

郑永红,张治国,胡友彪,等.煤矿复垦重构土壤呼吸季节变化特征及其环境影响因子[J].煤炭学报,2014,39(11):2300-2306. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2014.0862

Zheng Yonghong, Zhang Zhiguo, Hu Youbiao, et al. Seasonal variation of soil respiration and its environmental effect factors on refactoring soil in coal mine reclamation area [J]. Journal of China Coal Society 2014, 39(11): 2300-2306. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2014.0862

煤矿复垦重构土壤呼吸季节变化特征及其环境影响因子

郑永红¹ 张治国^{1,2} 胡友彪¹ 姚多喜¹ 陈孝杨¹

(1. 安徽理工大学 地球与环境学院,安徽 淮南 232001; 2. 安徽理工大学 安徽省矿山地质灾害防治重点实验室 安徽 淮南 232001)

摘要:为了研究采煤沉陷地复垦生态系统土壤呼吸季节特征,探讨各主要环境影响因子对土壤呼吸的影响,利用 Li-8100A 自动土壤碳通量系统,测定潘一矿复垦区不同季节土壤呼吸速率,同时测定土壤温度、大气温度等环境影响因子。结果表明:①在季节尺度上土壤温度(10 cm)、大气温度和土壤含水率(10 cm)与土壤呼吸速率呈显著正相关。②土壤呼吸速率在日间呈单峰曲线型变化,土壤呼吸速率观测最大值出现在 12:00—14:00,观测最小值出现在 8:00 和 18:00 两个时间点。土壤呼吸速率均表现出明显的季节变化特征,不同季节具有显著差异。与正常农田观测点数据对比知,大气温度和相对湿度差异不大,土壤呼吸速率、土壤温度和土壤含水率平均值略高于复垦区土壤观测点数据。③潘一矿复垦区重构土壤呼吸的 Q_{10} 值为 1.94,低于暖温带 Q_{10} 平均值,低于中国土壤呼吸 Q_{10} 平均值和农田生态系统的 Q_{10} 平均值。研究结果初步阐明煤矿复垦区重构土壤呼吸的季节变化特征。

关键词:复垦区; 重构土壤; 土壤呼吸; 温度敏感值

中图分类号:TD88; S15 文献标志码:A 文章编号:0253-9993(2014)11-2300-07

Seasonal variation of soil respiration and its environmental effect factors on refactoring soil in coal mine reclamation area

ZHENG Yong-hong¹ ZHANG Zhi-guo^{1,2} HU You-biao¹ YAO Duo-xi¹ CHEN Xiao-yang¹

(1. School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 2. Key Laboratory of Mine Geological Hazard and Control, Anhui Province, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: In order to study the seasonal variation of soil respiration in the reclamation ecosystem of coal-mining subsidence and explore the effects of major environmental factors on soil respiration, the soil respiration was measured by using Li-8100A automated soil CO₂ flux system in reclamation area of Panyi Coal Mine continuously from January to October in 2012, and environment factors such as soil temperature and atmospheric temperature were also measured at the same time. The results showed that the soil temperature (10 cm), atmospheric temperature and soil moisture content (10 cm) on seasonal change scale are positively correlated with soil respiration rate. Soil respiration rate shows unimodal curve type change in the daytime, the maximum occurs between 12:00 and 14:00, while minimum appear at 8:00 and 18:00. The soil respiration rate shows obvious seasonal variation, and different season exhibit significant differences. Compared with normal farmland soil, there is no striking difference between atmospheric temperature and

收稿日期:2014-07-02 责任编辑:王婉洁

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51274013);安徽省高校省级优秀人才基金重点资助项目(2013SQRL028ZD);安徽理工大学第四批中青年学术骨干资助项目

作者简介:郑永红(1979—),女,新疆乌鲁木齐人,讲师,博士研究生。E-mail: zyhaust@163.com

relative humidity. The averages with soil respiration rate, soil temperature and soil moisture content is slightly higher than observation point data in reclamation area soil. The Q_{10} value of soil respiration is 1.94 in Panyi Coal Mine reclamation area, which is lower than the average value of Q_{10} in warm temperate zone terrestrial ecosystem of China and farmland ecosystem. The research preliminarily results illustrate seasonal variation characteristics of refactoring soil respiration in reclamation area.

