

葡萄农田土壤呼吸时空变异性及其与土壤温湿度的关系

马 婷, 朱高峰, 张 琨, 冯丽丽

兰州大学 西部环境教育部重点实验室, 兰州 730000

摘 要: 2013年7-10月通过对敦煌市南湖乡境内的葡萄种植区有根、无根区域土壤呼吸进行系统观测, 分析该地土壤呼吸的时空变化特征及其与温湿度之间的关系. 结果表明: 葡萄在生长季的各时期土壤呼吸速率的日变化基本为不对称的双峰型曲线, 有根区土壤呼吸速率大于无根区的, 且二者日变化差异明显, 可估算出根呼吸占土壤总呼吸的比例. 在日尺度上, 0 cm土壤温度与土壤呼吸速率相关性较好, 而5 cm土壤温度峰值与土壤呼吸速率峰值之间有位相差, 在无根区二者滞后约3 h, 有根区滞后时间较小. 扩散系数和光合有效辐射显著影响土壤呼吸速率, 是迟滞发生的主要原因. 土壤温湿度对有根、无根区土壤呼吸的影响有差异. 估算葡萄农田土壤呼吸需考虑其距离树干的空间差异性和迟滞现象的影响.

关键词: 土壤呼吸速率; 日变化; 迟滞; 土壤温度; 土壤湿度

中图分类号: X171.59 **文献标识码:** A **文章编号:** 0455-2059(2016)01-0043-08

DOI: 10.13885/j.issn.0455-2059.2016.01.007

Temporal-spatial variation characteristic in grapevine soil respiration and its relationship with the soil temperature and moisture

Ma Ting, Zhu Gao-feng, Zhang Kun, Feng Li-li

Key Laboratory of Western China's Environmental Systems with the Ministry of Education, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

Abstract: We took systematic observation to grapevine soil respiration of the root zone and the free root zone in Nanhu Oasis in Dunhuang City of China from July to October in 2013 and analyzed the characteristics of temporal-spatial variation of the soil respiration and its relationship with the soil temperature and moisture. The results indicated that each period of diurnal variation curve of the soil respiration rate was characterized by asymmetric bimodal curve in the growing season, the soil respiration rate in root zone is faster than that in free root zone and the difference of diurnal variation in two zones is obvious. At the day timescale, the temperate at 0 cm soil layer has a strong correlation with the soil respiration rate. There exists a time difference between the peak of soil respiration rate and 5 cm soil temperature. The peak of the temperature lag 3 hours to that of soil respiration rate of free root zone at 5 cm soil layer, and this lag time is longer than that to root zone. The significant influence of diffusion coefficient and the photosynthetically active radiation to soil respiration is the main reason of hysteresis. The soil temperature and moisture on the root/free root zone soil respiration also have different influence. The distance from the trunk and hysteresis should be considered when estimating grapevine soil respiration.

Key words: soil respiration rate; diurnal variation; hysteresis; soil temperature; soil moisture

收稿日期: 2014-06-27 **修回日期:** 2014-11-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(31370467, 41571016); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(lzujbky-2015-136)

作者简介: 朱高峰(1978-), 男, 山东栖霞人, 副教授, 博士, e-mail: zhugf@lzu.edu.cn, 研究方向为生态水文学, 通信联系人.

土壤碳库是陆地生态系统中最大的碳库, 土壤碳库动态及其驱动机制研究是陆地生态系统碳循环及全球变化研究的重点和热点之一, 也是全球碳计划、全球气候研究计划等一系列全球变化研究计划的核心问题之一^[1-3]. 干旱半干旱区面积约占全球陆地表面面积的1/3, 是陆地生态系统的重要组成部分^[4], 在陆地生态系统碳循环过程中起着非常重要的作用, 因此, 研究其土壤有机碳动态的影响机理对准确评估陆地生态系统碳收支具有重要意义^[5]. 对于干旱半干旱区土壤有机碳的研究中, 绿洲农业占有举足轻重的地位. 由于受自然因素和人为活动(如耕作措施、施肥、灌溉等)的影响较大, 农田土壤呼吸在空间、时间上的变化十分复杂^[6-7]. 因此, 深入开展绿洲土壤有机碳动态的影响机理研究, 可以明确干旱区绿洲农业对土壤碳库演变的特殊作用^[8].

葡萄是干旱区绿洲农田广泛种植的经济果树, 在农业中占有重要地位. 中国西北作为干旱区葡萄的主产区, 近些年来种植面积不断增长^[9], 并且在干旱区气候条件下, 葡萄生长具有特有的生理生态过程, 对当地大气碳库起着重要作用^[10]. 然而, 目前已有的干旱区农田土壤有机碳的研究主要集中在玉米、棉花等作物上^[11-12], 对葡萄的研究相对较少. 鉴于此, 本研究对敦煌无核白葡萄种植地土壤呼吸进行实地观测, 利用观测数据, 研究该地土壤呼吸的时空差异性以及土壤温湿度对土壤呼吸的影响, 以期为干旱区绿洲农田土壤碳通量变化规律提供理论依据, 为农田生态系统土壤有机碳库动态预测模拟与调控提供参考.

