOC 的氧化<sup>[7]</sup>。另外,土壤含水量的变化可通过对微生物可利用基质(如枯落物碎屑、水溶性有机碳)扩散的影响而间接作用于土壤呼吸。枯落物的分解产物为微生物提供必要的 C、N 源<sup>[8]</sup>,枯落物碎屑的随水迁移增加了深层土壤的微生物量,从而影响土壤的呼吸强度;同时,水溶性有机质(DOC)是土壤微生物主要的呼吸底物和能量来源<sup>[9]</sup>。有关研究证明适量的降水能够增加 DOC 的释放,从而对土壤呼吸有促进作用<sup>[1]</sup>,而从理论上讲,强降水和持续性降水的淋洗作用可使土壤浅层大量 DOC 淋失,可能造成土壤呼吸强度的减弱,但这方面的研究鲜见报道。

本研究基于室内土壤呼吸培养方法,选择陕西省安塞纸坊沟流域 31 a 人工刺槐林林下土壤及枯落物为研究对象,观测和分析了淹水状态、好气增湿状态和干旱状态下未处理土样、枯落物添加土样及去除 DOC 土样在 59 d 和 93 d 培养过程中 CO<sub>2</sub> 的累积释

放量,目的在于研究降水导致的土壤增湿后枯落物层及 20, 40, 60 cm 各层土壤呼吸强度的变化,通过对比分析来反映不同深度土样的呼吸强度变化、混合枯落物中刺槐枯落物和草本枯落物对土壤呼吸的贡献程度以及 DOC 淋失后土壤呼吸强度的变化。

## 1 材料与方法

### 1.1 采样点概况

纸坊沟流域地理坐标为 109°13'46"—109°16'03"E, 36°46'42"—36°46'28"N,地形破碎,沟壑纵横,为黄土高原丘陵沟壑地貌。属暖温带半干旱季风气候,海拔 1 010~1 400 m,年均气温 8.8 °C,年均降水量 505.3 mm,降水多集中于 6—9 月,占全年降水量的 60%~75%。土壤为黄土母质下的黄绵土,抗侵蚀能力差。植被类型处于暖温带落叶阔叶林向干草原过渡的森林草原带。

采集样品的刺槐林林龄 31 a,海拔 1 296 m 左右,胸径 23.8 cm,高度 15~20 m,郁闭度 0.75~0.80,间距 4 m×4 m,坡度为 21.4°,坡向为南西西。林地下部草本植物主要由铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)、芨蒿(*A. giraldii*)、达乌里胡枝子(*Lespedeza dahuricus*)、长芒草(*Stipa bungeana*)组成。

### 1.2 样品采集和处理

培养样品采集于 2009 年 7 月。采样时 20 d 内无降水记录。设置 3 个 50 cm×50 cm 样方收集地表枯落物(不包括直立枯落物),每个样方附近随机选择并挖掘 3 个剖面坑以采集 20±2 cm, 40±2 cm, 60±2 cm 深度土样,样方呈品字形平均分布。各剖面同深度土样均匀混合后取 1 000 g 带回实验室在冰箱内保存直到分析。枯落物在烘箱中 105 °C 烘干 48 h 计算干重,计算刺槐林枯落物量为 362.9 g/m<sup>2</sup>,仔细分选混合枯落物的刺槐类枯落物和草本类枯落物,分别称重,计算两者的百分含量(表 1)。

表 1 样地枯落物含量及其养分概况

枯落物种类	质量百分比/%	SOC 含量/(g·kg <sup>-1</sup> )	TN 含量/(g·kg <sup>-1</sup> )	C/N 值
刺槐类	70.5	219.69	12.95	16.96
草本类	29.5	300.25	8.66	34.68

