

水土保持措施对红壤坡地柑橘林土壤呼吸及其水热因子的影响

左继超^{1,2}, 胡建民^{1,2}, 郑海金^{1,2}, 张英虎^{1,2}, 万佳蕾^{1,2}

(1. 江西省水土保持科学研究院, 江西 南昌 330029; 2. 江西省土壤侵蚀与防治重点实验室, 江西 南昌 330029)

摘要: [目的] 探讨不同水土保持措施对红壤坡地柑橘林土壤呼吸的影响, 为科学评价水土保持生态建设在应对气候变化方面的作用提供基础数据。[方法] 采用试验观测和对比分析的方法研究横坡间作+等高草带、横坡间作、顺坡间作和清耕对照 4 种处理对柑橘林土壤呼吸速率的动态变化及其对土壤温度、土壤水分的响应。[结果] 4 个不同处理的柑橘林土壤呼吸速率均呈明显的单峰曲线变化, 峰值出现在 7 月; 各处理的土壤呼吸速率季节动态变化一致, 采取横坡间作+等高草带和横坡间作两种水土保持措施均一定程度上增加了土壤呼吸速率; 土壤呼吸速率与土壤温度呈显著正相关; 横坡间作+等高草带和横坡间作处理的土壤呼吸的温度敏感性指数 Q_{10} 较柑橘清耕和顺坡间作处理 Q_{10} 值略有增加。[结论] 红壤柑橘林采取水土保持措施后, 土壤呼吸速率增强, 且其对温度的响应增加。

关键词: 柑橘林; 土壤呼吸; 水土保持措施; 土壤水分; 土壤温度

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2016)04-0124-05

中图分类号: S157.4

文献参数: 左继超, 胡建民, 郑海金, 等. 水土保持措施对红壤坡地柑橘林土壤呼吸及其水热因子的影响[J]. 水土保持通报, 2016, 36(4): 124-128. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2016.04.022

Responses of Soil Respiration and Hydro-thermal Factors to Soil and Water Conservation Measures in *Citrus Reticulata* Plantations

ZUO Jichao^{1,2}, HU Jianmin^{1,2}, ZHENG Haijin^{1,2}, ZHANG Yinghu^{1,2}, WAN Jialei^{1,2}

(1. Key Laboratory of Soil Erosion and Prevention of Jiangxi Province, Nanchang, Jiangxi 330029, China; 2. Jiangxi Institute of Soil and Water Conservation, Nanchang, Jiangxi 330029, China)

Abstract: [Objective] The effects of soil and water conservation measures on soil respiration were studied to scientifically evaluate the role of soil and water conservation to climate change. [Methods] Four soil and water conservation measures, including cross-slope tillage and contour sod strip, cross-slope tillage, down-slop tillage and weed clearing, were designed to assess the effects on soil respiration. And the response of soil respiration rate to soil moisture and soil temperature was illustrated. [Results] Soil respiration rates of four *Citrus reticulata* plantation treatments had the same seasonal change trend, they all changed in a unimodal curve with their peaks in July. Soil respiration rate increased to some extent as soil and water conservation measures taken. Soil respiration rate had a significantly positive correlation with soil temperature. The temperature sensitivity index Q_{10} values in the cross-slope tillage and contour sod strip treatment and cross-slope tillage treatment were higher than that in the treatments of weed clearing and down-slop tillage. [Conclusion] Soil respiration increased after soil and water conservation measures was implemented, which could influence of soil temperature to some extent.

Keywords: *Citrus reticulata* plantations; soil respiration; soil and water conservation measures; soil water; soil temperature

土壤侵蚀会导致土壤有机碳库的损失, 并降低土壤质量。水土保持措施作为一项维持和提高土壤肥

力的措施, 在土壤侵蚀严重的地区被广泛采用^[1]。中国东南红壤丘陵区土地面积 $1.17 \times 10^6 \text{ km}^2$, 约占全

收稿日期: 2015-09-07

修回日期: 2015-11-07

资助项目: 江西省重点科技成果转化计划项目“水土保持调控径流泥沙技术推广应用”(20133ACI90004); 水利部公益性行业科研专项(201501045); 江西省水利科技项目(KT201421; KT201312)