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

研究区位于甘肃省敦煌市西南70 km的南湖乡(94.06~94.09°E, 39.51~39.55°N), 海拔1 139 m, 总面积达11.06 km², 气候属于温带干旱性气候, 全年降水稀少, 年均降水量39.9 mm, 蒸发量2 486 mm. 区内水源自祁连山北麓西段的党河水库渗漏补给, 农业生产用水依靠灌溉, 属于典型的绿洲灌溉农业区. 日温差较大, 极端最高温40.4 °C, 极端最低温-30.5 °C, 年均温度9.3 °C. 光照充足, 全年日照时数3 115~3 247 h, 年总辐射量5 903~6 309 MW/m², 土壤类型以灰棕漠土、棕漠土、风沙土、盐土为主^[13].

实验区内种植适宜该地气候条件的多年生无核白葡萄, 葡萄架高2.5 m, 平均胸径为3.5 cm, 南

北行向, 每行葡萄株之间间距不定(<1 m), 行距为3 m. 该种的生长季为5-9月, 约140 d, 4月底萌芽, 5月底开花, 6-7月中旬结果, 7月底-8月成熟, 9月开始采摘. 栽培管理措施均为4月下旬-5月上旬定植, 7月下旬-8月中旬摘心、打副梢等整形处理, 10月初埋土. 30 d左右漫灌溉1次, 实验期间7月20日和8月17日进行了2次灌溉, 8月26日发生降雨事件, 降雨量为3.55 mm. 在灌溉的同时施入1.33~2.33 kg/hm²尿素、磷酸二铵或硫酸钾型复合肥. 实验区土壤为多砾质沙土, 土壤pH值为8.6, 土壤有机质质量分数为9.15 g/kg, 全氮质量分数为0.59 g/kg, 有效磷、速效钾质量分数分别为11.62、98.53 mg/kg^[14].

1.2 实验设计与布 设

核心研究区在南湖乡西南部, 样地大小为52 m×43 m. 采用美国LI-COR公司生产的LI-8100A 开路式土壤通量测量系统及LI-8150多路器测量葡萄生长期(7-10月)的土壤呼吸作用. 在LI-8150多路器上接4个长期测量室(基座为内径21.34 cm, 高11.43 cm的PVC土壤环), 进行区分有根、无根区域土壤呼吸的连续观测实验. 具体方法是: 在葡萄树行间隔内(3 m), 距葡萄主干约0.5 m和1.5 m处各设置2个0.6 m×0.6 m样方, 且将距葡萄主干1.5 m处样方深挖至1 m(葡萄根深约为0.8 m^[15]), 移除土内根系, 并在所挖长方体样方内环四面放入筛网, 把土填回原处, 3周后放置长期测量室进行测量. 测量前1 d将PVC环嵌入土壤内, 除去土壤表面杂草. 测量为全天24 h连续观测, 每30 min记录一次. 应用与LI-8100配套的土壤温湿度传感器同步测定土壤表层下5 cm处的土壤温度和湿度. 光合有效辐射数据由研究区内4 m高的小型气象观测站获得, 同时用土壤温湿度传感器观测0、5、10、20 cm处的土壤温湿度.

1.3 数据处理

由于数据部分缺失, 故取生长季7月13-20日, 8月21-27日, 9月28日-10月4日(分别处于葡萄结果期、成熟期和采摘期)3段连续数据进行分析. 将有根、无根区2个观测点的平均值作为实测数据. 用MATLAB软件进行绘图和数据拟合分析.

2 结果与分析

2.1 不同时期葡萄有根、无根区土壤呼吸速率日变化

将葡萄生长季3个不同时段7 d无根、有根区

土壤呼吸速率数据进行平均,做出日变化曲线图(图1).由图1可以看出二者存在明显的日变化规律且差异明显.

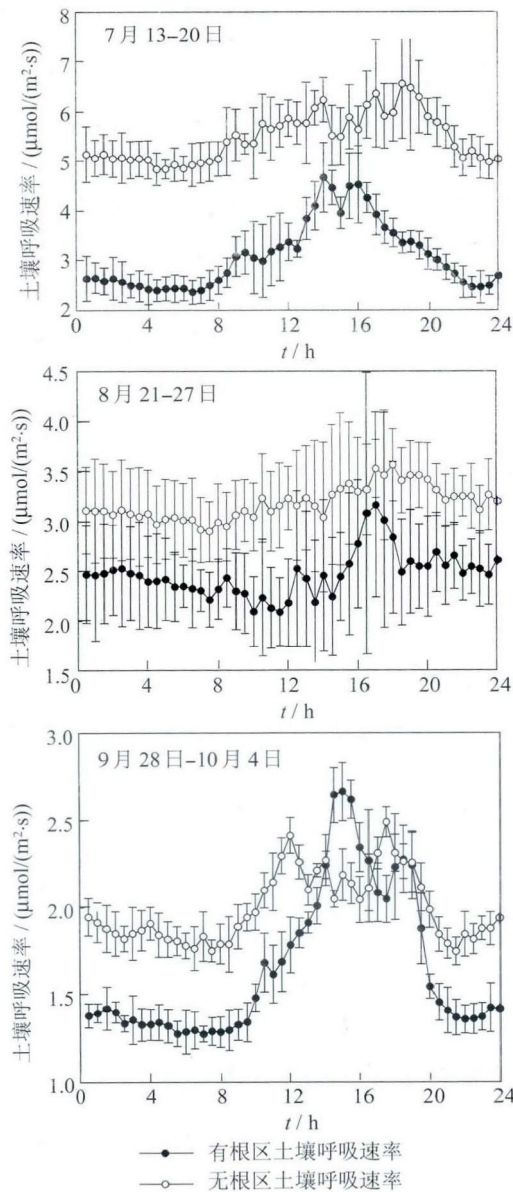


图1 不同时期土壤呼吸速率日变化特征

Fig.1 Diurnal variations of soil respiration rate for different time.

