

川中丘陵区3种林-药复合种植模式土壤呼吸特征*

王锐^{1,4} 向成华^{1,2**} 王谢³ 胡庭兴¹ 陈刚¹ 陈洪¹

¹四川农业大学 成都 611134

²四川省林业科学研究院监测中心 成都 610084

³四川省农业科学院土壤肥料研究所 成都 610066

⁴四川省林业勘察设计研究院 成都 610084

摘要 在全球变暖的背景下, 陆地生态系统碳循环在大气CO₂浓度变化过程中扮演重要角色, 而目前大面积推广的林药或农林复合模式在平衡经济发展和维持环境生态的关系中起着举足轻重的作用. 2014年1-12月, 采用LI-8100对川中丘陵区核桃人工纯林(CK)、核桃-川明参复合模式(HC)、核桃-桔梗复合模式(HJ)、核桃-藜香复合模式(HH)4种林分的土壤呼吸进行定点观测, 同时测量土壤温度和湿度. 结果发现: 各处理土壤呼吸月动态变化呈先增后减趋势, HC最大值出现在6月下旬, 而CK、HJ和HH土壤呼吸峰值出现在7月中旬. 4种林分最低值都出现在1月, HC、HJ、HH分别是CK的1.36倍、1.61倍和0.89倍. 土壤呼吸与土壤温度呈极显著指数增长关系, 土壤湿度与土壤呼吸呈倒数关系, 但仅HH处理显著. 川中丘陵区4种林药模式中, HH模式更有利于减小土壤碳排放. 估算各林-药复合模式下土壤呼吸年内总碳排放量大小依次为CK、HJ、HC、HH. 本研究表明土壤温度是川中丘陵区土壤呼吸变化的主要因素, 不同的人工经营模式对研究区的土壤碳源/汇角色扮演有重要影响. (图5 表2 参36)

关键词 林药复合模式; 川中丘陵区; 核桃; 土壤呼吸; 土壤温度; 土壤湿度

CLC S714.5

Soil respiration characteristics of 3 types of agroforestry system in the Sichuan hilly basin*

WANG Rui^{1,4}, XIANG Chenghua^{1,2**}, WANG Xie³, Hu Tingxing¹, CHEN Gang¹ & CHEN Hong¹

¹Sichuan Agricultural University, Chengdu 611134, China

²Sichuan Forestry Science Research Institute, Chengdu 610084, China

³Institute of soil and fertilizer, Sichuan Academy of Agricultural Sciences, Chengdu 610066, China

⁴Sichuan Forestry Survey and Design Research Institute, Chengdu 610084 China

Abstract In the background of global warming, terrestrial ecosystem carbon cycling plays an important role in the change of atmospheric CO₂ concentration. The current large areas of forest and forestry or agroforestry is pivotal to the balance between economic development and ecological maintenance. From January to December 2014, we measured using an automated soil CO₂ flux system (LI-8100, LI-COR, USA) the soil respiration of four models (walnut artificial pure forest (CK), walnut – Radix Chuan Mingshinis composite model (HC), walnut – Platycodon compound model (HJ), and walnut – *Agastache rugosa* composite model (HH)). The soil temperature and humidity were measured at the same time. The measurements showed a first increasing and then decreasing monthly variation trend in soil respiration. The soil respiration was the maximum in late June for HC, but in mid-July for CK, HJ and HH. The lowest soil respiration of HJ, HH, HC were 1.36, 1.61 and 0.89 times respectively higher than that of CK, with the lowest value in January. There was a significant exponential relationship between soil respiration and soil temperature, and a reciprocal relationship between soil moisture and soil respiration, but the relationship was significant only in HH, indicating that HH models should be more conducive than others to reduce soil carbon emissions. The research showed that soil temperature may be the main factor of soil respiration in the hilly region of Sichuan Basin, and the operating model may be an important influencing factor for the role of carbon source/sink in the study area.

Keywords agroforestry system; Sichuan hilly basin; soil respiration; soil temperature; soil moisture

收稿日期 Received: 2015-12-22 接受日期 Accepted: 2016-02-02

*国家“十二五”重大科技支撑计划课题(2011BAD38B0204-2)资助 Supported by the National Key Science and Technology Project of the Twelfth Five-year Plan of China (2011BAD38B0204-2)

**通讯作者 Corresponding author (E-mail: 1098855957@qq.com)

土壤呼吸是生态系统物质循环和能量流动的重要环节,它由3个生物学过程(土壤微生物呼吸、植物根系呼吸、土壤动物呼吸)和一个非生物学过程(含碳矿物质的化学氧化)共同组成^[1]。土壤呼吸占整个生态系统呼吸的30%-80%不等,受土壤温度和湿度的影响,各类生态系统土壤呼吸表现出显著的差异性^[2-3]。随着土地资源日益短缺,研究不同土地利用形式对土壤呼吸的影响尤为重要^[4-6]。目前,有关土壤呼吸的研究涉及各种各样的生态系统,但多集中在森林生态系统、草地生态系统、农田生态系统和湿地生态系统^[7-8]。而对于常见的复合生态系统,尤其是林农复合生态系统^[9]、林草复合生态系统^[10]等人工复合生态系统的研究则相对较少,且目前未见有关林药复合模式土壤呼吸研究的报道。林药复合模式是一种传统的土地利用形式,属地域性陆地生态系统的一部分,常见于丘陵地区以缓解区域性经济发展和环境生态保护矛盾,并实现土地可持续利用^[11]。研究不同林药复合模式土壤呼吸丰富了土壤呼吸研究的载体,且土壤呼吸的变化规律对于了解不同模式土壤呼吸在全球碳循环的贡献具有重要意义。

