

DOI: 10.5846/stxb201109091325

周小刚, 郭胜利, 车升国, 张芳, 邹俊亮, 张彦军, 南雅芳, 李泽, 蒲辉. 黄土高原刺槐人工林地表凋落物对土壤呼吸的贡献. 生态学报, 2012, 32(7): 2150–2157.

Zhou X G, Guo S L, Che S G, Zhang F, Zou J L, Zhang Y J, Nan Y F, Li Z, Pu H. Aboveground litter contribution to soil respiration in a black locust plantation in the Loess Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(7): 2150–2157.

黄土高原刺槐人工林地表凋落物对土壤呼吸的贡献

周小刚^{1,2}, 郭胜利^{1,4,*}, 车升国³, 张芳⁴, 邹俊亮⁴, 张彦军⁴, 南雅芳⁴,
李泽⁴, 蒲辉⁵

(1. 中国科学院水利部水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室 杨凌 712100;

2. 中国科学院研究生院 北京 100049; 3. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所 北京 100081;

4. 西北农林科技大学 陕西杨凌 712100; 5. 昆明龙慧工程设计咨询有限公水保二部 昆明 650000)

摘要:于黄土高原沟壑区王东沟小流域 26 年刺槐人工林 (*Robinia pseudoacacia*) 中, 设置对照 (CK)、去除凋落物 (no litter, NL) 和倍增凋落物 (double litter, DL) 3 个处理, 利用 Li-8100 系统测定各处理的土壤呼吸速率。结果表明, 添加或去除凋落物显著影响土壤呼吸 ($P = 0.091-0.099$), 与对照 (CK) 的土壤呼吸速率 ($3.23 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) 相比, 添加凋落物 (DL) 使土壤呼吸速率增加 26%, 去除凋落物 (NL) 使土壤呼吸速率减少 22%。NL、CK 和 DL 的累积土壤呼吸分别为 631、787 和 973 $\text{g C m}^{-2} \text{a}^{-1}$ 。各处理土壤呼吸速率与土壤温度呈显著的指数关系 ($R^2 = 0.81-0.90$, $P < 0.0001$), 但与土壤水分的关系不明显。NL、CK 和 DL 的 Q_{10} 依次为 1.92、2.29 和 2.31。地表凋落物对土壤呼吸年平均贡献量为 20%。相关性分析表明, 各测定日地表凋落物贡献与土壤温度 ($r = 0.54$, $P < 0.05$) 或土壤水分关系显著 ($r = 0.68$, $P < 0.05$)。刺槐人工林地表凋落物的输入量为 $213 \text{ g C m}^{-2} \text{a}^{-1}$, 大于凋落物引起的呼吸量 $156 \text{ g C m}^{-2} \text{a}^{-1}$ 。在黄土区通过植被恢复治理水土流失过程中, 随着地表凋落物的积累, 林地生态系统的碳汇功能将逐步得到加强。

关键词: 刺槐人工林; 土壤呼吸; 凋落物; 黄土高原

Aboveground litter contribution to soil respiration in a black locust plantation in the Loess Plateau

ZHOU Xiaogang^{1,2}, GUO Shenli^{1,4,*}, CHE Shengguo³, ZHANG Fang⁴, ZOU Junliang⁴, ZHANG Yanjun⁴, NAN Yafang⁴, LI Ze⁴, PU Hui⁵

1 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resource, Yangling, 712100, China

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China

4 Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China

5 Kunming Longhui Engineering Design & Consultation Co., LTD Kunming 650000, China

Abstract: Aboveground litter is a key factor for carbon sequestration in territorial ecosystems as well as soil conservation in erosion-derived, degraded areas. On the Loess Plateau, understanding aboveground litter contribution to soil respiration (LC) enhances the investigation of soil C dynamics as a consequence of litter accumulation accompanying vegetation restoration. Aboveground litter manipulation was carried out in a 26-year-old black locust plantation (*Robinia*

基金项目: 国家自然科学基金资助(41071338)

收稿日期: 2011-09-09; 修订日期: 2012-02-22

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: slguo@ms.iswc.ac.cn

pseudoacacia) in the Wangdong catchment in the gully region of the Loess Plateau. Litter treatments consisted of no litter (NL, aboveground litter excluded from plots), control (CK, normal litter inputs allowed), and double litter (DL, aboveground litter doubled by adding litter removed from NL plots). There were three plots in each treatment, and the plot size was 1.5 m × 1.5 m. Three polyvinyl chloride (PVC) collars were installed along the diagonal in each plot. Soil respiration rates (R_s) were measured approximately once every two weeks in 2009 decreasing to once every four weeks in 2010 during the period of April to October in both years using a Li-8100 closed chamber system (Li-COR, Lincoln, NE, USA). In total, R_s was measured on 19 occasions during the two-year period. Concurrent with each respiration measurement, soil temperature at the 5-cm depth was measured using a Li-Cor thermocouple while soil moisture content at the 5-cm depth was also measured using a hand-held frequency-domain reflectometer (ML2x, Delta-T Devices Ltd, UK) at five locations close to the outer edge of each PVC collar. During the experimental period, the mean R_s in CK was 3.23 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. DL significantly increased R_s in CK by 26% ($P = 0.091$) while NL significantly decreased R_s in CK by 22% ($P = 0.099$). The maximum difference between the R_s of DL (or NL) and the R_s of CK occurred from July to September when air temperatures were high and rainfall was sufficient. Soil temperatures showed no treatment differences ($P = 0.48$) but the difference of soil moisture contents within treatments was significant ($P < 0.01$). The cumulative $\text{CO}_2\text{-C}$ emissions from NL, CK and DL were 631, 787 and 973 $\text{g C m}^{-2} \text{a}^{-1}$, respectively. The R_s of NL, CK and DL had significant exponential correlation ($R^2 = 0.81$ to 0.90 ; $P < 0.0001$) with soil temperature but had unclear relationships with soil moisture. The temperature sensitivity of soil respiration, Q_{10} , in NL, CK and DL was 1.92, 2.29 and 2.31, respectively. And annual mean contribution rate of aboveground litter to soil respiration was 20%. Correlation analysis showed that litter contribution on every measurement day had significant positive correlativity with soil temperature ($r = 0.54$, $P < 0.05$) or moisture ($r = 0.68$, $P < 0.05$). The aboveground litterfall was 213 $\text{g C m}^{-2} \text{a}^{-1}$, which was greater than the release of C from respiration caused by aboveground litter (156 $\text{g C m}^{-2} \text{a}^{-1}$). This result has strong implications for soil C storage, indicating that aboveground litter accumulation in this young black locust plantation may be expected to continue contributing to the carbon pool in the ecosystem undergoing vegetation restoration and soil conservation measures on the Loess Plateau, at least in the near future.