不同时段无根、有根区土壤呼吸速率日变化基本呈不对称双峰曲线,无根区土壤呼吸速率最大值出现在14:00-18:00,有根区土壤呼吸速率最大值出现在12:00-20:00,最小值都出现在7:00,且峰值过后的土壤呼吸速率大于峰值前.结果期内7 d(7月13-20日),无根区土壤呼吸速率日平均值为3.1 μmol/(m²·s),有根区土壤呼吸速率日平均值为5.5 μmol/(m²·s),根呼吸约占有根区土壤呼吸速率的43%,有根区土壤呼吸速率远大于无根区土壤呼吸速率;成熟期内7 d(8月21-27日),无根区土壤

呼吸速率日平均值为2.5 μmol/(m²·s),有根区土壤呼吸速率日平均值为3.2 μmol/(m²·s),根呼吸约占有根区土壤呼吸速率的21%.土壤呼吸速率日变化不大,因为该时段内天气状况为阴天且在8月26日发生降雨事件,土壤温度的日变化及光合有效辐射均较小.采摘期内7 d(9月28日-10月4日),无根区土壤呼吸速率日平均值为1.7 μmol/(m²·s),有根区土壤呼吸速率日平均值为2.0 μmol/(m²·s),根呼吸约占有根区土壤呼吸速率的15%,在15:00左右由于有根区土壤呼吸速率波动下降,无根区土壤呼吸速率高于有根区土壤呼吸速率.

2.2 无根、有根区土壤呼吸特征与环境因子的关系

土壤温湿度对土壤呼吸有重要影响,研究表明干旱区表层土壤温湿度有明显的季节变化^[6].将0、5、10、20 cm土壤温湿度与土壤呼吸速率做相关性分析,发现0、5 cm土壤温湿度与土壤呼吸速率相关性较好,故取0、5 cm土壤温湿度进行数据分析.3个时期5 cm土壤含水量变化范围:成熟期(22%~28%)>结果期(16%~19%)>采摘期(8%~9%)且日变化很小,说明土壤含水量不是影响土壤呼吸速率日变化的主要原因.由图2可知:0 cm处土壤温度的日变化最大值出现在16:00左右,最小值出现在8:00左右,无根区土壤呼吸速率与0 cm处土壤温度日变化趋势基本一致.5 cm处土壤温度日变化波动不大,最大值出现在17:00左右,最小值在9:00左右.0 cm处土壤温度峰值比无根区土壤呼吸速率峰值滞后约3 h,而与有根区土壤呼吸速率峰值之间的滞后不明显.

图3中土壤呼吸速率与5 cm处土壤温度日变化的散点图表现为顺时针环状,从左下角到右上角顺时针方向(7:00-16:00)为温度上升时段,从右上角至左下角顺时针方向(16:00-次日7:00)为温度下降时段.5 cm处土壤温度最大值与土壤呼吸速率最大值之间的连线(图3a中黑色直线)即为迟滞时间大小.无根区土壤呼吸速率与5 cm处土壤温度的关系曲线斜率大于有根区土壤呼吸速率与5 cm处土壤温度的关系曲线的斜率,说明在日尺度上无根区土壤呼吸速率对5 cm处土壤温度变化较有根区土壤呼吸速率敏感.迟滞环的大小与土壤呼吸速率变化幅度和迟滞时间有关,而与土壤呼吸速率的大小无关.土壤呼吸速率日变化幅度越大,迟滞时间越长,迟滞环越明显.图3中无根区迟滞现象较有根区明显,这与无根区土壤呼吸速率日变化波动幅度较大有关.同理,由于8月21-