核桃(*Juglans regia*)是四川地区重要的经济树种,具有较高的经济效益和生态效益,四川省近二十余年来,在农业产业结构调整 and 退耕还林等林业生态工程建设中快速发展,迄今核桃总面积已达70余万 hm^2 。由于四川人多地少,耕地资源缺乏,人们普遍利用核桃人工林开展林农复合种植。川明参、桔梗和藁香也是四川地区大面积种植的药材,不少地区由此形成了核桃+中药材复合种植模式。因此,本研究以四川中部丘陵区核桃与川明参、桔梗和藁香3种药材间作模式为对象,从土壤碳循环的角度出发,分析土壤呼吸的动态特征,探讨林药复合模式对土壤碳通量的影响,并通过量化土壤呼吸与温度和湿度及其动态变化规律,为提升林农复合生态系统服务功能提供科学的参考依据。

1 材料与方法

1.1 实验地概况

研究区位于四川省阆中市江南镇,该区域位于嘉陵江流域中游,属典型盆地丘陵区。全境东西北部高,中南部低,呈堰尾槽地势和多层次梯级地形,海拔328-889 m,市区海拔565 m左右^[12]。地理位置为东经105°96'65",北纬31°57'82",属亚热带季风气候类型。多年平均地面温度18.7℃,月平均最高温度30.9℃,月平均最低温度6.7℃。区域内土壤为紫色土,土层厚度约30 cm,土壤养分背景值见表1,土壤瘠薄。试验样地位于阆中市江南镇金银观村王家山,核桃林地南北宽约30 m,东西长90 m,坡向南,坡度约2.5°,呈不规则四边形。核桃栽植于2010年,现已进入初产期,核桃株行距为3 m×4 m,地径约8 cm,高3.5 m左右;核桃林下行间分别种植川明参(*Chuanminshen violaceum*)、桔梗(*Platycodon grandiflorus*)和藁香(*Agastache rugosa*)3种药材(于2013年9月小苗移栽),药材种植带宽2 m,与核桃行向平行。

1.2 样地设置

在核桃林下行间(即药材种植带)设置4块样地,分别为3个林-药复合种植带(即3个处理)和一个对照,分别为核

表1 样地土壤养分背景值

Table1 The background value of soil samples

处理 Treatment	土层 Soil layer (δ/cm)	总氮 Total Nitrogen (w/g kg^{-1})	有效磷 Available phosphorus (w/g kg^{-1})	速效钾 Available potassium (w/mg kg^{-1})	全碳 Total carbon (w/g kg^{-1})	pH值 pH value
CK	0-15	2.4	0.96	86.57	5.95	6.93
	15-30	2.21	0.95	84.91	5.46	6.71
HC	0-15	2.36	0.96	85.00	6.30	6.88
	15-30	2.21	0.95	84.61	5.31	6.63
HJ	0-15	2.33	0.96	85.88	6.15	6.96
	15-30	2.27	0.96	82.38	5.62	6.62
HH	0-15	2.32	0.95	84.31	5.74	6.59
	15-30	2.21	0.96	81.67	4.87	6.51

桃+川明参(HC)、核桃+桔梗(HJ)和核桃+藁香(HH)以及核桃纯林(CK)。样地面积为4 m×25 m,相邻样地南北平行,间距10 m。每个样地内设置3个样方,共计12个样方,样方大小为4 m×5 m,每两个样方相距5 m。每个样方内等距离安放3个测定土壤呼吸的环(呼吸环为外径20 cm的PVC管),高度均为8 cm左右,呼吸环埋入土壤后上部均高出地面2 cm,用于连接土壤呼吸仪。4块样地共36个呼吸环,样方内相邻呼吸环间距约2 m。

1.3 土壤呼吸和土壤温湿度测定方法

土壤呼吸月动态采用Li-8100(Li-Cor inc.USA)测定。从2014年1月至12月每月测定一次,不同季节土壤呼吸日动态分别在四季中测定,主要步骤是:分别在3月、6月、9月和12月各选一天,在各处理选择3个土壤呼吸速率接近的观测点(呼吸环),共12个点^[13]。从当天13:00到次日11:00,每间隔2 h测定一次^[13],共测定12次。土壤温度和湿度采用Li-8100自带温度和湿度测定模块测定。

1.4 数据统计与分析

采用SPSS16.0软件中的一般线性模型对每月土壤呼吸数据进行重复测量方差分析(Repeated measures ANOVA)。用Sigmaplot 12.5作图,并对土壤呼吸数据与土壤温度和湿度进行相关性分析(Correlation Analysis)。文中统计显著水平为 $\alpha = 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 林-药复合模式不同季节土壤呼吸24 h日动态

各处理土壤呼吸在一天的不同时间段强度不同,总体呈单峰曲线,峰值出现在午后14:00-16:00左右;最低值则出现在凌晨4:00-6:00。重复测量方差分析表明,不同季节各处理土壤呼吸的时间效应、处理效应以及时间和处理交互效应都极显著;不同季节土壤呼吸的范围不同,春季为0.66-1.05 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$,夏季为2.35-4.29 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$,秋季在1.23-2.56 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 内,冬季0.5-0.9 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。

在3月时,几种药材生长都较缓慢,CK土壤昼夜呼吸平均值最大,平均为0.89 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$,而HH平均呼吸速率最小,平均为0.77 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (图1A)。6月时,HJ昼夜土壤呼吸速率最小,平均值为2.95 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$,川明参处生长成熟期,呼吸速率最大,平均值为3.67 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (图1B)。9月下旬,川明参处于幼苗阶段,呼吸速率最小,而HH处理最大,昼夜平均值分别是1.93 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 和2.38 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (图1C)。12月上