土样化学分析前风干 3 d, 破碎后挑选去除残留植物碎屑过 1 mm 筛。SOC 用重铬酸钾外加热法。易氧化性碳 (POC) 用 333 mmol/L 高锰酸钾氧化—光度计法: 称量含有 15 mg 有机态碳的土样加入 25 ml 浓度为 333 mmol/L 高锰酸钾溶液, 常规震荡 1 h 后在转速 2 000 rpm 下离心 5 min, 将上清液用去离子水以 1 : 250 倍稀释, 稀释样品用分光光度计在 565 纳米处测定吸光值, 根据预先测定的标准曲线来计算 POC 含量。用酸水解法<sup>[10]</sup> 测定惰性 SOC (ROC), 缓性 SOC (LOC) 用公式  $LOC = SOC - POC - ROC$  得到。全氮用开氏定氮法 (KJELTEC 2300 全自动定氮仪)。供试枯落物化学成分见表 1, 供试土样化学成分如表 2 所示。

表 2 供试土样 SOC 组分含量 g/kg

深度/cm	SOC	POC	LOC	ROC
20	2.45	0.16	0.85	1.45
40	1.98	0.11	0.63	1.24
60	1.79	0.07	0.84	0.88

用去离子水去除土壤中的可溶性有机质。称取过 1 mm 筛风干土样 50 g 放入预先称重的 250 ml 锥形瓶中, 加入去离子水 150 ml (水土比 1 : 5), 在 25 °C 下震荡 1 h, 静置 5 h 后小心抽去上层水分, 称重并调整瓶内水土比为 1 : 1。

### 1.3 室内培养实验

本研究将土壤含水量分为 100%, 20% 和 2% 这 3 个水平, 分别代表了过量降水、有限降水和干旱状态下的土壤含水量。称取 8 组 20, 40 和 60 cm 深度土样 50 g 分别放入 24 个 250 ml 洁净锥形瓶中, 每组包括 3 深度土样各 1 个。其中 2 组用来进行去除 DOC 预处理, 其他每 3 组分别调整含水量为 100%, 20% 和 2%, 确保重复样品实验结果无明显差异。

另称取 9 份 20 cm 深度土样 50 g 分别放入洁净的锥形瓶中, 其中 3 份加入烘干混合枯落物 2 g, 3 份加入烘干刺槐枯落物 25.0 g, 3 份加入烘干草本枯落

物 10.46 g, 枯落物量由其在样地中的质量比换算得来 (表 1)。每组 3 个处理将枯落物混合均匀后加入去离子水以调整含水量为 100%, 20% 和 2%。每个处理不做重复。

装有样品的锥形瓶敞口放置 2 d 以恢复微生物活性。将装有 5 ml 0.4 mol/L 的 NaOH 溶液的 10 ml 离心管小心斜靠在每个锥形瓶内, 用橡胶塞密封锥形瓶后在  $25 \pm 5$  °C 的培养箱黑暗状态下培养, 培养前一周每天通气 1 次 (30 min), 通气过程中注意关闭离心管塞。每 2~3 d 随时收集离心管中的碱液, 并重新注入同量碱液。抽出的吸收液加 2 ml 2 mol/L 的 BaCl<sub>2</sub>, 摇匀后以酚酞为指示剂, 用 0.1 mol/L HCl 滴定, 中和未耗尽的 NaOH, 通过 HCl 消耗量来计算 CO<sub>2</sub> 的摩尔数。培养后期碱液提取间隔根据前次碱液残留量估算。培养室同时培养 33 个样品 + 2 个空白对照。

### 1.4 数据分析

在 Excel 2003 中进行数据统计、作图, 在 SPSS 11.0 软件中进行方差分析: LSD 法 ( $p \leq 0.05$ )。

## 2 实验结果

### 2.1 不同土壤深度土壤呼吸强度

同一条件下 3 深度土壤呼吸强度决定于 SOC 组分差异 (表 2)。3 深度土壤 SOC, POC 及 ROC 随深度增加呈递减趋势, 但 LOC 为 20 cm 土样 > 60 cm 土样 > 40 cm 土样, 这与 100% 和 20% 含水量下 CO<sub>2</sub> 总释放量对比特点类似 (图 1), 土壤含水量较大条件下的 LOC 矿化可能导致这种差异特点 (表 2)。