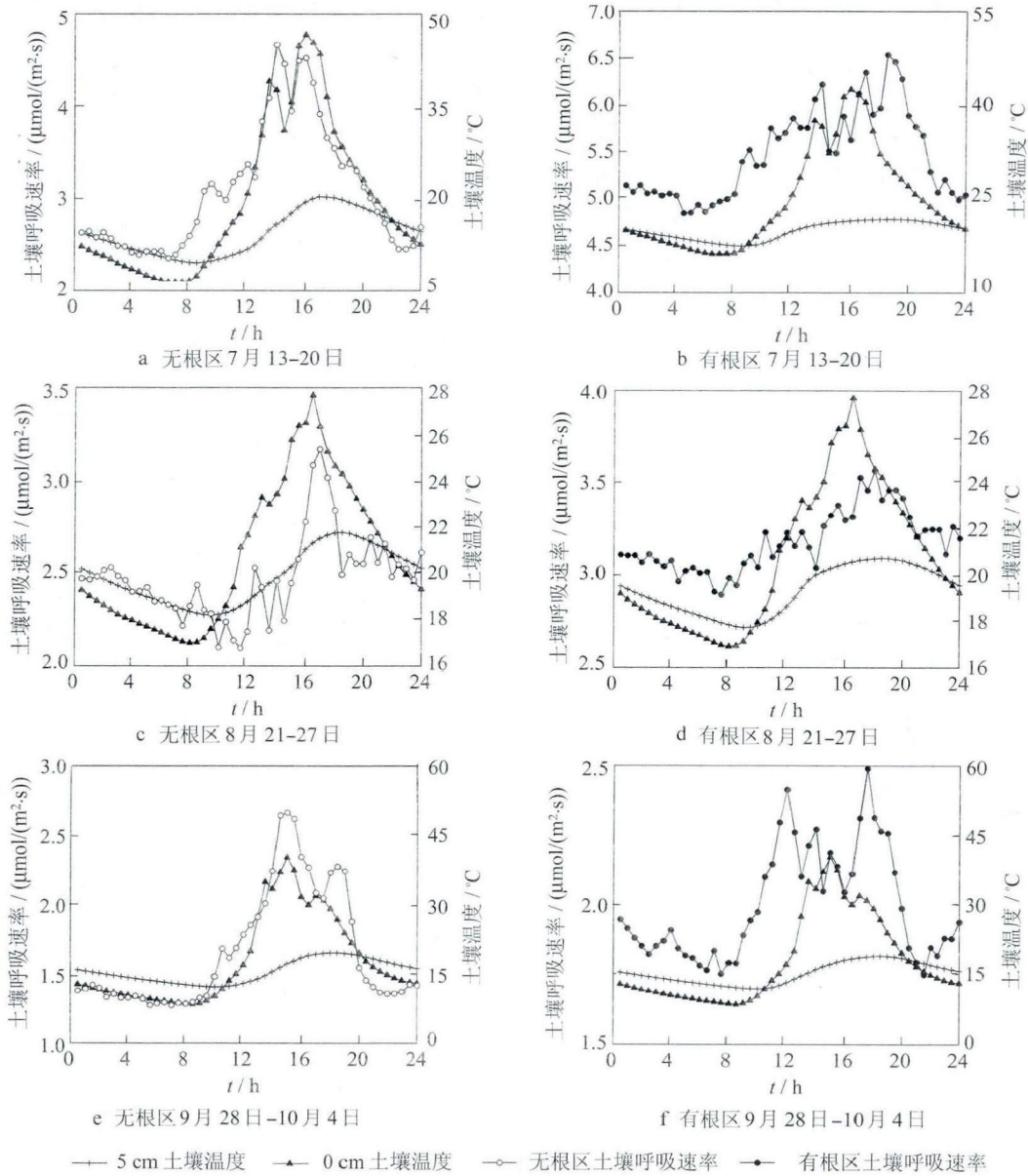


图2 不同时期土壤呼吸速率与土壤温度的日变化关系

Fig.2 Diurnal variations of soil respiration rate and soil temperature for different periods.

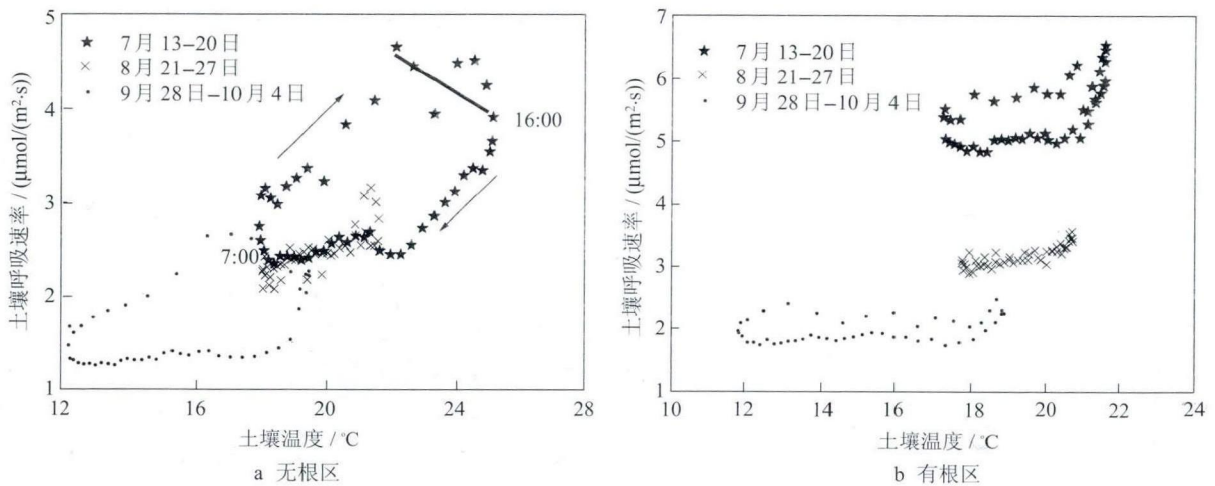


图3 不同时期土壤呼吸速率与5 cm处土壤温度的关系

Fig.3 Diurnal variations of soil respiration rate and soil temperature at 5 cm for different periods

27日土壤呼吸速率日变化波动幅度很小,故基本无迟滞现象出现。

梯度法、同位素法或温度控制等^[17-18]研究表明土壤呼吸速率与光合有效辐射密切相关(图4)。3个时段内光合有效辐射:结果期>采摘期>成熟期。无

根区土壤呼吸速率与光合有效辐射相关性较好,二者变化趋势基本一致;而在有根区,当光合有效辐射在14:00左右达到最大时,土壤呼吸速率却呈波动下降趋势,在光合有效辐射峰值过后,土壤呼吸速率又有所回升,这与光抑制现象有关^[19-20]。