第一作者: 左继超(1987—), 男(满族), 河北省承德市人, 硕士, 助理工程师, 主要从事水土保持生态效应研究。E-mail: jczuo1121@163.com。

通讯作者: 胡建民(1974—), 男(汉族), 江西省宁都县人, 硕士, 教授级高级工程师, 主要从事流域水土保持研究。E-mail: hjmhx@jxsl.gov.cn。

国土总面积的 12.1%，是中国重要的农业生态区^[2]。种植果树是该区域坡地农业发展过程中的主要模式之一，不仅可以治理水土流失、保护和改善生态环境，而且可以调整农业产业结构，培养农业主导产业。传统的清耕型和粗放式果园管理模式导致严重的水土流失，而采取水土保持措施能够减少果园水土流失，提高果园土壤的综合利用效率，提升果品产量和质量等^[3]。土壤呼吸作用是土壤碳库向大气碳库输入的主要途径，土壤呼吸速率相对微小的波动都会显著改变大气中 CO₂ 的浓度和土壤碳的积累速率，从而加剧或减缓全球气候变暖。采取不同形式的水土保持措施会改变微地貌的形态，引起土壤温度、水分、结构、有机质及养分含量的变化，势必会影响土壤微生物的分解活动，从而改变土壤呼吸速率的特征^[4]。水土保持措施的广泛使用会对原先自然状态的土壤碳排放进程施加重大影响，从而改变其对未来全球气候变化的反馈机制^[1]。目前，有关水土保持措施对土壤的效应研究仍局限在土壤的结构特征变化、土壤的水库及碳库效应等方面^[5-6]，对土壤碳排放及其响应机制的相关研究涉及较少。因此，本研究以土壤侵蚀严重地区的江西红壤坡地柑橘林为研究对象，比较分析有无施行水土保持措施的土壤含水量、土壤温度及土壤呼吸季节动态的差异，探讨采取水土保持措施后，土壤呼吸季节动态及其对土壤温度和湿度的响应变化，进而为水土流失区治理后的固碳减排效应评估提供技术支撑，同时为科学评价水土保持生态建设在应对气候变化方面的作用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于江西省水土保持科研创新基地(115°42′38″—115°43′06″E, 29°16′37″—29°17′40″N)内,该基地处于中国南方红壤的中心分布区域,具有典型代表意义。基地地处江西省北部的德安县燕沟小流

域、鄱阳湖水系博阳河西岸,属亚热带季风气候区,多年平均降雨量 1 350.9 mm,多年平均气温 16.7℃,年日照时数 1 650~2 100 h,多年平均无霜期为 249 d;地貌为浅丘岗地,海拔 30~100 m,坡度 5°~25°;成土母质以第四纪红色黏土为主,地带性植被为亚热带常绿阔叶林。试验布设前这里生态环境相当脆弱,水土流失十分严重,水土流失面积占土地总面积的 85.7%,其中强烈及以上流失面积占总流失面积的 40.7%;土壤侵蚀模数为 2 948 t/(km²·a),以水力侵蚀为主。

1.2 试验设计

在土层厚度均匀、土壤理化特性较一致、坡度较均匀的原裸露荒坡地上,布设 4 个试验小区。小区四周设置高出地表 30 cm 的围埂,用混凝土砖块砌成;每个小区水平投影面积均为 100 m²(宽 5 m,长 20 m),坡度为 12°,成土母质均为第四纪红黏土。针对当地柑橘园经营方式采取水土保持措施,设计横坡间作+等高草带、横坡间作、顺坡间作和清耕对照 4 种处理。每个小区均于 2000 年春栽植 2 年生大苗椪柑(*Citrus reticulata*)12 株(种植 6 行,行距 3.0 m,每行 2 株,株距 2.5 m;距小区两侧各 1.25 m,距坡顶 2.5 m)。至今,此椪柑林龄 15 a,平均树高 2.6 m、冠幅 2.5 m,林木生长良好。横坡间作+等高草带处理小区在果树下采取百喜草等高草带状覆盖,草丛高度 20~40 cm,草带宽 1.0 m,同时间作黄豆和萝卜;横坡间作处理小区在果树下横坡间种农作物黄豆和萝卜,每个小区种植 6 横条;顺坡间作小区则在果树下顺坡间种黄豆和萝卜,每个小区种植 3 竖条;椪柑清耕小区作为对照处理,及时清除小区的杂草。间种黄豆和萝卜的小区,每年 4 月中旬至 8 月中旬种植黄豆,种植密度为每 2.40×10⁵株/hm²;8 月中旬一次年 3 月中旬种植萝卜,种植密度为 8 000 株/hm²。各试验小区的植被覆盖度、土壤侵蚀模数、土壤有机质含量及主要微生物类群(真菌、细菌和放线菌)数量等基本情况详见表 1。