3 深度土壤样品呼吸强度随含水量的变化情况见图 1。含水量为 100% 和 20% 时, CO<sub>2</sub> 累积释放量都为 20 cm 土样 > 60 cm 土样 > 40 cm 土样, 20 cm 与 40 cm 有显著差异, 含水量为 2% 时, 20 cm 和 40 cm 差距较小, 土壤呼吸强度为 20 cm 土样 (1.03 mmol) > 40 cm 土样 (0.95 mmol) > 60 cm 土样 (0.67 mmol), 20 cm 和 40 cm 差异显著。

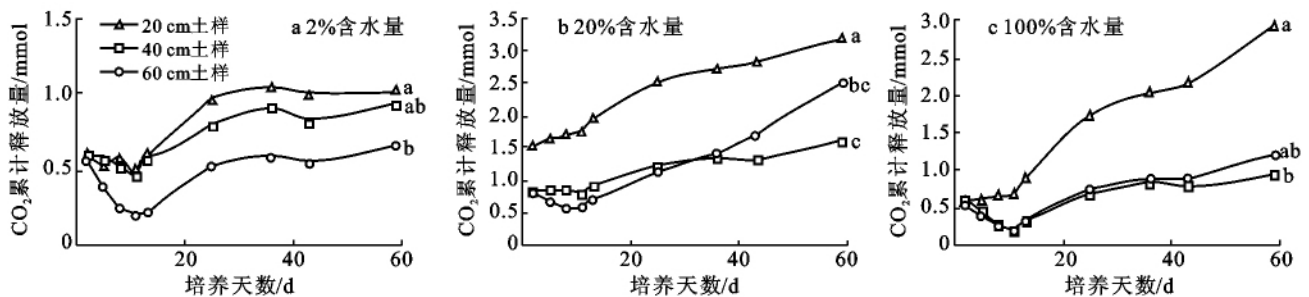


图 1 不同含水量条件下 3 个深度土样 CO<sub>2</sub> 释放量对比

注: 不同字母表示差异显著 ( $p \leq 0.05$ )。下同。

### 2.2 枯落物混合处理土样的 CO<sub>2</sub> 累积释放量

在 93 d 室内培养过程中,添加混合枯落物(刺槐林土表枯落物)的土壤在 100%含水量时 CO<sub>2</sub> 累积释放量最高,与 20%含水量差异显著。2%和 20%含水量条件下 CO<sub>2</sub> 累积释放量在 73 d 内没有明显差异,73~93 d 的 2%含水量 CO<sub>2</sub> 释放量大于 20%含水量(图 2)。

分选混合枯落物为草本和木本(刺槐),结果显示,2%和 20%含水量条件下 CO<sub>2</sub> 累积释放量木本混合样品含量大于草本且呈显著差异,而 100%含水量条件下差异减小,草本稍大于木本样品(图 3)。

刺槐林土壤表层枯落物在强降水情况下(淹水) CO<sub>2</sub> 释放量较高,地表刺槐枯落物较草本枯落物 CO<sub>2</sub> 释放速率在短期内没有明显的差异。而非淹水状态下,混合枯落物 CO<sub>2</sub> 释放量随含水量增加在短期内没有明显变化,高含水量持续一段时间后 CO<sub>2</sub> 释放量有所增加,刺槐枯落物 CO<sub>2</sub> 释放量明显高于草类枯落物。

### 2.3 去除 DOC 土样 CO<sub>2</sub> 释放量的变化

为分析强降水冲刷对土壤呼吸的影响,采用 3 个深度土壤与其处理后土壤进行呼吸培养,结果显示(图 4),水洗去除 DOC 后,20 cm 土样 CO<sub>2</sub> 释放量明显减少,40 cm 先减少后增加,CO<sub>2</sub> 释放累积量有一定的增加,60 cm 土样略有减少,主要表现在培养初期(5 d 内)和末期(59 d),培养中期没有明显差异。