Key Words: black locust plantation; soil respiration; litter; the Loess Plateau

地表凋落物是影响水土流失^[1-6]、生态系统碳汇功能^[7-8]的重要因素。在黄土高原地区,地表凋落物在抵抗雨滴溅蚀^[1-2]、减少地表径流^[3]、增加土壤持水^[3]、改善土壤理化性状^[4-6]等方面已有大量研究,而地表凋落物-土壤呼吸二者之间的关系缺乏报道。

在林地生态系统中,除根系和微生物外,地表凋落物是土壤呼吸的重要来源^[7,9-10]。已有研究结果表明,不同地区、不同林分下,地表凋落物对土壤呼吸的贡献不同^[7,9-16]。混交阔叶林和热带森林为 37%^[7,10-11],亚热带森林集中在 30%—40%^[12,17]。然而,日本北部林地凋落物的贡献低于 10%^[13-14]。热带潮湿低地森林^[18]、地中海混交栎树林^[15]、喀斯喀特山脉针叶林^[9]和佛罗里达湿地人工松树林^[16]的结果则介于 19%—22%。上述研究主要集中在天然林^[9-11,15]地表凋落物对土壤呼吸贡献,而对人工林^[7,16]研究较少;其次,在热带^[11,18]、亚热带^[7,12,17]或寒温带^[13-14]研究报道较多。在半干旱地区,人工林中地表凋落物变化及其对土壤呼吸的影响研究尚不多见。

地表凋落物除直接影响土壤呼吸变化外^[7,9-10],还可通过影响土壤温度、水分及其它理化、生物性状^[19-21]间接影响土壤呼吸。因此,研究不同凋落物条件下土壤呼吸变化及其与土壤温度、水分的关系有助于深入理解地表凋落物对土壤呼吸的贡献及其影响。

1 材料与方 法

1.1 试验地概况

试验地位于黄土高原南部高原沟壑区陕西省长武县洪家镇王东沟小流域,为中国科学院长武黄土高原农

业生态试验站(长武站)所在地。塬面、塬坡和沟谷大约各占小流域的三分之一。试验地刺槐人工林位于流域的塬坡上(107°40'E, 35°13'N, 西向坡, 海拔 1095 m, 坡度 < 15°), 林地面积 0.68 hm², 刺槐树龄 26a(1985 年种植), 郁闭度为 80%, 树高(6.8±1.6) m, 株行距 1.5 m × 1.5 m, 胸径(6.4±2.6) cm。林下有小灌丛, 主要为茅莓(*Rubus parvifolius* L.), 其郁闭度 55%, 株高(62.8±11.8) cm, 密度 2—3 株/m²; 草本植物主要为白羊草(*Bothriochloa ischaemum* (L.) Keng), 其盖度 75%, 高(42.5±11.9) cm。其它伴生植物有: 甘青针茅(*Stipa przewalskyi* Roshev.)、赖草(*Aneurolepidium dasystachys* (Trin.) Nevski)、野牯草(*Arundinella hirta* (Thbg.) Tanke. var. *ciliata* Koidz.)、兴安胡枝子(*Lespedeza davurica* (Laxm.) Schindl.) 等。凋落物层为 1570 g/m², 地表凋落物的年平均输入量 474 g/m²。土壤为黄绵土, 0—20 cm 土层土壤容重、pH、阳离子交换量、有机碳和全氮分别为 1.20 g/cm³、8.3、20.4 cmol/kg、6.80 g/kg 和 0.66 g/kg^[22]。

长武站多年平均降水 584 mm, 7—9 月份降水占年总量的 55%, 年平均气温 9.4 °C。2009 和 2010 年年平均气温分别为 10.3 °C 和 12.2 °C, 稍高于多年平均值; 2009 年降水(481.2 mm) 低于多年平均值, 而 2010 年降水(582.7 mm) 与多年平均一致。