表 1 研究区各小区基本情况

柑橘园措施名称	植被覆盖度/ %	年均土壤侵蚀量/ (t·km ⁻² ·a ⁻¹)	有机质含量/ (g·kg ⁻¹)	土壤微生物数量/ (10 ⁴ ·g ⁻¹)
横坡间作+等高草带	80	22	17.16	57.65
横坡间作	60	742	19.05	240.34
顺坡间作	60	1326	18.14	126.55
清耕(对照)	20	2305	14.99	74.33

1.3 试验观测方法

在 4 种不同类型的柑橘林小区内,分别按照坡上、坡中、坡下布设 3 个 1 m×1 m 的样方作为土壤呼吸测定点,样方边缘距离间作作物 30 cm 以上,以减

少耕作扰动对其影响。在每个土壤呼吸观测点中心埋设直径 20 cm 的土壤环,土壤环上端高出地面 3 cm,清除土壤环内土壤表层枯落物。土壤呼吸速率采用美国开路式土壤碳通量自动测量系统(LI-8100 A)

进行测定。测定期为 2014 年 4 月至 2015 年 3 月, 每半个月选择天气晴好时测定各观测点的土壤呼吸速率, 2 次观测值的平均值作为本月的观测数据, 每个小区土壤呼吸速率取坡上、坡中、坡下 3 个观测点的平均值。同时, 利用 LI-8100 A 附带的土壤温度和水分探头同步测定 5 cm 深度土壤温度和 0—20 cm 土壤体积含水率。

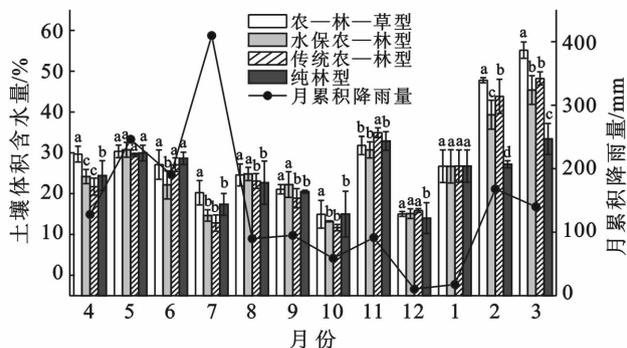
1.4 数据处理

所有的统计分析都在 SPSS 17.0 软件中进行, 用 One-way ANOVA 检验土壤体积含水量、土壤温度、土壤呼吸速率在有无采取水土保持措施的差异性, 用 Pearson 相关分析方法检验土壤呼吸和土壤温度、土壤水分间的相关性。所有统计的显著性水平均为 $p = 0.05$ 。用 Origin 8.0 软件作图。

2 结果与分析

2.1 土壤水分的动态变化

如图 1 所示, 4 种措施处理下 0—20 cm 土壤体积分含水量的季节动态变化规律基本一致, 与月累积降雨量紧密相关。柑橘清耕处理土壤体积含水量在 14.02%~33.39% 之间, 平均土壤体积含水量为 24.40%; 柑橘顺坡间作处理和横坡间作处理土壤体积分含水量变化范围、平均土壤体积分含水量分别为 11.70%~48.22%, 26.20% 和 13.23%~45.37%, 25.84%, 比柑橘清耕样地土壤含水量有一定程度的增加, 但未达到显著水平 ($p > 0.05$); 柑橘横坡间作 + 等高草带处理与柑橘清耕处理相比, 土壤体积分含水量有显著增加 ($p < 0.05$), 其变化范围在 15.03%~55.13% 之间, 平均体积分含水量达到 28.70%。试验结果表明, 柑橘林采取水土保持措施的农林经营方式, 较清耕型柑橘林的土壤水分均有一定程度的增加, 以采取横坡间作 + 等高草带水土保持措施的土壤水分增加效果最明显。