Key words: reclamation area; refactoring soil; soil respiration; sensitivity of temperature

土壤是陆地生态系统最大的碳库, 土壤碳库是大气碳库的 4 倍, 因此其微小变化就能严重改变大气 CO_2 浓度的平衡, 从而对全球气候产生较大影响^[1-3]。土壤呼吸作为土壤碳库的主要输出途径和大气 CO_2 的重要来源, 在调控地球系统的大气 CO_2 浓度和气候动态变化起着十分关键的作用。随着全球气候变暖趋势的逐渐明显, 陆地系统碳储量和碳通量的研究已成为国际环境领域的一个热点和重要内容之一。

淮南矿区煤矿开采已有百年历史, 煤矿开采造成了大量土地沉陷, 预计 2020 年土地沉陷面积将达到 100.37 km^2 。淮南矿区利用煤矸石填充沉陷地已有几十年历史, 主要集中在李郢孜矿区、新庄孜矿区和潘谢矿区等, 在采煤沉陷区综合治理方面取得了一定成效^[4]。然而, 人为对沉陷区进行复垦土壤重构^[5], 由于施工过程的机械碾压和扰动, 破坏了土壤原始结构和剖面层次。重构后的土壤质量发生较大变化, 土壤的生产力很难达到之前或耕作土壤水平^[6]。

目前, 国内外对土壤呼吸的研究主要集中在森林^[7-10]、草地^[11-13]、湿地和农田^[14-17]等生态系统的研究, 针对采煤沉陷地复垦生态系统土壤呼吸研究的文献相对较少, 主要集中于徐州、山西和淮南矿区^[18-20]。缺乏对复垦重构土壤呼吸及其影响因子的系统研究。本文选择采煤沉陷区复垦土壤生态系统为研究对象, 重点研究其土壤表面 CO_2 排放量日际及季节变化特点, 探讨各主要影响因子对土壤呼吸的影响强度, 建立小尺度模型。

1 研究区概况

潘一矿复垦区位于潘一矿东侧约 1.0 km 处 (116.83°E 32.78°N), 属暖温带半湿润大陆性季风气候区, 年平均气温 15.3°C , 年平均降雨量 932 mm , 6—9 月降雨量占全年降雨量的 55%。春季次之, 秋季较少, 冬季最少。复垦区土壤类型为砂姜黄土, 成土母质为黄土性古河流沉积物^[4]。

2005 年淮南矿业集团实施了潘一矿矿山地质环境治理工程, 采用剥离表土, 回填煤矸石, 上覆黏土工艺, 治理沉陷地 37.96 hm^2 。该工程平均覆土厚度达

100 cm 。2006 年 12 月工程结束^[21]。复垦土地主要用做人工林地, 未实施施肥等农耕行为, 人为扰动相对较少。土壤理化特性及重金属特征已在先前的报道有详尽描述^[4, 6, 21]。

2 材料与方法

2.1 观测点设置

选择潘一矿煤矸石山北侧复垦区为研究区域, 研究区内随机选取 5 个 $1.0 \text{ m} \times 1.0 \text{ m}$ 的观测点。在每个观测点埋设高 10 cm 、内径为 20 cm 的 PVC 土壤环。每个土壤环埋深为 $5 \sim 8 \text{ cm}$, 高出地面 $2 \sim 3 \text{ cm}$ 。在观测的前 1 d, 清除每个观测点土壤环内土壤表层凋落物和植被, 经过 24 h 的平衡后, 土壤呼吸速率会恢复到土壤环放置前的水平, 从而尽可能避免由于安置气室对土壤扰动而造成的短期内呼吸速率的波动。以后的观测在固定土壤环上进行。