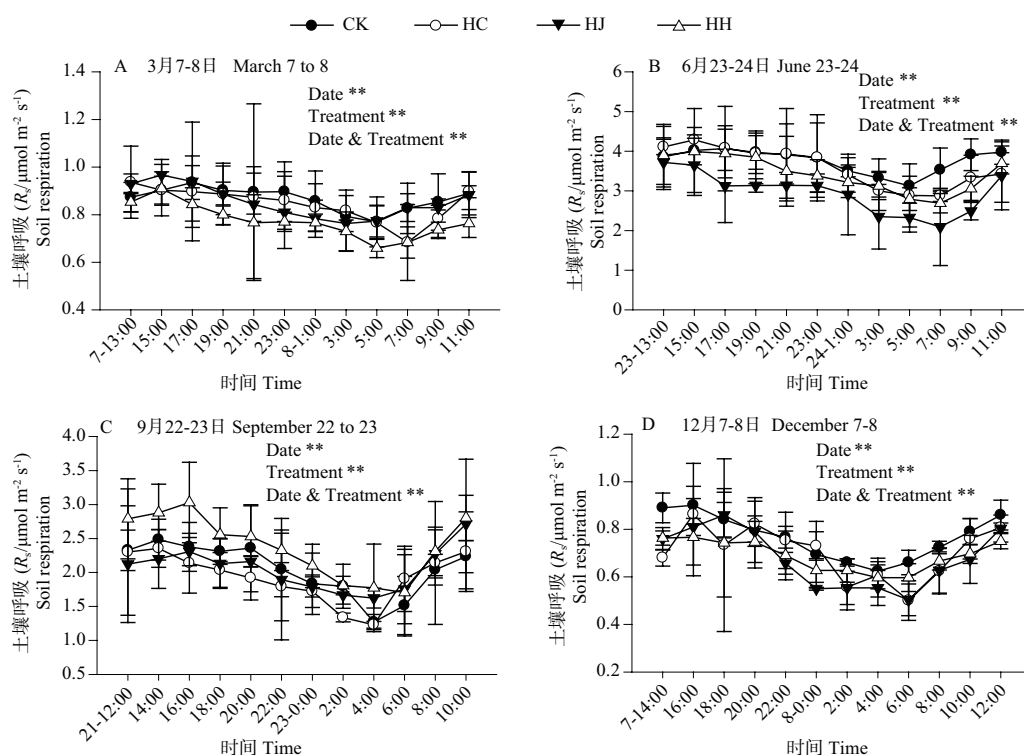


图1 土壤呼吸不同季节24 h动态 (平均值±标准差, $N = 3$). **表示对照与复合处理之间重复测量方差分析 (LSD多重比较法, $\alpha = 0.05$) 结果差异极显著 (Date表示时间效应; Date & Treatment表示时间和各处理交互效应; $P < 0.001$).

Fig. 1 Daily (24 h) variation of soil respiration (mean $\pm$ SD, $N = 3$). ** Indicates significant difference between the content and composite model by repeated measures analysis of variance (ANOVA and LSD multiple comparison, $\alpha = 0.05$). Date represents the time effect; Date & Treatment represents the interaction of time and each treatment; $P < 0.001$.

旬, 各处理呼吸速率变化范围较小, 且昼夜呼吸速率变化复杂 (图1D).

2.2 林-药复合模式土壤呼吸月动态

2014年各处理土壤呼吸月动态变化呈先增后减趋势 (图2), HC最大值出现在6月下旬, 为 $3.49 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 略低于CK; 其余3个处理土壤呼吸峰值出现在7月, CK最大值为 $3.83 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, HJ和HH都高于CK. 各处理最低值都出现在1月, CK $0.36 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, HC、HJ、HH分别是CK的1.36倍、1.61倍和0.89倍. 总体来讲, HC和HH两种处理土壤呼吸在一年中变化幅度较大. 经重复测量方差分析发现, 处理间效应、时间效应、时间和处理间交互效应都极显著 ($P < 0.01$).

对每月各处理呼吸进行单因素方差分析发现, 2月时, HH显著低于CK, 4月HJ和HH都显著低于CK, 而到5、6月时, 藿香进入花期, 土壤呼吸大幅升高, 显著高于CK. 7月川明参地上茎枯萎, 地下根茎进入休眠期, 土壤呼吸下降幅度较大, 极显著低于对照和另外两处理. 受温度变化影响, 从8月开始, 处理间土壤呼吸的差异逐渐缩小, 到11月时, CK与复合处理间土壤呼吸差异已不显著.

2.3 土壤呼吸与土壤温湿度的关系

相关分析 (表2) 发现, 研究区土壤呼吸与土壤温度呈极显著相关 ($P < 0.01$), 土壤温度最高可以解释90.7%的土壤呼吸; 而土壤呼吸与土壤湿度呈倒数关系, 但不显著 ($P > 0.05$).

2.3.1 土壤呼吸速率与土壤温度关系 采用经典指数模型 R_s

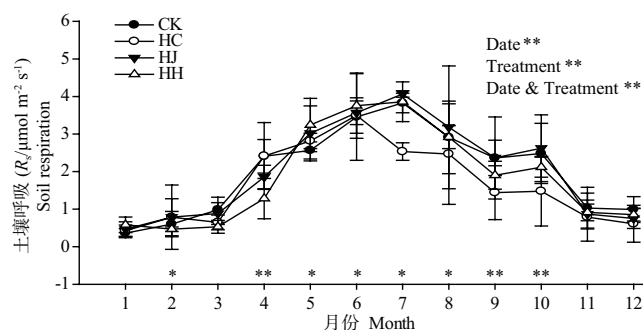


图2 土壤呼吸月变化 (2014年1-12月) (平均值±标准差, $N = 9$). **表示对照与处理之间重复测量方差分析 (LSD多重比较法, $\alpha = 0.05$) 结果差异极显著 ($P < 0.01$). *和**分别表示在某月存在一个或两个处理与对照间差异显著 ($P < 0.05$).