注: 不同字母表示不同处理在 0.05 水平上有显著差异。下同。

图 1 不同柑橘林小区土壤含水量的月动态

2.2 土壤温度的动态变化

如图 2 所示, 无论是柑橘清耕处理还是柑橘采取水土保持措施的顺坡间作处理、横坡间作处理和横坡间作 + 等高草带处理的土壤温度均呈明显的单峰曲线变化, 从 4 月开始逐渐升高, 7 月达到最大值, 之后逐渐降低, 12 月份至翌年 1 月达到最低值, 而后又逐渐升高, 与月平均气温变化规律一致。横坡间作 + 等高草带、横坡间作、顺坡间作和清耕 4 种处理观测期间土壤平均温度分别为 18.88, 16.94, 17.11 和 17.83 °C, 无显著性差异 ($p > 0.05$)。本试验结果表明, 水土保持措施对土壤温度的影响有限, 这与叶功富等^[1]对不同水土保持措施下板栗林土壤呼吸的研究结果一致。

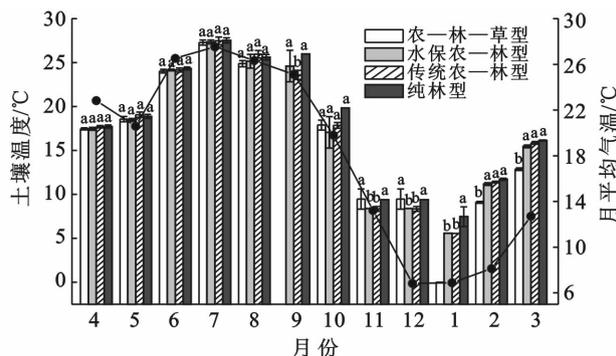


图 2 不同柑橘林小区土壤温度月动态

2.3 土壤呼吸速率的季节变化

如图 3 所示, 4 种处理措施下土壤呼吸速率的季节变化趋势均呈现出单峰型曲线, 从 3 月开始土壤呼吸速率逐渐升高, 在 7 月达到峰值, 之后逐渐降低, 12 月到翌年 1 月达到最低值, 而后又升高, 与土壤温度变化趋势一致。这与土壤根系的生命活动和土壤微生物的活性受到季节因素影响有关。红壤坡地柑橘林采取不同水土保持措施后, 土壤呼吸速率有所不同。横坡间作处理平均土壤呼吸速率最大, 为 1.93 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; 横坡间作 + 等高草带平均土壤呼吸速率次之, 为 1.87 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; 再次是清耕处理, 为 1.73 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; 顺坡间作最低, 为 1.67 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 但均未达到显著性差异 ($p > 0.05$)。

2.4 土壤呼吸速率与土壤温度、水分的关系

Pearson 相关分析结果表明(表 2), 各措施类型的土壤呼吸速率与土壤温度的相关性均表现为极显著正相关水平 ($p < 0.01$); 与土壤体积分含水量则存在负相关关系, 但均未达到显著水平 ($p > 0.05$)。对大部分亚热带地区而言, 降雨量相对充沛, 土壤水分不是土壤呼吸的限制因子, 因此土壤呼吸速率的季节动态与土壤温度基本上是一致的。