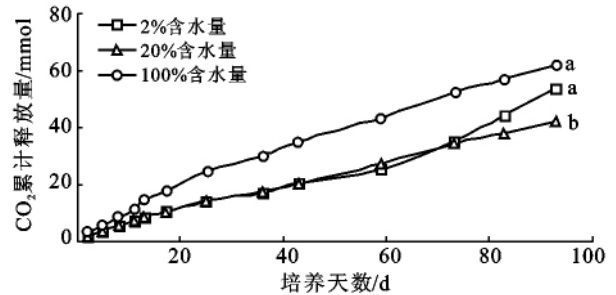


图 2 3 个含水量条件下混合枯落物的 CO<sub>2</sub> 释放量对比

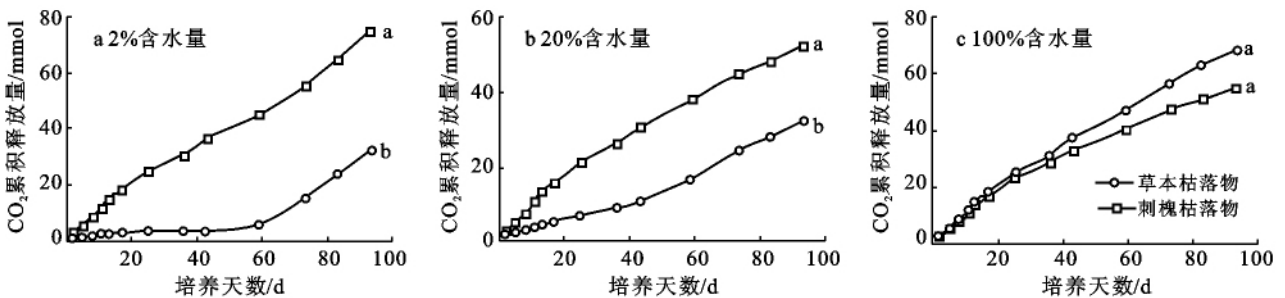


图 3 3 个含水量条件下刺槐林枯落物和草本类枯落物 CO<sub>2</sub> 释放量对比

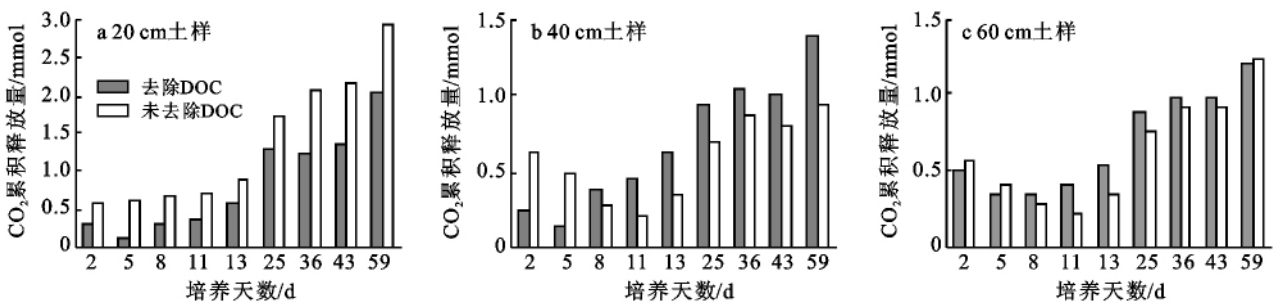


图 4 100%含水量条件下 3 个深度土壤样品 DOC 去除对 CO<sub>2</sub> 释放量的影响

## 3 讨论

### 3.1 SOC 组分差异对呼吸强度的影响

培养过程中培养物质的矿化分解是微生物主导下的生物化学过程,受培养物质的化学成分及培养条件的影响。土壤中 SOC 组分差异造成了其呼吸强度的不同。SOC 中活性碳库(POC)、缓性碳库(LOC)和惰性碳库(ROC)的周转周期呈递增趋势<sup>[11]</sup>,说明三者的矿化降解能力依次递减,造成在各含水量条件