Fig. 2 Monthly changes of soil respiration (from January to December in 2014) (mean $\pm$ standard deviation, $N = 9$). ** Indicates significant difference by repeated measurements analysis of variance between the control and treatment (LSD multiple comparison, $\alpha = 0.05$) results. * And ** denote in a month, there are one or two differences between treatment and control significant.

表2 土壤呼吸与土壤温度和土壤相对湿度的相关分析

Table 2 Correlation of soil respiration with soil temperature and soil humidity

变量 Variable	呼吸 Respiration (R_s)	温度 Temperature (T)	湿度 Humidity (M)
呼吸 Soil respiration	1.00	0.91**	-0.10
温度 Temperature	0.91**	1.00	0.071
湿度 Moisture	-0.10	0.07	1.00

**表示相关水平为0.01 (两尾检验).

**Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

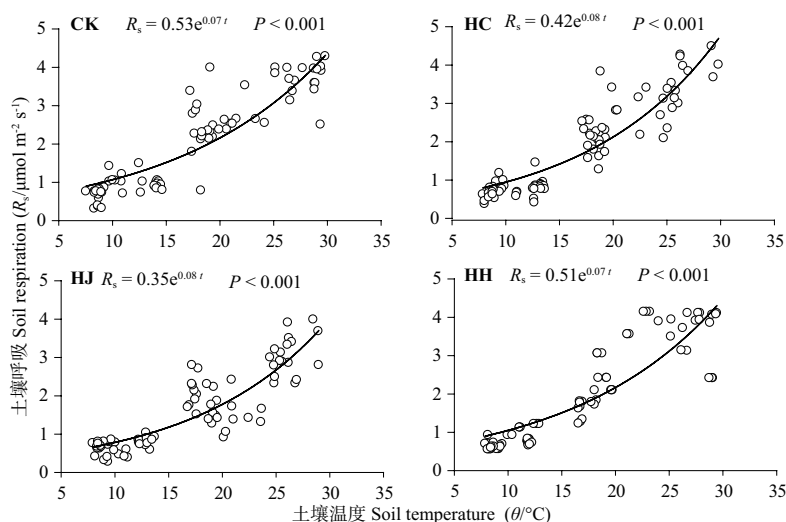


图3 土壤呼吸速率与土壤温度的关系 (2014年1-12月) ($N = 84$)。

Fig. 3 Relationship between soil respiration and soil temperature (January to December 2014) ($N = 84$).

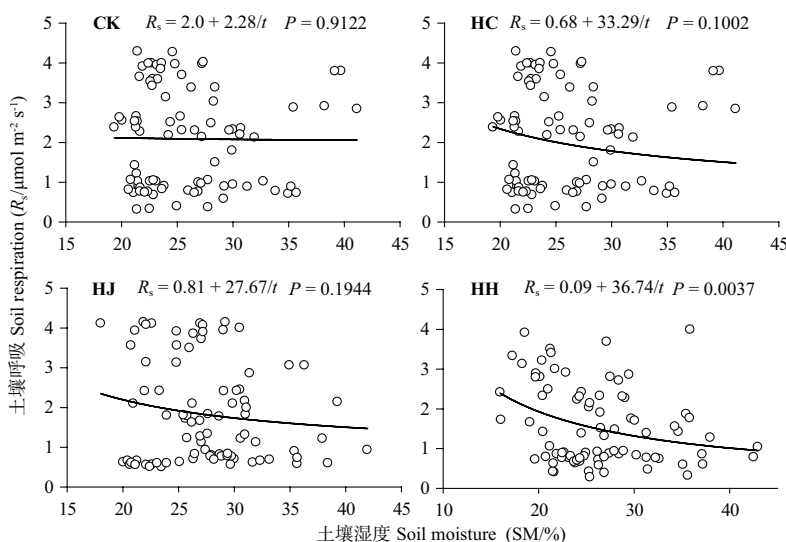


图4 土壤呼吸速率与土壤湿度的关系 (2014年1-12月) ($N = 84$)。

Fig. 4 Relationship between soil respiration and soil humidity (January 2014 to December) ($N = 84$).

$= a \cdot e^{bt}$ (R_s 为土壤呼吸速率; a 为 0°C 时的土壤呼吸速率; b 为温度反应常数, t 为土壤或空气温度)^[18]对土壤温度与土壤呼吸的关系进行拟合发现: 研究区各复合处理和对照土壤呼吸与土壤温度都呈极显著指数增长关系 ($P < 0.01$) (图3)。

2.3.2 土壤呼吸速率与土壤湿度关系 利用一般线性模型拟合各处理土壤呼吸与土壤湿度之间的关系 (图4) 发现, 只有HH处理下两者呈极显著 ($P < 0.01$) 的倒数关系, 而CK、HC和HJ处理下两者的关系均不显著 ($P > 0.05$)。

2.4 土壤呼吸逐月累积碳排放量估算

通过测定和计算研究区每月的平均温度, 代入温度-呼吸指数模型 ($R_s = a \cdot e^{bt}$), 估算川中丘陵区林-药复合模式年内处理间平均碳排放为 6.71 t/hm^2 , 逐月累积排放量总体上呈“S”型 (图5)。其中1-4月上升幅度较小, 4-9月有大幅上升, 9月前各处理累积碳排放量按 (CK、HC、HJ、HH) 顺序分别是 6.36 、 5.86 、 6.09 、 5.12 t/hm^2 ; 9月后增加趋势趋于平缓。比