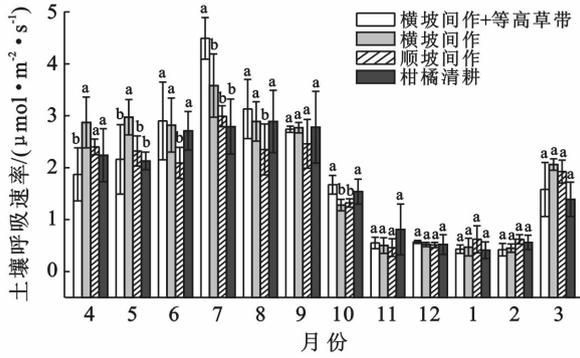


图 3 不同柑橘林小区土壤呼吸速率的月动态

表 2 土壤呼吸、土壤温度、土壤水分的 Pearson 相关系数

处理	项目	土壤温度	土壤含水量		土壤呼吸	
			相关系数	p 值	相关系数	p 值
横坡间作+ 等高草带	土壤温度	1	-0.403	0.248	0.967	0.000
	土壤含水量		1		-0.301	0.343
	土壤呼吸				1	
横坡间作	土壤温度	1	-0.296	0.351	0.913	0.000
	土壤含水量		1		-0.182	0.572
	土壤呼吸				1	
顺坡间作	土壤温度	1	-0.357	0.255	0.912	0.000
	土壤含水量		1		-0.288	0.364
	土壤呼吸				1	
柑橘清耕	土壤温度	1	-0.270	0.396	0.960	0.000
	土壤含水量		1		-0.142	0.661
	土壤呼吸				1	

土壤呼吸与土壤温度间的关系通常利用指数方程 $F=ae^{kT}$ 来描述。式中: F 为土壤呼吸速率, T 为土壤温度, a, k 为回归系数常数^[7]。用 Q_{10} 来表示土壤温度升高 10°C 土壤呼吸速率增加值, $Q_{10} = e^{10k}$ 。对不同措施类型柑橘林土壤呼吸速率与土壤温度进行回归分析表明, 土壤呼吸速率和土壤温度表现为很好的指数方程关系(表 3), Q_{10} 在 2.41~3.13 之间。各措施的指数方程相关系数 R^2 值均较大(R^2 均大于 0.82), 说明指数方程能很好地描述土壤温度和土壤呼吸速率的相关关系。柑橘清耕处理和顺坡间作处理的 Q_{10} 分别为 2.64, 2.41, 横坡间作+等高草带处理与横坡间作处理的 Q_{10} 较前两者 Q_{10} 值略有增加, 分别为 3.13, 2.86, 即土壤呼吸对土壤温度的变化较为敏感。采取水土保持措施后, 土壤有机质含量明显增加(表 1), 可为土壤微生物活动提供更好的生存环境, 使得土壤呼吸更易受到非生物因子如温度等的影响。

表 3 土壤呼吸速率与土壤温度关系方程和 Q_{10} 值

处理	指数方程	相关系数	Q_{10}
横坡间作+等高草带	$F=0.2121e^{0.114T}$	$R^2=0.9057$	3.13
横坡间作	$F=0.2484e^{0.105T}$	$R^2=0.8221$	2.86
顺坡间作	$F=0.2933e^{0.088T}$	$R^2=0.8554$	2.41
柑橘清耕	$F=0.2487e^{0.097T}$	$R^2=0.8813$	2.64

3 讨论

3.1 土壤呼吸对水土保持措施响应

众多研究结果显示, 土壤呼吸季节变化一般呈单峰型特点^[8-9]。本试验结果表明, 柑橘林 4 种措施处理下, 土壤呼吸速率随季节变化动态均与土壤温度季节变化趋势基本一致, 呈现单峰曲线特征, 柑橘林采取横坡间作+等高草带和横坡间作两种水土保持措施处理均一定程度上增加了土壤呼吸速率。造成土壤呼吸速率动态变化差异的原因可能是不同的土壤类型、不同气候、植被因素, 因此土壤呼吸季节动态变化应该结合区域土壤、气候、土地利用类型、农作经营方式等因素综合分析^[10-11]。