1.2 试验设计

2009 年 3 月, 选择刺槐人工林典型部位(地表凋落物层、树体长势、大小等相对均匀) 设置凋落物控制试验: 去除凋落物(NL)、对照(CK) 和倍增凋落物(DL) 3 个处理。设置前清除地上的灌丛和草本等植物。每个处理 3 个小区, 小区大小为 1.5 m × 1.5 m。每个小区中沿对角线依次安装 3 个 PVC 管, 以降低地表凋落物层不均匀造成的空间变异。管外径 20 cm、高 11.4 cm, 出露地面 2 cm。NL 第一次处理时, 移走小区内地表凋落物, 安装 PVC 管后, 在管上部设置 1.5 m × 1.5 m、网格 1 mm × 1 mm 的尼龙网, 阻止凋落物落入。CK 允许凋落物正常进入。DL 的第一次处理是在安装 PVC 管后, 将收集的 NL 凋落物均匀添加至 DL 的各小区范围内; 以后有凋落物时, 定期将 NL 尼龙网上的凋落物均匀散在 DL 各小区。2009 年初, 在林地未干扰的地块选取 5 个样方, 设置 1 m × 1 m 尼龙网, 定期收集网中的凋落物。所有凋落物样品在 65 °C 下烘烤 48 h。直到质量不发生改变时称重, 以此估算地表凋落物的年平均输入量。

1.3 土壤呼吸、温度和水分测定

在 2009 和 2010 年的 4 月—10 月, 利用 Li-8100 系统(Li-COR, Lincoln, NE, USA) 于测定日 8:00—12:00 测定不同凋落物处理下的土壤呼吸速率。2009 年为初始观测年, 大约每隔 2 周测定 1 次, 到了 2010 年, 每隔 4 周测定 1 次。2a 共测定 19 次。Li-8100 系统由主机、短期测量室等组成。第 1 次测定在 PVC 管安置的 24 h 后进行。为了保证各凋落物处理土壤微环境一致, 每次测定前一天, 在不扰动 PVC 管的前提下, 从根部剪除其中的小草, 并用手去除表层昆虫等活体生物。测定时, 将短期测量室置于事先设置好的 PVC 管上。短期测量室与 PVC 管接口处有一泡沫垫圈以保证系统的密闭性。当短期测量室与 PVC 管相连时, 尽量不要扰动管内表面土壤与管本身。主机内的红外气体分析仪通过检测短期测量室中 CO₂ 浓度和 H₂O 的变化, 推算测量室外土壤 CO₂ 扩散到空气中的速率。结果自动记录至储存卡。5 cm 土壤温度和 5 cm 土壤水分的测定与土壤呼吸测定同步进行, 测定时应尽量靠近 PVC 管外壁, 各取 5 次重复。5 cm 土壤温度使用 Li-8100 系统的温度探针测定, 而 5 cm 土壤水分则采用 FDR(ML 2x, Delta-T Devices Ltd, UK) 测定。

1.4 数据分析

(1) 数据统计分析

利用 SAS 软件包中的 PROC GLM(SAS 9.1, SAS Institute) 过程对测定日和观测期内土壤呼吸速率进行显著性分析, 以比较不同凋落物处理之间的差异。同样地, 不同凋落物处理条件下土壤温度和水分变化的显著性分析同样采用 SAS 软件包(PROC GLM) 进行。地表凋落物贡献与土壤温度和土壤水分之间的相关性使用 PROC CORR 过程进行分析。土壤温度和土壤水分是影响土壤呼吸的重要环境因素, 利用回归分析(PROC REG, SAS 9.1, SAS Institute) 评价了土壤温度和土壤水分对土壤呼吸的作用, 水分、水分温度交互作用参数的 *t* 值结果显示温度是影响土壤呼吸变异的主导因素。基于此, 利用指数方程(1) 来描述土壤呼吸速率 *R_s* 与土

壤温度 t 之间的关系。

$$R_s = \beta_0 e^{\beta_1 t} \quad (1)$$

其中, β_0 、 β_1 为模型系数。

土壤呼吸的温度敏感性指数 Q_{10} 依据公式 (2) 计算。

$$Q_{10} = e^{10\beta_1} \quad (2)$$

(2) 累积土壤呼吸的估算

各处理测定的 5 cm 土壤温度 T_0 与试验站的连续观测的 5 cm 土壤温度 T_i 有显著的线性相关性 ($T_i = aT_0 + b$, NL: $R^2 = 0.96$, $P < 0.0001$; CK: $R^2 = 0.93$, $P < 0.0001$; DL: $R^2 = 0.96$, $P < 0.0001$)。将非观测日试验站连续土壤温度 T_i 代入方程 (1) 可得非观测日的土壤呼吸速率 R_{si} ; 观测日土壤呼吸速率 R_{si} 为对应处理平均值。每日土壤呼吸 (CO_2 -C 排放量) 的计算公式为:

$$D_i = R_{si} \times 3600 \times 24 \times 12 \times 10^{-6} \quad (3)$$

式中, D_i 为每日土壤呼吸 (g C/m^2), R_{si} 为每日土壤呼吸速率 ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)。12 为 CO_2 -C 的摩尔质量 (g/mol) 3600、24 和 10^{-6} 均为换算系数。最后, 每日土壤呼吸累加得年累积土壤呼吸。

(3) 地表凋落物对土壤呼吸贡献的估算

假设对照与去除凋落物处理土壤微环境一致, 利用两种方法计算了地表凋落物对土壤呼吸的贡献。

方法 1 对照与去除凋落物处理日土壤呼吸速率观测值的差异及其与对照比值作为地表凋落物的贡献, 用于评价地表凋落物贡献的季节变异性:

$$LC_D = \frac{CK_D - NL_D}{CK_D} \times 100\% \quad (4)$$

式中, LC_D 代表各个测定日地表凋落物的贡献; CK_D 和 NL_D 分别为测定日当天测定的对照和去除凋落物处理的土壤呼吸速率平均值 ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)。