较发现, 对照土壤碳排放总量较复合处理高, 2014年川中丘陵区林-药复合模式各处理土壤呼吸总碳排放大小依次为CK、HJ、HC、HH, 对应碳排放总量分别是 7.30 、 7.01 、 6.65 、 5.86 t/hm^2 。

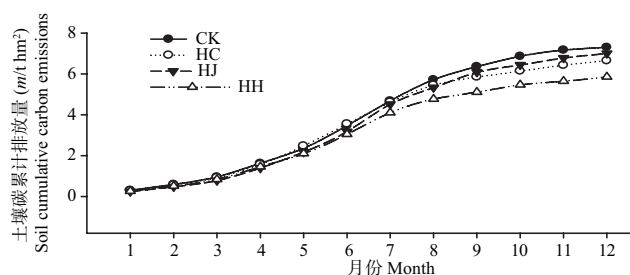


图5 林-药复合模式土壤碳排放逐月累积量 (2014年)。

Fig. 5 Cumulative monthly soil carbon emissions of the forest-medicine composite model (2014).

3 讨论

3.1 土壤呼吸24 h日动态

本研究发现川中丘陵区3种林药复合模式与核桃纯林土壤呼吸昼夜变化趋势相同, 全年土壤呼吸最大值为 $4.85 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 最小测量值为 $0.5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 分别在6月23日和12月8日, 各季土壤呼吸峰值均出现在午后14:00-16:00, 最小速率出现在凌晨4:00-6:00, 同当天土壤温度呈极显著指数增长关系. 这与马秀梅研究的川中丘陵区农田生态系统 CO_2 排放通量日变化^[14]基本一致, 与王建国研究的黄土高原7种土地利用形式下土壤呼吸昼夜变化规律^[15]相似, 同谢锦升等研究侵蚀红壤植被恢复后土壤呼吸日变化趋势^[16]相近. 然而, 杜紫贤等研究的城市沿江芦苇湿地土壤呼吸日动态变化趋势^[17]与当天温度变化没有相似性, 可能是在土壤温度和湿度的交互作用下, 土壤呼吸对土壤温度的敏感性有所下降. 有研究结果显示, 土壤湿度在某一阈值范围内可成为影响土壤呼吸的主导因子^[18], 并且土壤呼吸的峰值在一天中出现时间的早晚与地表植物郁闭度也存在潜在的联系^[19].

3.2 土壤呼吸月动态

本研究发现, 3种林药复合模式与CK土壤呼吸月动态变化趋势一致, 在年内有较大变化, 测定最高呼吸速率 $4.27 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 是最低测定速率 $0.28 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 的15.4倍. 从呼吸月动态来看, 1月呼吸速率在全年中最低, 7月呼吸速率最高. 这与涂利华在华西雨屏区的研究结果^[20]一致.

从处理间的差异来看, 对照与各处理土壤呼吸4月开始出现较大差异, 在7月时差异最大, 该月HH(核桃+藿香模式)土壤呼吸速率比HC(核桃+川明参)高 $1.62 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. 7月后, CK(核桃纯林)与各复合处理间土壤呼吸差异逐渐缩小, 到12月上旬时, 各处理与CK呼吸速率已大致相等.

有研究发现, 田间种植条件下, 植物根系呼吸占土壤呼吸比重22.3%-86.6%, 随植物生长周期而变化^[21], 由此得出, 不同模式土壤呼吸速率月动态的差异与几种药材的生长周期和生理特性有关. 3种药材中, 川明参夏枯秋萌, 而桔梗与藿香都是春萌秋枯^[22]. 所以4月份时HC土壤呼吸在各处理中最高, 而在6月达到峰值, 7月开始下降. 桔梗6-9月为生长旺盛期, 10月中旬茎叶逐渐凋落, 地下根越冬^[23]. 在整个测定周期中HJ(核桃+桔梗)土壤呼吸与对照基本保持一致. 藿香花期为每年5月上旬到6月中旬^[24]. 这一时期, 藿香细根呼吸旺盛, 这使得HH土壤呼吸4月到5月间有大幅上升, 而保持6-7月无较大变化, 7月下旬, 受根系呼吸变化的影响逐渐减弱.

3.3 土壤呼吸与土壤温度关系

3种林-药复合模式和对照的土壤呼吸与土壤温度呈极显著指数增长关系. 对土壤温度和土壤相对湿度与土壤呼吸月变化的偏相关分析得出, 土壤温度可以解释87.8%-96%的土壤呼吸, 这与已有的多数研究结果^[25]相符. 大量研究显示, 无论是地域的差异, 或是海拔的变化, 还是不同结构的生态系统, 土壤温度与土壤呼吸都有着显著的相关关系^[26-27]. 也有少数的研究发现, 特定区域或特定时间段内土壤温度与土壤呼吸没有明显的相关性, 如热带稀树草原生态系统、沙漠生态系统和湖滨湿地生态系统^[28], 它们表现出与土壤温度的关系并不显著, 主要受湿度变化的影响.

3.4 土壤呼吸与土壤湿度关系

HJ(核桃+桔梗)、HC(核桃+川明参)同CK土壤呼吸与土壤湿度成不显著($P > 0.05$)倒数关系, 各复合处理和对照显著性顺序由低到高表现为CK、HJ、HC、HH, HH(核桃+藿香)极显著($P < 0.01$). 这与和龚斌等的研究结果^[29]相近, 而张俊丽等^[30]和杨龙^[31]研究发现, 土壤湿度与土壤温度共同作用于土壤 CO_2 的排放, 且呈显著正相关关系.