水土保持措施会改变土壤的水分、土壤热量状况, 以及改善土壤结构和微生态环境, 从而影响土壤呼吸速率情况^[6]。已有研究^[12]表明, 农林复合型水土保持措施可以维持和提高土壤肥力, 改善土壤理化性状; 王义祥等^[13]研究发现, 柑橘园生草处理通过牧草生物量的累计增加了系统中碳汇能力, 套种牧草后对柑橘园土壤呼吸有明显提高。本研究结果表明, 红壤坡地采取不同水土保持措施后, 平均土壤呼吸速率有所不同, 横坡间作处理平均土壤呼吸速率最大, 横坡间作+等高草带处理平均土壤呼吸速率次之, 再次是柑橘清耕处理, 顺坡间作处理最小。横坡间作+等高草带处理和横坡间作处理两种措施有效减少了土壤水分和养分流失, 有机质含量高(表 1), 因此土壤微生物呼吸代谢的底物增加, 基础呼吸强度增加, 土壤呼吸速率相对较大; 顺坡间作处理和柑橘清耕两种处理水土流失量大、土壤有机质含量低、土壤微生物量小(表 1), 导致微生物体的周转率慢, 因而土壤呼吸速率相对较小。同时, 从土壤呼吸速率的季节变化曲线来看, 可以发现, 不同措施之间土壤呼吸速率的差异主要是因为生长季期间差别较大。一般认为, 春季和夏季是植物根系生长旺盛时期, 故根系呼吸速率在此季节所占比例要高。秋冬季节温度下降, 根系生长滞缓, 相比土壤微生物, 受影响最大的是土壤根系, 因此土壤微生物呼吸在此季节中所占比例较高^[14]。另外, 土壤呼吸的光合作用调控机制学说表明, 植物生长期间土壤呼吸主要来自于新合成的光合产物, 因此根系呼吸主要依赖于植物光合产物对地下部分的分配, 生长季光合作用和生产力大的植物造成地下土壤呼吸作用也旺盛^[15]。因此, 本研究中采取横坡间作+等高草带和横坡间作两种水土保持措施处理较高可能受到植被净初级生产力控制。

3.2 土壤呼吸与土壤温度、土壤水分的关系

土壤水分是影响陆地生态系统 CO₂ 通量的重要因素,对植物生长、根系分布、微生物活性等与土壤呼吸密切相关的生物因子起控制作用^[6]。诸多研究显示,水分对土壤呼吸的影响具有复杂性和不确定性,取决于环境因子的配置状况,不同生态系统土壤水分与呼吸间分别存在正相关^[5]、负相关和不相关关系^[14]。本研究表明,各水土保持措施类型的柑橘林土壤呼吸速率与土壤含水量呈负相关关系,但不显著,说明土壤水分不是土壤呼吸的限制因子。可能是由于本研究区为亚热带季风气候区,雨量充沛,全年土壤含水量波动不大,土壤水分未对土壤呼吸产生明显影响;同时,土壤温度与土壤含水量呈负相关关系,因此土壤温度对土壤呼吸的影响可能部分掩盖了土壤水分对土壤呼吸的影响^[15]。

土壤温度是影响土壤呼吸的重要因素之一,土壤温度升高会促进有机质的分解、氧化以及微生物和土壤根系的活性,从而促进碳矿化的过程^[16]。研究表明^[17],土壤呼吸具有明显的季节动态,并且与当地水热条件关系密切。一般土壤呼吸速率夏季高于冬季、雨季高于旱季、植物生长季高于非生长季。本研究表明,4种措施类型的柑橘林土壤呼吸速率季节间有明显差异(图3),夏季土壤呼吸明显高于其他季节。土壤呼吸的这种季节变化主要与土壤温度的调控有关。本试验用指数方程拟合不同水土保持措施类型柑橘林的土壤呼吸速率与土壤温度,均达显著正相关。

本研究表明,柑橘清耕和顺坡耕作处理的 Q₁₀ 分别为 2.64 和 2.41,横坡耕作+等高草带处理和横坡耕作处理的 Q₁₀ 较前两者 Q₁₀ 值略有增加,分别为 3.13 和 2.86,这与已有的研究^[18] 结果基本一致。可能是由于采取较好的水土保持措施后,改善了土壤的水分状况、土壤结构及土壤有机质质量分数,充足的水分和适宜的土壤结构,将给土壤微生物的分解提供一个更为良好的生存环境,使土壤呼吸对非生物因素(主要为土壤温度)的响应变得更为显著。

综合分析得出 4 种水土保持措施下的柑橘林土壤呼吸速率对温度的反应均比对土壤含水量的反应敏感,但是由于土壤呼吸对水热条件反应的复杂性,陈全胜等^[19] 认为研究土壤呼吸对温度变化的响应有必要按照不同植被状况进行。Risk 等^[20] 认为土壤温度和水分模式是调控土壤呼吸的重要物理变量。为了更准确的预测生态系统的净呼吸,仍需对不同因子对土壤呼吸的影响进行分类,进一步加强多因素交互效应的研究。同时,有必要研究不同组分土壤呼吸对采取水土保持措施的响应是否存在差异,这对深入了