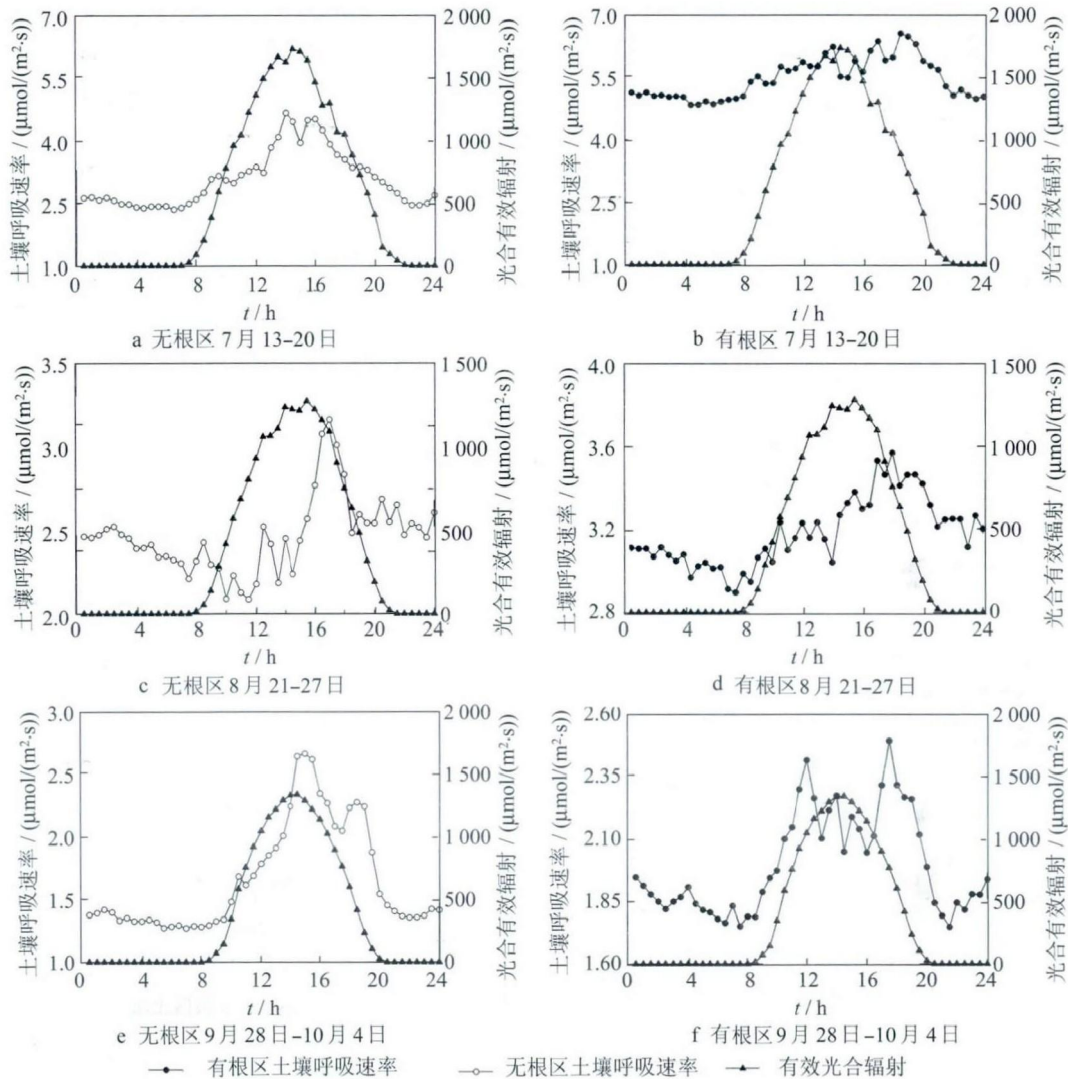


图4 不同时段土壤呼吸速率与光合有效辐射日变化关系

Fig.4 Diurnal variations of soil respiration rate and photosynthetic active radiation for different periods

2.3 有根、无根区土壤呼吸速率季节变化模拟

为定量研究葡萄生长季水热因子在土壤呼吸中的贡献,用与LI-8100同步测得的地下5 cm处土壤温湿度与土壤呼吸速率进行回归分析.首先用温度或湿度的单因子模型对无根、有根区土壤呼吸速率进行回归分析($n=1\ 008$),结果如下:

- SR=-1.222+0.192T_s, R²=0.55, (1)
- SR=0.021T_s^{1.601}, R²=0.56, (2)
- SR=0.492e^{0.082T_s}, R²=0.57, (3)
- SR=-3.034+0.364T_s, R²=0.43, (4)
- SR=0.006T_s^{2.714}, R²=0.46, (5)

- SR=0.370e^{0.122T_s}, R²=0.48, (6)
- SR=1.488+0.049W_s, R²=0.19, (7)
- SR=-1.743+0.491W_s-0.012W_s², R²=0.54, (8)
- SR=1.706e^{0.018W_s}, R²=0.17, (9)
- SR=2.344+0.073W_s, R²=0.10, (10)
- SR=-6.717+1.389W_s-0.040W_s², R²=0.87, (11)
- SR=2.713e^{0.016W_s}, R²=0.08, (12)

其中,SR为土壤呼吸速率,T_s为5 cm处土壤温度,W_s为5 cm处土壤湿度.(1)~(3)式分别为无根区土壤呼吸速率与5 cm土壤温度之间线性模型、乘幂模型、指数模型的拟合,(4)~(6)式分别为有根区土壤呼吸速率与5 cm土壤温度之间线性模