本研究发现, 林下药材郁闭度的大小关系同土壤呼吸与湿度关系的显著性大小关系一致. 各处理核桃郁闭度大致相同, 但3种药材的郁闭度大小依次为HH、HC、HJ、CK. 由此表明在川中丘陵地区, 夏季高温多雨, 高郁闭度的地表植被很大程度上影响了太阳光对表层土壤的直接照射, 减慢了浅层土壤的温度变化, 同时也降低了浅层土壤水分蒸发速率. 高郁闭度一方面减小了呼吸对温度变化的响应幅度, 另一方面相对增加了土壤湿度. 两方面的综合效应导致了HH(核桃+藿香)模式土壤呼吸与表层土壤湿度呈倒数关系. 有研究表明, 高湿度的土壤孔隙度较小, 孔隙度是影响土壤 CO_2 的排放关键因素^[27], 所以, 药材的郁闭度可能是影响土壤呼吸速率的间接因素.

3.5 不同林-药复合模式的土壤呼吸碳排放量

据估算, 川中丘陵区林-药复合模式每公顷一年土壤呼吸碳排放量为 $(6.71 \pm 0.62) \text{t}$, 远低于苏北淤泥质海岸防护林土壤呼吸 $(22-71 \text{t/a})$ ^[32], 小于农林复合隔离带林地、撂荒地以及农耕地的排放量, 与淮北平原4种土地利用形式中农林复合耕地碳排放总量^[33]相近, 高于华西雨屏区苦竹人工林和撑绿杂交竹林土壤(每公顷 4.27t/a 、 3.89t/a)^[34].

研究表明, 影响土壤碳排放的因素很多, 区域性气候的不同、生态系统的差异、同一生态系统不同的植被结构、地表植被郁闭度、植物根系生物量以及土壤碳库容量等^[35]都对土壤碳排放有直接或间接的作用. 同时, 不同的土地利用形式和人为活动的干扰都会对土壤碳排放有直接或间接的影响^[35]. 本研究对比3种林-药材复合模式发现, 各处理每月土壤呼吸存在定差异, 但一年内土壤呼吸碳排放量除HH(核桃+藿香)处理的碳排放量低于对照和另外两个复合处理外, CK(对照)和HJ(核桃+桔梗)、HC(核桃+川明参)两个复合处理间无显著差异. 各处理间碳排放总量大小关系依次为CK、HJ、HC、HH. 因该估算值与土壤温度有直接关系, 故而土壤温度的高低可以部分解释土壤碳排放总量大小, 而本次研究中3种药材的郁闭度差异也可能对土壤呼吸碳排放量不同有一定贡献.

4 结论

本研究对川中丘陵区3种林-药复合种植模式的土壤呼吸月变化及不同季节24 h变化进行了动态研究, 并深入分析了土壤呼吸对土壤温度和湿度的响应情况. 结果表明各林-药复合处理土壤呼吸月动态总体趋势一致, 变化规律为随温度变化的单峰曲线, 除HC(核桃+藿香)外的3个处理峰值都出现在7月; 而24 h变化呈正弦波型, 最大值出现在每天的午后14:00-16:00, 最小值出现在凌晨4:00-6:00; 在湿度不作为影响土壤呼吸的主要因素时, 土壤温度与土壤呼吸呈指数增

长关系;4种模式中,HH(核桃+藿香)处理土壤呼吸碳排放量最低,约为最大排放量(CK)的0.8倍。

在川中丘陵区构建林-药复合产业结构时,药材种类选择可优先考虑藿香;适当增大地表作物的郁闭度既可增加农民经济收入,同时还能降低土壤呼吸速率,有助于减小土壤碳排放总量,更好地体现出农林复合模式的生态效益优势,从而实现土地长期可持续利用这一目标。然而,单一的土壤呼吸强度因子不能作为土壤碳排放通量的标准,还需结合植物碳积累量和土壤碳固存量,分析判定该类人工生态系统在大气碳循环过程中所扮演的角色。

参考文献 [References]