方法 2 利用对照与去除凋落物处理年累积土壤呼吸的差异与对照比值作为评价地表凋落物的贡献。计算公式如 (5) 所示:

$$LC_Y = \frac{CK_Y - NL_Y}{CK_Y} \times 100\% \quad (5)$$

式中, LC_Y 代表地表凋落物对土壤呼吸的年平均贡献, CK_Y 和 NL_Y 分别为对照和去除凋落物处理的年累积土壤呼吸 (g C m^{-2})。

2 结果与分析

2.1 凋落物对土壤温度、水分的影响

试验期间, 各处理土壤温度随时间逐渐升高, 在 7 月初或 8 月初达到最高值, 随后逐渐降低 (图 1)。各处理土壤温度最高值, 2009 年出现在 8 月 2 日, 2010 年出现在 7 月 6 日。试验期间各处理平均土壤温度高低趋势为 $DL > NL > CK$, 但差异不显著 ($P = 0.48$) (图 1)。与土壤温度变化相似, 试验期间各处理土壤水分随时间逐渐升高, 在 8 月份中旬达到最高, 随后逐渐降低 (图 2)。各处理土壤水分平均值差异显著 ($P < 0.01$), 2009 年 NL、CK 和 DL 处理依次为 17.98%、19.19% 和 20.61%; 2010 年依次为 22.99%、22.91% 和 24.01%。土壤水分最高值出现的时间滞后于土壤温度最高值的时间。

2.2 凋落物对土壤呼吸的影响

各处理土壤呼吸的变化趋势与土壤温度基本一致 (图 1, 图 3)。土壤呼吸随时间升高, 于 2009 年 8 月 2 日和 2010 年 7 月 6 日达到最高值, 随后逐渐降低。倍增或去除凋落物显著影响土壤呼吸变化 ($P = 0.090 - 0.099$)。2009 年, DL、CK 和 NL 各处理平均值高低依次为 (4.04 ± 1.73)、(3.18 ± 1.19) 和 (2.41 ± 0.69) $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, DL 比 CK 提高 27%, NL 比 CK 减少 24%; 2010 年, DL、CK 和 NL 各处理平均值高低依次为 (4.10 ± 2.13)、(3.27 ± 1.63) 和 (2.65 ± 1.15) $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, DL 比 CK 提高 25%, NL 比 CK 减少 19%。2a 观测期内,

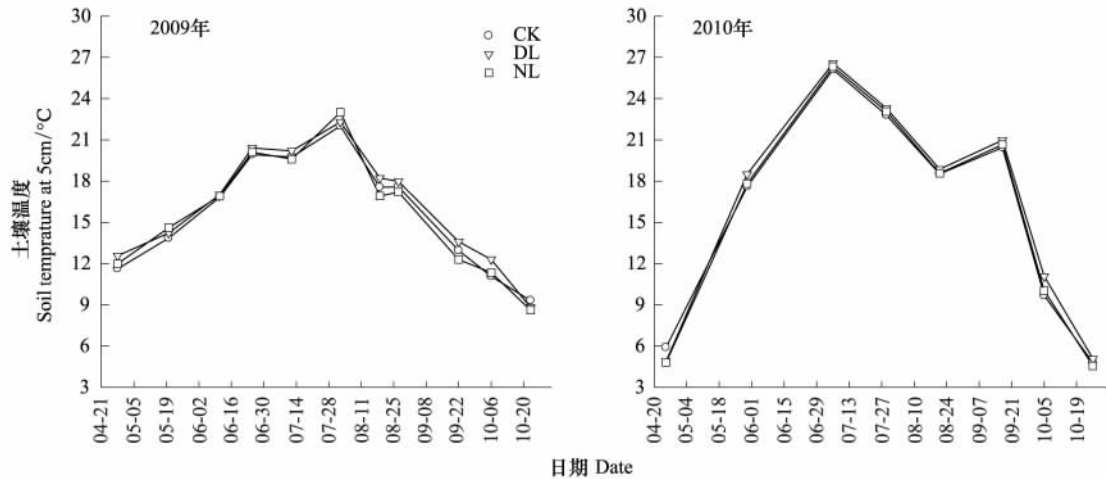


图1 2009—2010年不同凋落物处理下土壤温度动态变化

Fig. 1 Dynamics of soil temperature at different litter treatments in 2009—2010

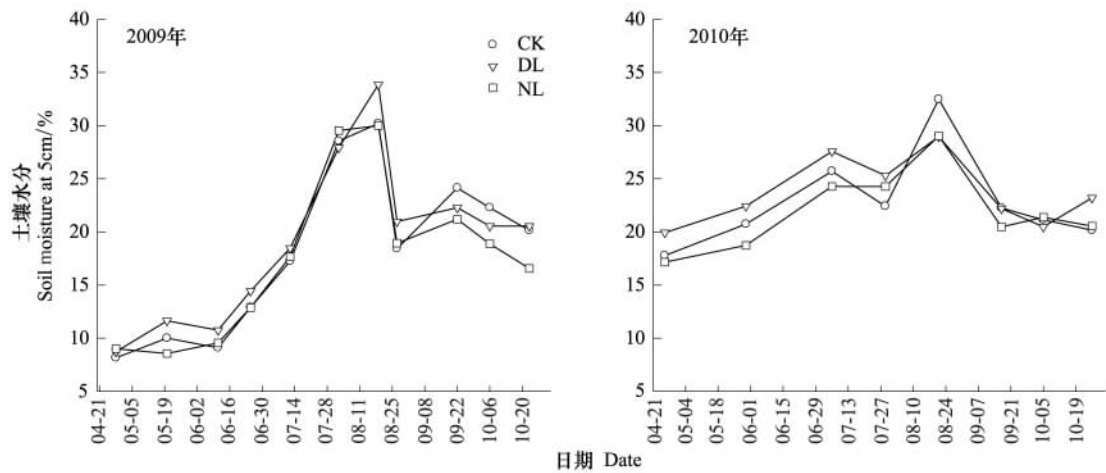


图2 2009—2010年不同凋落物处理土壤水分动态变化

Fig. 2 Dynamics of soil moisture at different litter treatments in 2009—2010

与对照 ($3.23 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) 相比, 倍增凋落物使土壤呼吸提高 26%, 去除凋落物使土壤呼吸减少 22%。在高温多雨、植物生长旺盛的 7—9 月份, 倍增或去除处理土壤呼吸与对照的差异最大(图 3)。