下 20 cm 土样 CO<sub>2</sub> 释放量大于 40 cm 和 60 cm 土样。

SOC 的降解性会因外部条件(温度和湿度)的改变而发生变化,一般情况下,随着温度的升高,土壤呼吸的温度敏感性(Q<sub>10</sub>)下降,水分过高或过低时 Q<sub>10</sub> 降低<sup>[7]</sup>。由于自然条件下不同深度土壤的温湿度、通气性等并不相同,当 3 个深度的土壤处于同一条件下进行培养,不同深度土壤的环境变化程度(如温湿度、通气性等)便出现差异,这可能造成了不同土壤层 SOC 组分降解速率的差异。图 1 显示 100%和 20%含水

量条件下 40 cm 土样  $\text{CO}_2$  释放量大于 60 cm 土样, 结合表 1 所示的 LOC 含量 60 cm 土样  $>$  40 cm 土样, 我们认为这种结果至少部分归功于 LOC 的差异性降解, 尽管 POC 含量在 40 cm 大于 60 cm, 60 cm 较高的 LOC 降解量弥补了较少的 POC 降解量。但这仅为一种推测, 不同 SOC 组分的温度敏感性机理尚未发现有研究成果。另外, 结果显示 POC 和 LOC 含量对土壤呼吸强度的贡献程度受到含水量的影响, 在 20% 含水量条件下 60 cm 土壤  $\text{CO}_2$  累积释放量高出 40 cm 0.86 mol, 而 100% 淹水条件下仅为 0.27 mol, 在 2% 含水量条件下 40 cm 土壤  $\text{CO}_2$  累积释放量最接近于 20 cm, LOC 的  $\text{CO}_2$  释放影响减小。

### 3.2 去除 DOC 对土壤呼吸强度的影响

去除 DOC 处理结果显示(图 4), 强降水的冲刷作用减弱了土壤表层呼吸强度, 对较深的土壤层没有明显的影响。由于降水的冲刷作用对深层土壤的影响有限, 深层 SOC 较难受到高强度的冲刷淋洗, 表土层 SOC 呼吸强度的变化可能是造成土壤强降水后呼吸强度减弱的原因。有研究认为, 有机碳的解聚和溶解是其矿化的先决条件, SOC 释放  $\text{CO}_2$  前必须先进入溶液中<sup>[12]</sup>, SOC 的矿化土壤中的 DOC 通常被认为是容易被微生物利用<sup>[13]</sup>, DOC 的淋失减弱了 SOC 的微生物降解能力, 进一步减小了微生物量, 这似乎是去除 DOC 后土壤呼吸强度减弱的一个原因。目前, DOC 的移除对土壤呼吸的影响尚无一致的结论, 本实验尽管在表土层 20 cm  $\text{CO}_2$  释放量变化明显, 40 cm 和 60 cm 在培养过程中没有出现一致的变化特点, 显示了降水淋失对土壤呼吸强度影响的复杂性。

## 4 结论

(1) 土壤呼吸强度主要决定于周转速率不同的 SOC 组分, 各土壤含水量条件下土壤呼吸强度并不随样品深度增加而减弱, 是环境改变后 SOC 这 3 种组分同时分解的结果。淹水条件(100%含水量)和 20%含水量条件下  $\text{CO}_2$  累积释放量为: 20 cm 土样  $>$  60 cm 土样  $>$  40 cm 土样, 在 2%含水量条件下 20 cm 和 40 cm 差距较小, 土壤呼吸强度为: 20 cm 土样  $>$  40 cm 土样  $>$  60 cm 土样, 显示了 SOC 组分的分解速率在不同含水量条件下存在差异, 表现为为 20%含水量  $>$  100%含水量  $>$  2%含水量。

(2) 不同种类枯落物的分解速率存在差异, 其差异随土壤含水量变化而变化。刺槐林土壤枯落物层呼吸强度在淹水状态下最强, 2%含水量和 20%含水量条件下呼吸强度在 73 d 培养过程中没有明显差