解土壤呼吸的内在机制和土壤碳循环有重要意义。

4 结论

(1) 不同水保措施处理下柑橘林土壤呼吸速率季节变化规律基本一致,均呈单峰型变化趋势,最大值出现在 7 月份,最小值出现在 1 月份;4 种柑橘林土壤呼吸速率表现为:横坡间作处理>横坡间作+等高草带处理>柑橘清耕处理>顺坡间作处理,横坡间作和横坡间作+等高草带 2 种水土保持措施可一定程度上增加土壤呼吸速率。

(2) 土壤呼吸速率与土壤温度变化具有较好的一致性,均符合指数相关关系,与土壤含水率没有显著关系。不同水土保持措施下,柑橘林土壤呼吸速率随温度变化的敏感性系数 Q₁₀ 有所差异,表现为:横坡间作+等高草带>横坡间作>柑橘清耕>顺坡耕作。

(3) 因研究区雨水充沛等原因,虽然采取采取水土保持措施的柑橘林较清耕对照柑橘林的土壤水分均有一定程度的增加,但土壤水分未对土壤呼吸产生明显影响。

[参 考 文 献]

- [1] 叶功富,黄石德,杨智杰,等. 水土保持措施对板栗林土壤呼吸的影响[J]. 中国水土保持科学, 2013, 11(1): 59-64.
- [2] 何圣嘉,谢锦升,杨智杰,等. 南方红壤丘陵区马尾松林下水土流失现状、成因及防治[J]. 中国水土保持科学, 2011, 9(6): 65-70.
- [3] 翁伯琦,王义祥,黄毅斌,等. 生草栽培下果园土壤固碳潜力研究[J]. 生态环境学报, 2013, 22(6): 931-934.
- [4] 康玲玲,王云璋,刘雪,等. 水土保持措施对土壤化学特性的影响[J]. 水土保持通报, 2003, 23(1): 46-48.
- [5] Jia Bingrui, Zhou Guangsheng, Wang Fengyu, et al. Effects of grazing on soil respiration of leymus chinensis steppe[J]. Climatic Change, 2007, 82(1/2): 211-223.
- [6] 冷疏影,冯仁国,李锐,等. 土壤侵蚀与水土保持科学重点研究领域与问题[J]. 水土保持学报, 2004, 18(1): 1-6.
- [7] 吴会军,蔡典雄,武雪萍,等. 不同施肥条件下小麦田土壤呼吸特征研究[J]. 中国土壤与肥料, 2010(6): 70-74.
- [8] Yan Meifang, Zhang Xinshi, Zhou Guangsheng, et al. Temporal and spatial variation in soil respiration of poplar plantations at different developmental stages in Xinjiang, China[J]. Journal of Arid Environments, 2011, 75(1): 51-57.
- [9] 孟凡乔,关桂红,张庆忠,等. 华北高产农田长期不同耕作方式下土壤呼吸及其季节变化规律[J]. 环境科学学报, 2006, 26(6): 992-999.

着一定的相关关系,地表破损率越大,其地表风积过程越显著,地表破损率为 50% 时月均的风蚀/风积深度是 35%,20%,5% 和 0% 的 2.5,2.8,9 和 12 倍,且随着地表破损率的减小,风沙流运动状态逐渐由风积填缝过程转化为风蚀过程,地表破损率越小,越接近于非塌陷地表情况。回归分析表明,风蚀/风积深度(H)与地表破损率(V)呈多项式函数关系。对回归模型的可信度及显著性进行检验,其相关系数的变化范围为 81.86%~95.6%,方程拟合效果较好。

4 讨论与结论

(1) 塌陷 1 a、塌陷 2 a 和对照(非塌陷)沙丘不同典型位置的平均风蚀/风积深度分别达到 -28.2, -45.6 和 -2.8 cm,失土厚度分别比对照(非塌陷)高 10.07 和 16.29 倍,其整体的风蚀概率分别达 60% 以上,90% 以上和 10% 以下。采煤塌陷有效的促进了风沙运动,改变了局部的风蚀堆积厚度,可能引起固定半固定沙丘重新活化。