NL、CK 和 DL 土壤呼吸与土壤温度呈显著的指数关系 ($R^2 = 0.81-0.90$, $P < 0.0001$, 图 4), 但 NL、CK 和 DL 的 Q_{10} 依次为 1.92、2.29 和 2.31。这一结果表明, 凋落物不同处理方式影响土壤呼吸对温度的敏感性。与对照处理(CK)相比, 去除凋落物处理(NL) Q_{10} (1.92) 降低而倍增凋落物处理(DL) 略有升高。然而, NL、CK 和 DL 土壤呼吸与水分的关系不明显(图 4)。

2.3 凋落物对土壤呼吸的贡献

地表凋落物对土壤呼吸的贡献具有明显的季节性(图 5)。地表凋落物对土壤呼吸的贡献, 2009 年在低温少雨的春季(2009 年 4 月 28 日)达到最低值 ($6 \pm 10\%$), 随后逐渐上升, 在高温多雨的夏季(2009 年 8 月 2 日)达到最高值 ($35 \pm 2\%$), 然后逐渐降低; 2010 年与 2009 年变化类似, 在低温少雨的春季(2010 年 4 月 25 日)达到最低值 ($4 \pm 5\%$), 随后逐渐上升, 在高温多雨的夏季达(2010 年 7 月 6 日)到最高值 ($33 \pm 6\%$), 然后逐渐降。

从年累积土壤呼吸来看, 2009 年 DL、CK 和 NL 处理分别为 972 、 787 、 $630 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, DL 比 CK 提高了 24%, NL 比 CK 减少了 20%; 2010 年依次为 973 、 788 和 $632 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, DL 比 CK 提高了 23%, NL 比 CK 减少

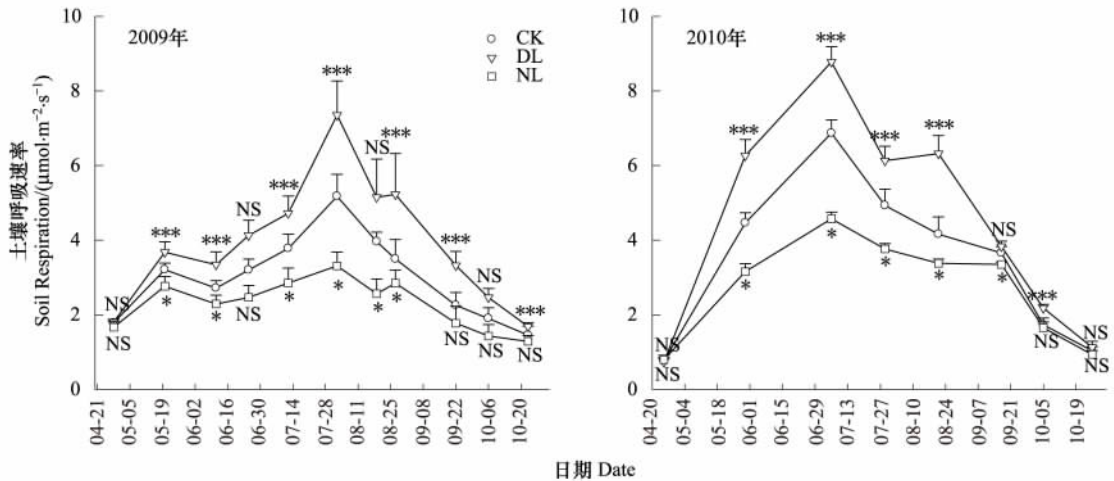


图3 2009—2010 年不同凋落物处理下土壤呼吸速率的动态变化

Fig. 3 Dynamics of soil respiration rates at different treatments in 2009—2010

*** 表示 DL 与 CK 差异达到显著水平 ($P < 0.05$); * 表示 NL 与 CK 差异达到显著水平 ($P < 0.05$); NS 则代表 DL 与 CK 或者 NL 与 CK 之间的差异未达到显著水平 ($P < 0.05$)

了 20%。2009 年 DL、CK 和 NL 处理的累积土壤呼吸与 2010 年一致。2a 平均 ,NL、CK 和 DL 累积土壤呼吸分别为 631、787 和 973 $g C m^{-2} a^{-1}$ 。地表凋落物对土壤呼吸的贡献为 20%。