型、乘幂模型、指数模型的拟合, (7)~(9) 式分别为无根区土壤呼吸速率与 5 cm 土壤湿度之间线性模型、多项式模型、指数模型的拟合, (10)~(12) 式分别为有根区土壤呼吸速率与 5 cm 土壤湿度之间线性模型、多项式模型、指数模型的拟合。

温度模型中, 幂函数模型对土壤呼吸季节变化拟合效果最优, 可分别解释无根、有根区土壤呼吸速率变化情况的 57%、48%, 无根区拟合效果优于有根区; 在湿度模型中, 二次曲线对土壤呼吸速率变化情况拟合效果最好, 可分别解释无根、有根区土壤呼吸速率季节变化情况的 54%、87%, 这可能是模型中对水分二次曲线的拟合考虑到干湿情况下土壤呼吸可能的响应特征, 且在二次模型中有根区土壤呼吸速率的拟合优度判定系数 R^2 远高于无根区土壤呼吸速率的。无根区温度拟合效果优于湿度拟合效果, 说明温度是影响无根区土壤呼吸速率季节变化的主要原因; 而有根区则相反, 湿度是影响有根区土壤呼吸速率季节变化的主要因子。

3 讨论

3.1 不同时期葡萄有根、无根区土壤呼吸速率日变化规律

通过对敦煌市南湖乡的葡萄地内土壤呼吸速率的研究发现, 其日变化特征呈不对称双峰曲线, 土壤呼吸速率最大值出现之后变化并非单一减少, 而是有所回升, 峰值过后的土壤呼吸速率大于峰值前。黄湘等^[21]在胡杨群落中的研究也得出相似的结论, 但与许多研究者的结果略有差异^[22-23], 这与地理位置、土壤类型、植被类型等有关。

根呼吸是有植物生长的生态系统中土壤呼吸的主要部分, 由于试验水平、植被种类、生态系统类型等因素的差异, 各研究者所采用的方法及所计算的根际呼吸比例也存在一定的差异^[24]。本研究用间隙法区分根呼吸, 结果表明根呼吸对总土壤呼吸的贡献随时间而改变, 变化范围为 15%~43%。Kuzyakov 等^[25]进行文献调研后认为平均而言, 农田生态系统中根呼吸对土壤呼吸的贡献为 5%~48%, 本研究结果在此范围内。张雪松等^[10]得到 4~5 月华北平原冬麦田的根呼吸对土壤总呼吸的贡献为 32%~45%。李虎等^[24]估算 6~10 月黄淮海平原玉米根际呼吸对土壤呼吸的贡献率为 91%~95%, 棉花和冬小麦根际呼吸对土壤呼吸的贡献率分别约为 70%、80%。根呼吸的变化与自身生长或维持生命活动所需要的能量的多少有关, 本研究与已有研

究资料对比, 生长季根呼吸对土壤总呼吸贡献略低。由于根呼吸作用不仅与葡萄自身的生理生长阶段和活性有关, 而且与环境因素、土壤的水分条件有内在联系^[26], 在观测期间午后有根区土壤呼吸速率有所下降、成熟期和采摘期土壤含水量过高或者过低, 都影响了根呼吸的大小。较短时间段内根呼吸占土壤呼吸的比例, 还不能清楚地认识葡萄根呼吸在整个生长季的动态变化。

3.2 无根、有根区土壤呼吸特征与环境因子的关系

在日变化尺度上, 无根、有根区 5 cm 处土壤温度峰值都在土壤呼吸速率峰值之后即出现迟滞现象, 土壤呼吸与 5 cm 处土壤温度的关系呈现顺时针方向的环状, 同样的现象也在其他地区观测到, 但迟滞方向有差异。Riveros 等^[27]研究认为土壤呼吸速率受光合有效辐射影响大的地区迟滞方向为顺时针, 但 Phillips 等^[28]认为迟滞环方向与测量土壤温度的深度有关, 在 10 cm 及以下土层中, 受热扩散和气体扩散系数等物理过程影响土壤呼吸速率峰值滞后与土壤温度峰值, 迟滞环方向为逆时针。

对迟滞产生的原因有许多解释, 主要的解释因子包括温度、湿度、有效光合辐射和微生物等环境因子和热扩散、气体扩散率等物理过程^[28-31]。本研究两个湿度不同的阶段 (7 月 13~20 日, 9 月 28 日~10 月 4 日) 都出现明显迟滞现象, 表明迟滞与土壤水分关系不大^[32]。无根区土壤呼吸速率与 0 cm 处土壤温度日变化规律一致而与 5 cm 处土壤温度出现迟滞现象, 是因为土壤呼吸产生的深度与所测量土壤温度的深度不匹配^[33], 也即受热扩散和气体扩散系数等物理过程影响。在无根区 0 cm 处土壤温度与土壤呼吸速率变化趋势一致, 由于扩散系数的影响, 0 cm 处土壤温度日变化曲线较 5 cm 处土壤温度先到达峰值, 无根区土壤呼吸速率与 5 cm 处土壤温度之间发生迟滞现象 (7 月 13~20 日, 9 月 28 日~10 月 4 日)。当 0 cm 处土壤温度日变化曲线变幅较小时, 受土壤温度影响土壤呼吸速率变得相应平缓, 迟滞现象不明显 (8 月 21~27 日)。如果迟滞现象仅受物理过程控制, 那么无根、有根区土壤呼吸速率峰值出现的时间一致, 只有大小不一致^[34], 在同一温度下土壤呼吸速率不同, 说明除温度以外其他因素也影响土壤呼吸速率的日变化, 这可能与光合有效辐射或微生物动态有关^[35]。在有根区, 光合有效辐射达到最大值时, 叶片吸收光能过多, 不能及时有效地加以利用或耗散, 引起光合能力降低, 发生光合作用的光抑制^[36], 土壤呼吸