异, 但最终为前者大于后者。在淹水条件下(100%含水量), 枯落物层刺槐枯落物和草本类枯落物的呼吸强度贡献值没有明显差异, 但在好气条件下(2%和 20%含水量), 刺槐枯落物对呼吸强度的贡献远大于草本类枯落物。

(3) 强降水对 DOC 的淋失可能导致土壤表层呼吸强度的减弱。培养过程中, 20 cm 土样培养过程中去除 DOC 土样  $\text{CO}_2$  释放量明显少于原土样。与 20 cm 土样相比, 40 cm 土样和 60 cm 土样 DOC 淋失对  $\text{CO}_2$  释放量没有一致的影响。

(4) 土壤含水量对不同 SOC 组分、不同枯落物种类分解速率的影响, 以及强降水造成的 DOC 淋失对土壤呼吸强度的影响研究, 为土壤含水量和土壤呼吸强度的相关性研究提供一定的理论基础。但在自然环境中, 不同土壤层包含了不同 SOC 组分、不同枯落物种类等多种因素, 要深入理解含水量变化对土壤呼吸强度的作用机理, 还要深入研究影响呼吸强度的各种因素之间的耦合机制, 而这一问题需要进一步对自然状态下的土壤层进行综合研究。

### [参 考 文 献]

- [1] 邓东周, 范志平, 王红, 等. 土壤水分对土壤呼吸的影响[J]. 林业科学研究, 2009, 2(5): 722-727.
- [2] 张丽华, 陈亚宁, 李卫红, 等. 准噶尔盆地两种荒漠群落土壤呼吸速率对人工降水的响应[J]. 生态学报, 2009, 29(6): 2819-2827.
- [3] 常宗强, 冯起, 司建华, 等. 土壤水热条件对祁连山荒漠草原土壤  $\text{CO}_2$  通量的影响[J]. 干旱区地理, 2007, 30(6): 812-820.
- [4] Yang Yusheng, Chen Guangshui, Dong Bin, et al. Responses of soil respiration to soil rewetting in a natural forest and two monoculture plantations in subtropical China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(5): 953-958.
- [5] Borken W, Davidson E A, Savage K, et al. Drying and wetting effects on carbon dioxide release from organic horizons[J]. Soil. Sci. Soc. Am. J., 2003, 67(6): 1888-1896.
- [6] 杨文峰, 郭大梅. 陕西省强降水日数变化特征[J]. 干旱区研究, 2011, 28(5): 866-871.
- [7] 杨庆鹏, 徐明, 刘洪升, 等. 土壤呼吸温度敏感性的影响因素和不确定性[J]. 生态学报, 2011, 31(8): 2301-2311.
- [8] Sayer E J. Using experimental manipulation to assess the roles of leaf litter in the functioning of forest ecosystems[J]. Biological Reviews, 2006, 81(1): 1-31.
- [9] 陈全胜, 李凌浩, 韩兴国, 等. 水分对土壤呼吸的影响及机理[J]. 生态学报, 2003, 23(5): 972-978.

(下转第 52 页)

## 4 结论

(1) MBER 固化土的劈裂抗拉强度在 0.08 ~ 0.43 MPa, 水泥土的劈裂抗拉强度在 0.09 ~ 0.35 MPa, 固化土劈裂抗拉强度强度总体上比水泥土略大。

(2) 固化土和水泥土的劈裂抗拉强度随着剂量和龄期的增加而增大, 在含水率为最优含水率时达到最大值。

(3) 在含水率较低时, 固化土的劈裂抗拉强度随着含水率的增加而增大, 当含水率达到一定水平时固化土的劈裂抗拉强度随着含水率的增加而减小。实际应用中取最优含水率利于控制。建议固化土工程施工过程中, 将固化土的含水率控制在最优含水率附近进行施工, 并且至少养护 7 d, 确保固化土的性能充分发挥。