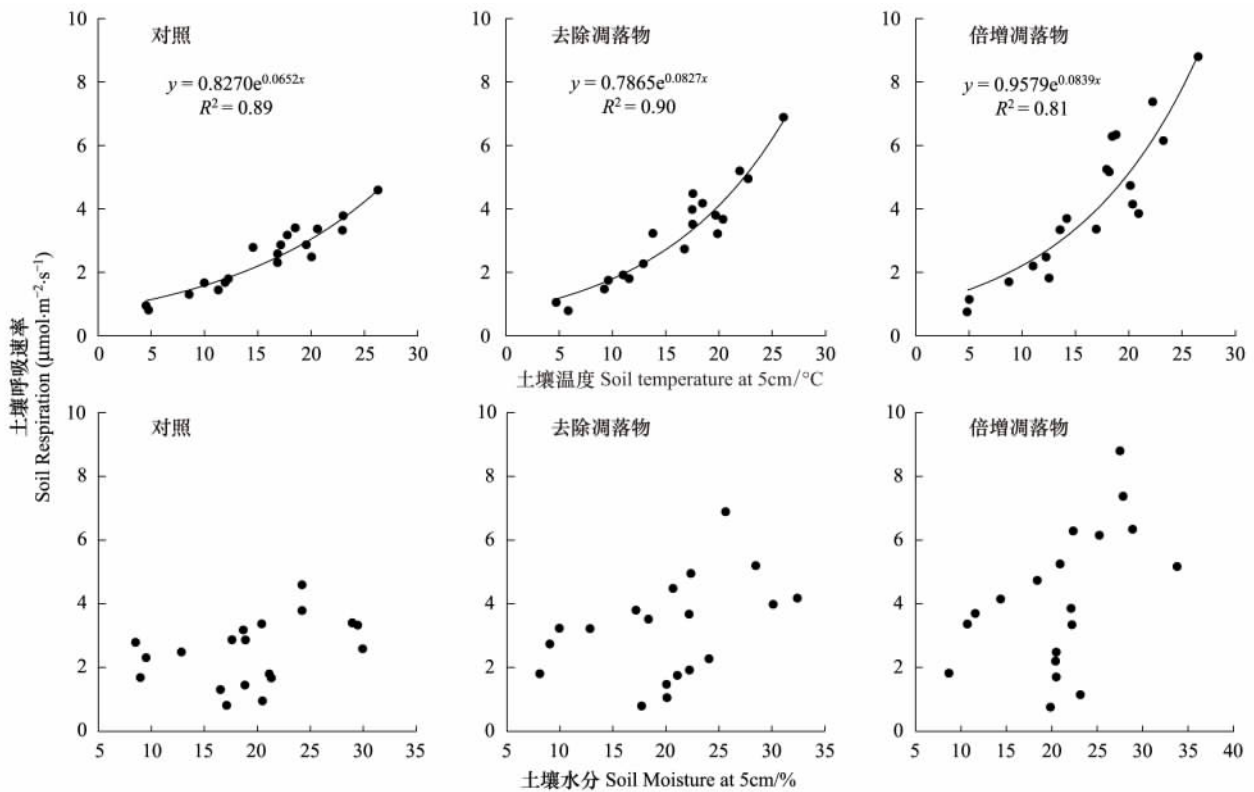


图4 土壤呼吸速率与 5 cm 土壤温度、5 cm 土壤水分的关系

Fig. 4 The relationships between soil respiration rates and soil temperature or soil moisture at 5 cm

3 讨论

3.1 半干旱地区凋落物对土壤呼吸贡献变异性与土壤水热变化的关系

研究表明,凋落物对土壤呼吸的贡献的季节变异性与水热的季节变化有关^[15,17]。在地中海混交栎树林

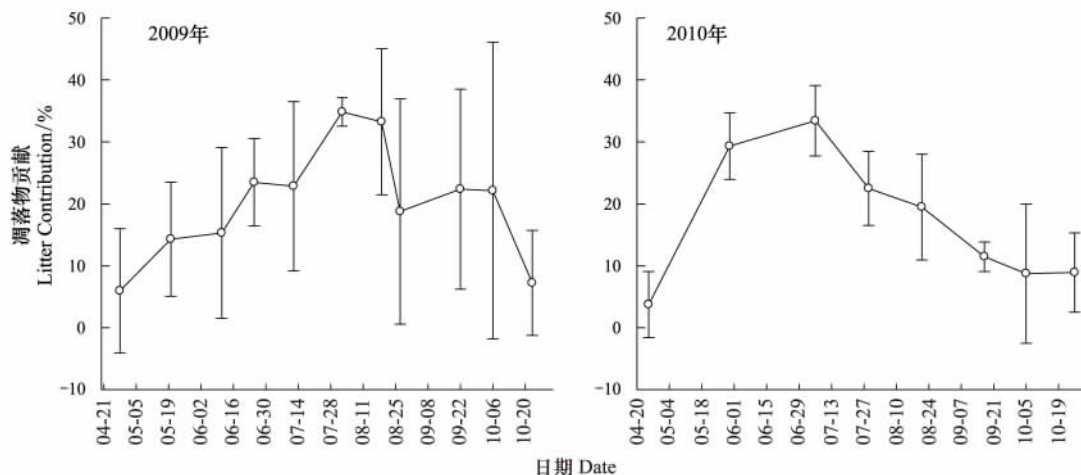


图5 2009—2010年各观测日地表凋落物对土壤呼吸的贡献

Fig. 5 Aboveground litter contribution to soil respiration during the experimental period in 2009—2010