(2) 采煤塌陷后不同地表破损率对风蚀堆积厚度影响不同,地表破损率越大,其地表风积过程越显著,地表破损率为 50% 时月均的风蚀/风积深度是 35%,20%,5% 和 0% 的 2.5,2.8,9 和 12 倍,且随着地表破损率的减小,风沙流运动状态逐渐由风积填缝过程转化为风蚀过程,地表破损率越小,越接近于非

塌陷地表情况。回归分析表明,风蚀/风积深度(H)与地表破损率(V)呈多项式函数关系。

[参 考 文 献]

- [1] 赵国平,李晖,张洪江,等. 神府煤田风沙区采煤塌陷地表环境动态变化的综合评价[J]. 西安交通大学学报, 2012,46(5):126-137.
- [2] 傅耀军,李曦滨,孙占起,等. 晋陕蒙能源基地榆神府矿区水土流失综合评价[J]. 水土保持通报. 2003,23(1): 32-35.
- [3] 姚伟. 神府东胜矿区地质环境综合评价与灾害防治[D]. 陕西 西安:西安科技学院,2002:23-29.
- [4] 范立民,杨宏科. 神府矿区地面塌陷现状及成因研究[J]. 陕西煤炭技术,2000(1):7-9.
- [5] 赵国平,左合君,封斌,等. 半干旱区采煤塌陷对风蚀影响强度模糊综合评判:以神府—东胜煤田补连塔风沙区为例[J]. 中国沙漠,2009,29(6):1069-1074.
- [6] 姚洪林,阎德仁,胡小龙,等. 毛乌素沙地流动沙丘风蚀积沙规律研究[J]. 内蒙古林业科技,2001(1):3-9.
- [7] 赵国平. 采煤塌陷对风蚀的影响研究[D]. 内蒙古 呼和浩特:内蒙古农业大学,2007.
- [8] 王训明,郎雨丽,花婷,等. 戈壁砾石覆盖度与风蚀强度关系试验研究[J]. 中国沙漠,2013,33(2):313-319.
- [9] 张华,李锋瑞,张铜会,等. 春季裸露沙质农田土壤风蚀量动态与变异特征[J]. 水土保持学报,2002,16(3):29-32.
- [10] 孙小花,张仁陟,蔡立群,等. 不同耕作措施对黄土高原旱地土壤呼吸的影响[J]. 应用生态学报,2009,20(9): 2173-2180.
- [11] 代快,蔡典雄,王燕,等. 不同耕作措施对旱作春玉米农田土壤呼吸影响的研究:土壤温度对土壤呼吸速率的影响[J]. 中国土壤与肥料,2010(6):64-69.
- [12] 曾德慧. 农林复合系统种间关系研究进展[J]. 生态学报,2007,26(9):1464-1470.
- [13] 王义祥,吴志丹,翁伯琦,等. 翻耕和生草对果园土壤碳排放的影响[J]. 中国农业气象,2010(S1):20-22.
- [14] 肖胜生,熊永,段剑,等. 基于组分区分的南方红壤丘陵区土壤呼吸对植被类型转换的响应[J]. 农业工程学报,2015,31(14):123-131.
- [15] Almagro M, López J, Querejeta J, et al. Temperature dependence of soil CO₂ efflux is strongly modulated by seasonal patterns of moisture availability in a mediterranean ecosystem[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2009,41(3):594-605.
- [16] 杨庆朋,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.
- [17] 王超,黄蓉,杨智杰,等. 万木林保护区柑橘和锥栗园土壤呼吸的比较[J]. 应用生态学报,2012,23(6):1469-1475.
- [18] 张丁辰,蔡典雄,代快,等. 旱作农田不同耕作土壤呼吸及其对水热因子的响应[J]. 生态学报,2013,33(6): 1916-1925.
- [19] Chen Quansheng, Li Linghao, Han Xingguo, et al. Responses of soil respiration to temperature in eleven communities in Xilingol grassland, Inner Mongolia[J]. Acta Phytocological Sinica, 2003,27(4):441-447.
- [20] Risk D, Nickerson N, Phillips C L, et al. Drought alters respired $\delta^{13}C$ CO₂ from autotrophic, but not heterotrophic soil respiration[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2012, 50(6):26-32.

(上接第 128 页)