(4) 在本文研究的影响固化土的劈裂抗拉强度 3 种因素中, 剂量对固化土劈裂抗拉强度的影响最大, 在施工时应尤为注意对固化剂剂量的控制。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 胡军. 土壤固化剂在路基处理、道路基层中的应用研究[D]. 天津: 天津大学, 2007.
- [2] 郭印. 淤泥质土的固化及力学特性的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
- [3] 吕其林. 土壤固化剂在治理堤坝渗漏中的应用[J]. 水利科技与经济, 2008, 14(3): 229-231.
- [4] 季仁保, 周福国. 渠道防渗技术新进展[J]. 中国农村水利水电, 2003(4): 28-31.
- [5] 徐燕. 滨海淤泥的快速固化研究[D]. 武汉: 中国科学院研究生院, 2007.
- [6] 吴普特, 高建恩, 岳宝蓉. 一种坡地集流面的制备方法:

中国, CN 03128093 · 5[P]. 2003-10-29.

- [7] 冯浩, 彭红涛. HEC 和 AAM 添加剂对提高黄土集流效率的试验研究[J]. 农业工程学报, 2001, 17(3): 28-31.
- [8] 高建恩, 吴普特, 岳宝蓉, 等. 一种固化黄土集流面增流减糙施工方法: 中国, CN 200310118985. X[P]. 2004-11-17.
- [9] 李少斌, 冯浩, 吴普特, 等. 砒砂岩地区土壤固化剂集流面集水量的试验研究[J]. 四川水利, 2004(S): 44-47.
- [10] 樊恒辉, 高建恩, 吴普特, 等. MBER 土壤固化剂集流面的施工工艺研究[J]. 中国水土保持科学, 2005, 3(3): 56-59.
- [11] 陈涛, 周俊荣, 孙明星. HEC 固化剂对土壤渗透特性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2004, 22(4): 192-194.
- [12] 樊恒辉, 吴普特, 高建恩, 等. 密度和含水率对固化土无侧限抗压强度的影响[J]. 中国水土保持科学, 2006, 4(3): 54-58.
- [13] 柯结伟, 庞有师, 陈志勇. 土壤固化剂技术研究与工程应用现状[J]. 华东公路, 2007(5): 49-52.
- [14] 高建恩, 孙胜利, 吴普特. 一种新型土壤固化剂: 中国, CN200410073273. 5[P]. 2005-06-29.
- [15] 樊恒辉, 吴普特, 高建恩, 等. 固化土集流面无侧限抗压强度影响因素研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(9): 11-15.
- [16] 吴普特, 高建恩. 黄土高原水土保持新论: 基于降雨地表径流调控利用的水土保持学[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2006.
- [17] TJ057-94. 公路工程无机结合料稳定材料试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 1994.
- [18] 史庆轩. 混凝土圆柱体劈裂抗拉强度公式推导[J]. 治院科技, 1994, 34(4): 32-34.
- [19] 樊恒辉, 高建恩, 吴普特, 等. 固化土集流面无侧限抗压强度影响因素研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(9): 11-15.

(上接第 48 页)

- [10] Collins H P, Elliott E T, Pustian K, et al. Soil carbon pools and fluxes in long-term corn belt agroecosystems [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2000, 32(2): 157-168.
- [11] 杨丽霞, 潘剑君, 苑韶峰. 森林土壤有机碳库组分定量研究[J]. 土壤通报, 2006, 37(2): 241-244.
- [12] Ellert B H, Gregorich E G. Management induced changes in the actively cycling fractions of soil organic

matter[M]// Mcfee W W, Kelly J M. Carbon Forms and Functions in Forest Soils. Wisconsin, Madison, USA; Soil Science Society of America, Inc, 1995: 119-138.

- [13] Cook B D, Allan D L. Dissolved organic carbon in old field soils: Compositional changes during the biodegradation of soil organic matter[J]. Soil Biol. Biochem., 1992, 24(6): 595-600.