中,受夏季干旱影响,凋落物对土壤呼吸的贡献仅为15%,低于降水充裕的秋季(29%)^[15]。在亚热带森林中,凋落物对土壤呼吸贡献的高峰期出现在雨季,占全年贡献量的60%以上,显著高于旱季^[17]。本研究也发现,凋落物贡献在低温少雨的春季最低(2009, (6±10)%; 2010, (4±5)%),而在高温多雨的夏季达到最高值(2009, (35±2)%; 2010, (33±6)%)。相关性分析则表明,本研究中,各测定日凋落物贡献与土壤温度($r=0.54$, $P<0.05$)或土壤水分($r=0.68$, $P<0.05$)的相关性达到显著;而在亚热带森林中^[17],凋落物贡献与土壤水分的相关系数较高,而与温度相关性不明显。这可能是因为在不同地区,凋落物分解的控制因素不同。在亚热带,水分是影响凋落物分解的限制性因素,因而凋落物贡献对水分较敏感;而在半干旱地区,水分缺乏,温度和水分共同影响凋落物分解。

相应地,凋落物贡献的空间变异性与水热空间分布差异有关。在成熟林中,从寒温带、温带至热带,森林凋落物的贡献逐渐升高,并且与年平均气温和降水呈正相关^[23]。在热带、亚热带地区^[11-12, 17]水热条件较好,凋落物分解速率高,因而凋落物对土壤呼吸的贡献高(30%—40%)。温带地区水热条件稍差,凋落物对土壤呼吸的贡献在20%左右^[9, 15]。寒温带地区^[13-14]土壤温度偏低,致使微生物分解速率下降,这可能是导致凋落物贡献低于10%的主要原因。本研究区地处温带大陆性季风气候区,研究结果与温带地区的报道一致。

3.2 凋落物变化对黄土区刺槐林地生态系统碳汇功能的影响

随着植被恢复和生态环境建设的实施,黄土高原地区林地生产力和地表凋落物量逐渐增加^[6, 24-26]。本研究中,地表凋落物的碳输入量 $213 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ (凋落物年平均输入量为 $474 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,以含碳量0.45计算),大于凋落物引起的呼吸量 $156 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ (CK与NL的年平均累计土壤呼吸之差)。这一结果表明,本研究刺槐人工林中地表碳因凋落物输入仍处于持续增加的过程。其次,与NL相比,DL土壤呼吸的增加量是CK增加量的两倍,即随着凋落物量增加一倍,凋落物引起的呼吸量也相应增加1倍,提高凋落物积累量并不显著导致额外土壤呼吸的提高,即正激发效应不显著。因此,在其它条件不变前提下,随着凋落物积累,黄土区刺槐人工林中地表碳持续增加。因此,在植被恢复过程中,随着地表凋落物的积累,黄土区不仅水土流失得到有效降低^[1-2],而且林地生态系统的碳汇功能将逐步得到加强。

References:

- [1] Zhao H Y, Wu Q X, Liu G B. Studies on soil and water conservation functions of litter in Chinese pine stand on Loess Plateau. *Scientia Silvae Sinicae*, 2003, 39(1): 168-172.
- [2] Han B, Wu Q X, Liu X D, Jiang Y K, Zhao H Y. Study on prevention of slash erosion by litter in Chinese pine woodland. *Research of Soil and Water Conservation*, 1994, 1(3): 14-18.
- [3] Wu Q X, Zhao H Y, Han B. Effectiveness of forest litter to soil and water conservation. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 2001, 29(5): 95-98.