- Sayer MAS, Haywood JD. Fine root production and carbohydrate concentrations of mature longleaf pine as affected by season of prescribed fire and drought [J]. *Trees*, 2006, **20**: 165-175
- 陈骥, 曹军骥, 陈迪超, 魏永林, 刘吉宏, 马扶林, 冯嘉裕, 夏瑶, 岑燕. 青海湖北岸高寒草甸草原非生长季土壤呼吸对温度和湿度的响应[J]. 草业学报, 2014, **23**: 78-86 [Chen J, Cao JJ, Chen DC, Wei YL, Liu JH, Ma FL, Feng JY, Xia Y, Cen Y. Effect of grazing exclusion on soil respiration during the dormant season in alpine meadow grassland ecosystems on the northern shore of Qinghai Lake [J]. *Acta Pratacult Sin*, 2014, **23**: 78-86]
- 马安娜, 陆健健. 长江口崇西湿地生态系统的二氧化碳交换及潮汐影响[J]. 环境科学研究, 2011, **24**: 716-721 [Ma AN, Lu JJ. Net ecosystem exchange of carbon and tidal effects in Chongxi wetland, Yangtze Estuary [J]. *Environ Sci Res*, 2011, **24**: 716-721]
- 王国兵, 郝岩松, 王兵, 阮宏华. 土地利用方式的改变对土壤呼吸及土壤微生物生物量的影响[J]. 北京林业大学学报, 2006, **28**: 73-79 [Wang GB, Hao YS, Wang B, Ruan HH. Influence of land use change on soil respiration and soil microbial biomass [J]. *J Beijing For Univ*, 2006, **28**: 73-79]
- 吴志丹, 李跃森, 王义祥, 翁伯琦. 经营措施对土壤碳储量和碳通量的影响[J]. 热带农业科学, 2008, **28**: 84-91 [Wu ZD, Li YS, Wang YX, Weng BQ. Effects of human activities on soil carbon storage and soil respiration [J]. *Trop Agric Sci*, 2008, **28**: 84-91]
- 陈卫洪, 漆雁斌. 土地利用形式对发展低碳农业的影响分析[J]. 农业技术经济, 2012 (5): 86-96 [Chen WH, Qi YB. Analysis of the impact of land use form on the development of low carbon agriculture [J]. *Agric Technol Econ*, 2012, **5**: 86-96]
- 赵成义. 陆地不同生态系统土壤呼吸及土壤碳循环研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2004 [Zhao CY. Study on soil respiration and soil carbon cycle of different terrestrial ecosystem [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2004]
- 李洪建. 不同生态系统土壤呼吸与环境因子的关系研究[D]. 太原: 山西大学, 2008 [Li HJ. Studies on soil respiration and its relations to environmental factors in different ecosystems [D]. Taiyuan: Shanxi University, 2008]
- 高东. 淮北平原三种土地利用类型土壤CO₂通量研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2011 [Gao D. Study on soil CO₂ flux of three kinds of land use types in Huaibei plain [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2011]
- 谢慧慧. 水蚀风蚀交错区土壤呼吸与水分运动的影响因素及调控[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2010 [Xie HH. The factors of influence soil respiration and water movement in the water wind erosion crisscross and regulation [D]. Yangling: Northwest Agriculture and Forestry University, 2010]
- 严忠海. 陕南秦巴山区农林复合模式效益评价及优化[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2005 [Yan ZH. study on benefit assignment and structure optimization of agroforestry systems in Shaanxi Qinba Mountains [D]. Yangling: Northwest Agriculture and Forestry University, 2005]
- 李锡鹏. 川中丘陵区典型农田和森林土壤温室气体排放特征及影响因素[D]. 成都: 西南交通大学, 2014 [Li XP. The characteristics and influencing factors of soil greenhouse gases emissions from typical cropland and forest in hilly areas of the central Sichuan basin [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014]
- 刘文娟. 华北低山丘陵区石榴-作物间作系统的土壤呼吸特征[D]. 保定: 河北农业大学, 2012 [Liu WJ. Soil respiration of *Punica granatum* - crop intercropping system in hilly area of North China [D]. Baoding: Agricultural University Of Hebei, 2012]
- 马秀梅. 川中丘陵区农田生态系统的CO₂排放通量研究[D]. 重庆: 西南农业大学, 2005 [Ma XM. Studies on emission fluxes of CO₂ from soil-crop ecosystem in the hilly area of the central Sichuan basin [D]. Chongqing: Southwest Agricultural University, 2005]
- 王建国. 黄土高原水蚀风蚀交错区土壤呼吸及其影响因素研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2011 [Wang JG. Affecting factors of soil respiration in the water-wind erosion cress cross region [D]. Yangling: Northwest Agriculture and Forestry University, 2011]
- 谢锦升, 杨玉盛, 曾宏达, 杨智杰, 黄石德, 岳辉. 侵蚀红壤植被恢复后土壤呼吸日动态及日呼吸速率测定方法比较[J]. 亚热带资源与环境学报, 2006 (4): 21-28 [Xie JS, Yang YS, Zeng HD, Yang ZJ, Huang SD, Yue H. Diurnal dynamics of soil respiration for different restoration communities in eroded bare land and comparison of soil respiration rates measured by two methods [D]. *J Subtrop Resour Environ*, 2006, **1**: 21-28]
- 杜紫贤, 曾宏达, 黄向华, 魏国军, 李熙波, 张静, 杨玉盛. 城市沿江芦苇湿地土壤呼吸动态及影响因子分析[J]. 亚热带资源与环境学报, 2010 (3): 49-55 [Du ZX, Zeng HD, Zhang, Huang XH, Wei GJ, Li XB, Zhang J, Yang SY. Soil respiration dynamics and influence factors analysis of reed wetland in urban areas [J]. *J Subtrop Resour Environ*, 2010, **5**: 49-55]
- Lloyd J, Taylor JA. On the temperature dependence of soil respiration [J]. *Funct Ecol*, 1994, **8**: 315-323
- 韩广轩, 周广胜, 许振柱. 中国农田生态系统土壤呼吸作用研究与展望[J]. 植物生态学报, 2008, **32**: 719-733 [Han GX, Zhou GS, Xu ZZ. Research and prospects for soil respiration of farmland ecosystems in China [J]. *J Plant Ecology*, 2008, **32**: 719-733]
- 涂利华. 模拟氮沉降对华西雨屏区苦竹人工林生态系统碳循环过程和特征的影响[D]. 成都: 四川农业大学, 2012 [Tu LH. Effects of simulated nitrogen deposition on carbon cycling processes and characteristics of *Pleioblastus amarus* plantation ecosystem in Rainy Area of West China [D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2012]
- Li XD, Fu H, Guo D, Li X, Wan C. Partitioning soil respiration and assessing the carbon balance in a *Setaria italica* (L.) Beauv. Cropland on the Loess Plateau, northern China [J]. *Soil Biol Biochem*, 2010, **42**: 337-