速率有波动下降的趋势,土壤呼吸速率变幅减小,导致有根区迟滞现象不明显.8月21-27日有根区光合有效辐射较小,无根区土壤呼吸速率变化不大,基本无迟滞现象出现.此外,没有发现光合有效辐射与有根区土壤呼吸速率之间,由于叶子中产生的光合产物经韧皮部运输到根部,从而出现十几个小时甚至几天的迟滞现象^[37-38],而是土壤呼吸速率快速响应光合有效辐射变化,这与Thompson等^[39]的研究结果基本一致.

3.3 有根、无根区土壤呼吸速率季节变化模拟

本研究用5 cm处的土壤温湿度与土壤呼吸速率做回归性分析.在单因子模型中,无根区土壤温度对土壤呼吸拟合效果较好,即无根区土壤呼吸速率季节变化主要受温度变化的影响,而有根区土壤湿度拟合效果优于土壤温度,说明有根区土壤呼吸速率季节变化主要受土壤含水量变化影响.在湿度模型中,二次曲线模型拟合效果远优于其他模型,张红星等^[40]认为在干湿交替下二次曲线可以解释土壤呼吸速率与土壤湿度之间的关系,原因是土壤湿度在季节尺度上是影响土壤呼吸的关键因子,当土壤处于相对缺水状态时,土壤湿度的增加促进土壤呼吸;当土壤湿度超过某个范围时,土壤水分填充了土壤空隙,使土壤微生物缺氧,同时阻碍CO₂的释放^[41],即土壤湿度对土壤呼吸有双向调节作用^[42].本研究发现二次曲线模型对有根区土壤呼吸速率拟合效果比无根区土壤呼吸速率更好,可能与有根区土壤呼吸产生的深度与无根区不同有关^[44].因此需对有根、无根区土壤呼吸对不同深度土壤含水量的响应做进一步研究.双因子模型比单因子模拟能解释更多的土壤呼吸的时间变化且 $SR = ae^{bt} (c+dW_s + eW_s^2)$ 拟合效果最好,是因为此模型既体现了土壤呼吸速率随温度的正向指数变化,又体现了土壤水分对土壤呼吸的双向调节作用.

参考文献

- [1] Raich J W, Tufekcioclu A. Vegetation and soil respiration: correlations and controls[J]. Biogeochemistry, 2000, 48(1): 71-90.
- [2] 苏培玺,周紫鹃,张海娜,等.荒漠植物沙拐枣群体光合作用及土壤呼吸研究[J].北京林业大学学报,2013,35(3): 56-63.
- [3] 周海莲,孙刚,张凯,等.合肥市森林土壤呼吸特点及其影响因子[J].安徽农业大学学报,2009,36(3): 393-396.
- [4] Nakane K, Yamamoto M, Tsubota H. Estimation of root respiration rate in a mature forest ecosystem[J]. Japanese Journal of Ecology, 1983, 33: 397-408.
- [5] 金琳,李玉娥,高清,等.中国农田管理土壤碳汇估算[J].中国农业科学,2008,41(3): 734-743.
- [6] 林而达.气候变化与农业可持续发展[M].北京:科学出版社,2001.
- [7] Martens D A. Plant residue biochemistry regulates soil carbon soil carbon sequestration[J]. Soil Biochemistry, 2000, 32(3): 361-369.
- [8] 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(3): 719-733.
- [9] 刘爽,严昌荣,何文清,等.不同耕作措施下旱地农田土壤呼吸及其影响因素[J].生态学报,2010,30(11): 2914-2919.
- [10] 张雪松,申双和,谢轶嵩,等.华北平原冬麦田根呼吸对土壤总呼吸的贡献[J].中国农业气象,2009,30(3): 289-296.
- [11] 李志国,张润花,赖冬梅,等.膜下滴灌对新疆棉田生态系统净初级生产力、土壤异氧呼吸和CO₂净交换通量的影响[J].应用生态学报,2012,23(4): 1018-1022.
- [12] 韩广轩,周广胜,许振柱.玉米生长季土壤呼吸的时间变异性及其影响因素[J].生态学杂志,2008,27(10): 1698-1705.
- [13] 李亮.土壤-地下水系统对天然植被生长的影响研究:以敦煌盆地为例[D].武汉:中国地质大学环境学院,2013: 1-137.
- [14] 曹文亮,贺生兵,潘晓艳,等.敦煌市耕地养分聚类分析[J].甘肃农业科技,2013(2): 3-5.
- [15] 周青云,王仰仁,孙书洪,等.根系分区交替滴灌条件下葡萄根系分布特征及生长动态[J].农业机械学报,2011,42(9): 59-63.
- [16] 张婕,张文煌,王晓妍,等.半干旱地区土壤湿度变化特征[J].兰州大学学报:自然科学版,2012,48(2): 57-61.
- [17] Carbone M S, Trumbore S E. Contribution of new photosynthetic assimilates to respiration by perennial grasses and shrubs: residence times and allocation patterns[J]. New Phytologist, 2007, 176(1): 124-135.
- [18] Barbour M M, Hunt J E, Dungan R J, et al. Variation in the degree of coupling between delta C-13 of phloem sap and ecosystem respiration in two mature nothofagus forests[J]. New Phytologist, 2005, 166(2): 497-512.
- [19] Demmig A B, Adams W W. Photoprotection and other responses of plant to high light stress[J]. Annual Review of Plant Molecular Biology, 1994, 43: 599-626.
- [20] 王建林,齐华,房全孝,等.水稻、大豆、玉米光合速率的日变化及其对光强响应的滞后效应[J].华北农学报,2007,22(2): 119-124.
- [21] 黄湘,李卫红,陈亚宁,等.塔里木河下游荒漠河岸林群落土壤呼吸及其影响因子[J].生态学报,2007,27(5): 1951-1958.