- [4] Xu Q H , Li R X , Feng L X , Feng H . The improvement of the *Pinus Tabulaeformis* and *Robinia pseudoacacia* plantation to the soil fertility on the Loess Plateau. *Shannxi Forest Science and Technology* , 1995 , (2) : 21-25.
- [5] Wang Z , Liu G B , Xu M X . Effect of revegetation on soil organic carbon concentration in deep soil layers in the hilly Loess Plateau of China. *Acta Ecologica Sinica* , 2010 , 30(14) : 3947-3952.
- [6] Liu Y C , Wang Q F , Yu G R , Zhu X J , Zhan X Y , Guo Q , Yang H , Li S G , Hu Z M . Ecosystems carbon storage and carbon sequestration potential of two main tree species for the Grain for Green Project on China ' s hilly Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica* , 2011 , 31(15) : 4277-4286.
- [7] Wang Y D , Wang H M , Ma Z Q , Wen X F , Li Q K , Liu Y F , Sun X M , Yun G R . Contribution of aboveground litter decomposition to soil respiration in a subtropical coniferous plantation in Southern China. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences* , 2009 , 45(2) : 137-147.
- [8] Li X J , Zhou T , He Xuezhao . Carbon sink of forest ecosystem driven by NPP increasing in China. *Journal of Natural Resources* , 2009 , 3(24) : 491-497.
- [9] Sulzman E W , Brant J B , Bowden R D , Lajtha K . Contribution of aboveground litter , belowground litter , and rhizosphere respiration to total soil CO₂ efflux in an old growth coniferous forest. *Biogeochemistry* , 2005 , 73(1) : 231-256.
- [10] Bowden R D , Nadelhoffer K J , Boone R D , Melillo J M , Garrison J B . Contributions of aboveground litter , belowground litter , and root respiration to total soil respiration in a temperate mixed hardwood forest. *Canadian Journal of Forest Research* , 1993 , 23(7) : 1402-1407.
- [11] Zimmermann M , Meir P , Bird M , Malhi Y , Cahuana A . Litter contribution to diurnal and annual soil respiration in a tropical montane cloud forest. *Soil Biology & Biochemistry* , 2009 , 41(6) : 1338-1340.
- [12] Yan J , Wang Y , Zhou G , Zhang D . Estimates of soil respiration and net primary production of three forests at different succession stages in South China. *Global Change Biology* , 2006 , 12(5) : 810-821.
- [13] Kim H , Hirano T , Koike T , Urano S . Contribution of litter CO₂ production to total soil respiration in two different deciduous forests. *Phyton-Annales Rei Botanicae* , 2005 , 45(4) : 385-388.
- [14] Liang N , Hirano T , Zheng Z M , Tang J , Fujinuma Y . Soil CO₂ efflux of a larch forest in northern Japan. *Biogeosciences* , 2010 , 7 , 3447-3457.
- [15] Rey A , Pegoraro E , Tedeschi V , De Parri I , Jarvis P G , Valentini R . Annual variation in soil respiration and its components in a coppice oak forest in Central Italy. *Global Change Biology* , 2002 , 8(9) : 851-866.
- [16] Ewel K C , Cropper Jr W P , Gholz H L . Soil CO₂ evolution in Florida slash pine plantations. II . Importance of root respiration. *Canadian Journal of Forest Research* , 1987 , 17(4) : 330-333.
- [17] Deng Q , Liu S Z , Liu J X , Meng Z , Zhang D Q . Contributions of litterfall to soil respiration and its affecting factors in southern subtropical forests of China. *Advances in Earth Science* , 2007 , 22(09) : 976-986.
- [18] Sayer E J , Powers J S , Tanner E V J . Increased litterfall in tropical forests boosts the transfer of soil CO₂ to the atmosphere. *PLoS ONE* , 2007 , 2: e1299.
- [19] Singh J S , Gupta S R . Plant decomposition and soil respiration in terrestrial ecosystems. *The Botanical Review* , 1977 , 43(4) : 449-528.
- [20] Krakomperger Z , Toth J A , Varga C , Tothmeresz B . The effect of litter input on soil enzyme activity in an oak forest. *Cereal Research Communications* , 2008 , 36: 323-326.
- [21] Xiong Y M , Xia H P , Li Z A , Fu S L . Impacts of litter and understory removal on soil properties in a subtropical *Acacia mangium* plantation in China. *Plant and Soil* , 2008 , 304(1/2) : 179-188.
- [22] Qiu L P , Zhang X C , Cheng J M , Yin X Q . Effects of black locust (*Robinia pseudoacacia*) on soil properties in the loessial gully region of the Loess Plateau , China. *Plant and Soil* , 2010 , 332 (1) : 207-217.
- [23] Chen G S , Yang Y S , Guo J F , Xie J S , Yang Z J . Relationships between carbon allocation and partitioning of soil respiration across world mature forests. *Plant Ecology* , 2011 , 212(2) : 195-206.
- [24] Li Z , Guo S L , Zhang F , Zou J L . Effects of apple orchard converted from cropland on C and N storages in terrestrial system of sloping cultivated land in the Loess Gully Regions. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* , 2011 , 17(4) : 919-924.
- [25] Guo S L , Ma Y H , Che S G , Sun W Y . Effects of artificial and natural vegetations on litter production and soil organic carbon change in Loess Hilly Areas. *Scientia Silvae Sinicae* . 2009 , 45(10) : 14-18.
- [26] Zhang X B , ShangGuan Z P . Nutrient distributions and biocycle patterns in both natural and artificail *Pinus tabulaeformis* forests in Hilly Loess Regions. *Acta Ecologica Sinica* , 2006 , 26(2) : 373-382.

参考文献:

- [1] 赵鸿雁, 吴钦孝, 刘国彬. 黄土高原人工油松林枯枝落叶层的水土保持功能研究. *林业科学* , 2003 , 39(1) : 168-172.
- [2] 韩冰, 吴钦孝, 刘向东, 江有科, 赵鸿雁. 油松林枯落物层防止溅蚀的研究. *水土保持研究* , 1994 , 1(3) : 14-18.
- [3] 吴钦孝, 赵鸿雁, 韩冰. 黄土高原森林枯枝落叶层保持水土的有效性. *西北农林科技大学学报(自然科学版)* , 2001 , 29(5) : 95-98.
- [4] 薛泉宏, 李瑞雪, 冯立孝, 冯浩. 黄土高原油松刺槐人工林对土壤肥力影响的研究. *陕西林业科技* , 1995 , (2) : 21-25.
- [5] 王征, 刘国彬, 许明祥. 黄土丘陵区植被恢复对深层土壤有机碳的影响. *生态学报* 2010 , 30(14) : 3947-3952.
- [6] 刘迎春, 王秋凤, 于贵瑞, 朱先进, 展小云, 郭群, 杨浩, 李胜功, 胡中民. 黄土丘陵区两种主要退耕还林树种生态系统碳储量和固碳潜力. *生态学报* , 2011 , 31(15) : 4277-4286.
- [8] 李秀娟, 周涛, 何学兆. NPP 增长驱动下的中国森林生态系统碳汇. *自然资源学报* , 2009 , 3(24) : 491-497.
- [17] 邓琦, 刘世忠, 刘菊秀, 孟泽, 张德强. 亚热带森林凋落物对土壤呼吸的贡献及其影响因素. *地球科学进展* , 2007 , 22(09) : 976-986.
- [24] 李泽, 郭胜利, 张芳, 邹俊亮. 退耕还果对黄土高原沟壑区坡地土壤和植被碳、氮储量的影响. *植物营养与肥料学报* , 2011 , 17(4) : 919-924.
- [25] 郭胜利, 马玉红, 车升国, 孙文义. 黄土区人工与天然植被对凋落物量和土壤有机碳变化的影响. *林业科学* , 2009 , 45(10) : 14-18.
- [26] 张希彪, 上官周平. 黄土丘陵区油松人工林与天然林养分分布和生物循环比较. *生态学报* , 2006 , 26(2) : 373-382.