- 346
- 22 雷晓莉. 川明参产地加工方法及种子质量标准研究[D]. 成都: 成都中医药大学, 2013 [Lei XL. Studies on origin processing methods of Chuanmingshen and standards for quality research of seed [D]. Chengdu: Chengdu University of Traditional Chinese Medicine, 2013]
 - 23 雷福成, 王荣献, 张凯. 桔梗标准化栽培技术[J]. 信阳农业高等专科学校学报, 2004, **14**: 88-89 [Lei FC, Wang RX, Zhang K. Standard cultivation techniques of Balloonflower [J]. *J Xinyang Agric Coll*, 2004, **14**: 88-89]
 - 24 吴友根, 郭巧生, 林尤奋, 张军锋. 广藿香生长特性比较及海南广藿香花器结构的观察[J]. 时珍国医国药, 2011, **22**: 2997-2999 [Wu YG, Guo QS, Lin YF, Zhang JF. The comparison of growth characteristics and observation of flower structure in pog-ostemoh cablih [J]. *Li Shizhen Med Mat Med Res*, 2011, **22**: 2997-2999]
 - 25 田祥宇, 涂利华, 胡庭兴, 张健, 何远洋, 肖银龙. 华西雨屏区苦竹人工林土壤呼吸各组分特征及其温度敏感性[J]. 应用生态学报, 2012, **23**: 293-300 [Tian XY, Tu LH, Hu TX, Zhang J, He YY, Xiao YL. Characteristics of soil respiration components and their temperature sensitivity in a *Pleioblastus amarus* plantation in Rainy Area of West China [J]. *J Appl Ecol*, 2012, **23**: 293-300]
 - 26 王传宽, 杨金艳. 北方森林土壤呼吸和木质残体分解释放出的CO₂通量[J]. 生态学报, 2005, **25**: 633-638 [Wang C, Yang JY. Carbon dioxide fluxes from soil respiration and woody debris decomposition in boreal forests [J]. *J Ecol*, 2005, **25**: 633-638]
 - 27 栾军伟, 向成华, 骆宗诗, 宫渊波. 森林土壤呼吸研究进展[J]. 应用生态学报, 2006, **17**: 2451-2456 [Luan J W, Xiang CH, Luo ZS, Gong YB. Research advances in forest soil respiration [J]. *J Appl Ecol*, 2006, **17**: 2451-2456]
 - 28 刘殿君, 吴波, 李永华, 朱雅娟, 卢琦. 极端干旱区增雨加速泡泡刺群落土壤碳排放[J]. 生态学报, 2012, **32**: 5396-5404 [Liu DJ, Wu B, Li YH, Zhu YJ, Lu Q. Rain enrichment-ccelerated carbon emissions from soil in a *Nitraria sphaerocapa* community in hyperacid region [J]. *J Ecol*, 2012, **32**: 5396-5404]
 - 29 龚斌, 王凤玉, 张继平, 沃笑, 刘伟玲, 齐月. 中亚热带森林土壤呼吸日变化及其与土壤温湿度的关系[J]. 生态环境学报, 2013, **22**: 1275-1281 [Gong B, Wang FY, Zhang JP, Wo X, Liu WL Qi Y. Diurnal changes of soil respiration of mid-subtropical forest and its relationship with soil temperature and humidity [J]. *J Ecol Environ*, 2013, **22**: 1275-1281]
 - 30 张俊丽, Sikander KT, 温晓霞, 陈月星, 高明博, 刘杨, 廖允成. 不同耕作方式下旱作玉米田土壤呼吸及其影响因素 [J]. 农业工程学报, 2012 (18): 192-198 [Zhang JL, Sikander KT, Wen XX, Chen XY, Gao MB, Liu Y, Liao YC. Soil respiration and its affecting factors in dry-land maize field under different tillage systems [J]. *J Agric Eng*, 2012 (18): 192-198]
 - 31 杨龙. 温度和水分对青海湖湿地不同植物群落土壤呼吸的影响——以小泊湖为例[D]. 西宁: 青海师范大学, 2013 [Yang L. The impact of temperature and moisture content on soil respiration of different plant community in the Qinghai Lake Wetland [D]. Xining: Qinghai Normal University, 2013]
 - 32 孔雨光, 张金池, 王因花, 张东海, 储冬生, 淘宝先. 苏北淤泥质海岸典型防护林地土壤呼吸及其温度敏感性[J]. 生态学报, 2009, **8**: 4026-4034 [Kong YG, Zhang JC, Wang YH, Zhang DH, Chu DS, Tao BX. Soil respiration and its temperature sensitivity of typical protective forest land in northern Jiangsu Province [J]. *J Ecol*, 2009, **8**: 4026-4034]
 - 33 高东, 鲁绍伟, 饶良懿, 李佳, 张滕, 靳阿亮. 淮北平原四种土地利用类型非生长季土壤呼吸速率 [J]. 农业工程学报, 2011 (4): 94-99 [Gao D, Lu SW, Rao LY, Li J, Zhang T, Jin AL. Soil respiration rate of four kinds of land use types in Huaibei plain [J]. *J Agric Eng*, 2011 (4): 94-99]
 - 34 涂利华, 戴洪忠, 胡庭兴, 张健, 雒守华. 模拟氮沉降对华西雨屏区撑绿杂交竹林土壤呼吸的影响[J]. 应用生态学报, 2011, **22**: 829-836 [Tu LH, Dai ZH, Hu TX, Zhang J, Ke SH. Effects of simulated nitrogen deposition on soil respiration in a *Bambusa pervariabilis* × *Dendrocala mopsi* plantation in Rainy Area of West China [J]. *J Appl Ecol*, 2011, **22**: 829-830]
 - 35 张涛, 李永夫, 姜培坤, 周国模, 刘娟. 土地利用变化影响土壤碳库特征与土壤呼吸研究综述[J]. 浙江农林大学学报, 2013, **30**: 428-437 [Zhang T, Li YF, Jiang PK, Zhou GM, Liu J. The effect of land use change on soil carbon pool and soil respiration was summarized [J]. *J Zhejiang Agric For Univ*, 2013, **30**: 428-437]
 - 36 孟春, 王立海, 沈微. 择伐对小兴安岭地区针阔混交林土壤呼吸温度敏感性的影响[J]. 林业科学, 2011 (3): 102-106 [Meng C, Wang LH, Shen W. Effect of selective cutting on soil respiration temperature sensitivity in the mixed forest of coniferous and broad leaved forest in Small Xingan area [J]. *For Sci*, 2011 (3): 102-106]