- [22] 胡进耀, 吴庆贵, 杨冬生, 等. 巴山水青冈林生态系统土壤呼吸作用及其与温度的关系[J]. 水土保持学报, 2009, 23(2): 244-248.
- [23] 刘合满, 曹丽花, 马和平. 土壤呼吸日动态特征及其与大气温度、湿度的响应[J]. 水土保持学报, 2013, 27(1): 193-202.
- [24] 李虎, 邱建军, 王立刚. 农田土壤呼吸特征及根呼吸贡献的模拟分析[J]. 农业工程学报, 2008, 24(4): 14-20.
- [25] Kuzyakov Y, Larionova A A. Root and rhizomicrobial respiration: a review of approaches to estimate respiration by autotrophic and heterotrophic organisms in soil[J]. *Journal Plant Nutrition and Soil Science*, 2005, 168(4): 503-520.
- [26] Lee M S, Nakane K, Nakatsubo T, et al. Seasonal changes in the contribution of root respiration to total soil respiration in a cool temperate deciduous forest[J]. *Plant and Soil*, 2003, 255(1): 311-318.
- [27] Riveros D A, Emanuel R E, Muth D J, et al. Diurnal hysteresis between soil CO₂ and soil temperature is controlled by soil water content[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(17): 1-5.
- [28] Phillips C L, Nickerson N, Risk D, et al. Interpreting diel hysteresis between soil respiration and temperature[J]. *Global Change Biology*, 2011, 17(1): 515-527.
- [29] Tang J, Baldocchi D D, Xu L. Tree photosynthesis modulates soil respiration on a diurnal time scale[J]. *Global Change Biology*, 2005, 11(8): 1298-1304.
- [30] Jia Xin, Zha Tian-shan, Wu Bin, et al. Temperature response of soil respiration in a Chinese pine plantation: hysteresis and seasonal vs. diel Q₁₀[J]. *PloS One*, 2013, 8(2): 1-9.
- [31] Wang B, Zha Tian-shan, Jia Xin, et al. Soil moisture modifies the response of soil respiration to temperature in a desert shrub ecosystem[J]. *Biogeosciences*, 2014, 11(2): 259-268.
- [32] Oikawa P Y, Grantz D A, Chatterjee A, et al. Unifying soil respiration pulses, inhibition, and temperature hysteresis through dynamics of labile soil carbon and O₂[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2014, 119(4): 521-536.
- [33] Parkin T B, Kaspar T C. Temperature controls on diurnal carbon dioxide flux: implications for estimating soil carbon loss[J]. *Soil Science Society of America*, 2003, 67(6): 1763-1772.
- [34] Savage K, Davidson E A, Tang J. Diel patterns of autotrophic and heterotrophic respiration among phenological stages[J]. *Global Change Biology*, 2013, 19(4): 1151-1159.
- [35] Martin J G, Phillips C L, Schmidt A, et al. High-frequency analysis of the complex linkage between soil CO₂ fluxes, photosynthesis and environmental variables[J]. *Tree Physiol*, 2012, 32(1): 49-64.
- [36] 贾虎森, 李德全, 韩亚琴. 高等植物光合作用的光抑制研究进展[J]. *植物学通报*, 2000, 17(3): 218-224.
- [37] Kuzyakov Y, Gavrichkova O. Time lag between photosynthesis and carbon dioxide efflux from soil: a review of mechanisms and controls[J]. *Global Change Biology*, 2010, 16(12): 3386-3406.
- [38] Vargas R, Baldocchi D D, Allen M F, et al. Looking deeper into the soil: biophysical controls and seasonal lags of soil CO₂ production and efflux[J]. *Ecological Applications*, 2010, 20(6): 1569-1582.
- [39] Thompson M V, Holbrook N M. Scaling phloem transport: information transmission[J]. *Plant Cell and Environment*, 2004, 27(4): 509-519.
- [40] 张红星, 王效科, 冯宗炜, 等. 黄土高原小麦田土壤呼吸对强降雨的响应[J]. *生态学报*, 2008, 28(12): 6189-6196.
- [41] Bouma T J, Bryla D R. On the assessment of root and soil respiration for soils of different texture: interactions with soil moisture contents and soil CO₂ concentrations[J]. *Plant and Soil*, 2000, 227(1/2): 215-221.
- [42] Wang Miao, Li Qiu-rong, Xiao Dong-mei, et al. Effects of soil temperature and moisture on soil respiration in different forest types in Changbai Mountain[J]. *Journal of Forestry Research*, 2004, 15(2): 113-118.

(责任编辑: 王春燕)