另外, 选取潘一矿复垦区附近未受煤矿开采活动的正常农田作为对照点, 进行对比分析。

2.2 土壤呼吸速率的测定

于 2012 年冬季 (1 月 5 日)、春季 (4 月 11 日)、夏季 (7 月 22 日) 和秋季 (10 月 23 日), 选择晴朗无风天气, 利用 Li-8100A 自动土壤碳通量系统, 从 8:00—18:00 每隔 2 h 记录各观测点土壤呼吸速率日变化, 每个观测点测定重复 3 次。

2.3 环境因子的测定

在测定土壤呼吸速率的同时, 利用 Li-8100A 自动土壤碳通量系统自带 EC-5 土壤水分传感器和 E 型热电偶土壤温度探头, 插入地表 10 cm 处, 记录该处土壤温度和湿度。地表空气温度及相对湿度用 TES-1361C 手持式温湿度计记录。

2.4 数据处理与统计分析

原始数据利用 SPSS17.0 软件进行统计分析, 图件用 Origin8.0 软件制图。

3 结果与分析

3.1 环境因子的季节动态变化

由表 1 可以看出, 土壤温度日变化最小值为 2.01°C , 出现在冬季 (1 月 5 日) 8:00。土壤温度日

变化最大值为 30.72 ℃,出现在夏季(7月22日)14:00。土壤含水率在不同季节间差异较大,集中在 23.16%~38.38%,日变化最大值出现在春季

(4月11日)这与本年度该区域春季降雨量较大有关。夏季由于气温高和蒸发强度大的原因,土壤含水率最低,平均值为 23.16%。

表 1 潘一矿复垦区环境因子统计

Table 1 Statistical table of environmental factors on reclamation area in Panyi Coal Mine

季节	研究区域	统计值	环境因子				
			土壤呼吸速率/($\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$)	土壤温度/℃	土壤含水率/%	大气温度/℃	大气相对湿度/%
冬季	复垦区	平均值	0.88	2.72	24.19	2.78	71.07
		标准差	0.19	0.41	2.80	0.79	15.03
		极小值	0.54	2.01	20.32	1.12	50.37
		极大值	1.44	3.77	29.46	4.02	95.61
	正常农田	平均值	0.95	3.82	30.14	2.91	71.82
		标准差	0.27	0.42	3.71	0.96	14.90
春季	复垦区	平均值	5.10	15.96	38.38	17.96	82.54
		标准差	0.73	2.39	1.95	2.39	5.38
		极小值	3.79	9.99	34.17	11.99	71.23
		极大值	6.69	19.84	41.71	21.84	88.36
	正常农田	平均值	6.24	17.47	40.12	18.71	74.54
		标准差	0.67	1.37	1.93	2.70	6.60
夏季	复垦区	平均值	4.95	28.79	23.16	33.35	57.79
		标准差	0.50	0.93	1.27	2.25	10.77
		极小值	4.12	27.20	20.66	28.54	42.30
		极大值	6.37	30.72	24.87	36.13	77.85
	正常农田	平均值	5.49	29.11	25.18	29.58	59.48
		标准差	0.30	0.34	1.97	0.75	4.08
秋季	复垦区	平均值	3.25	17.69	28.77	19.07	38.87
		标准差	0.81	2.03	2.07	1.73	8.42
		极小值	2.12	14.05	26.00	15.98	26.97
		极大值	4.81	20.74	33.19	21.45	53.34
	正常农田	平均值	3.56	18.01	29.86	19.15	38.54
		标准差	0.83	2.11	3.97	1.74	8.03

注:环境因子为 8:00—18:00 变化统计值,日间样本数 30 个。

潘一矿复垦区大气温度表现出显著的季节动态变化特征,并且与季节更替变化趋势一致。2012 年 1—7 月,大气温度持续上升,并在夏季维持在较高水平,分别达到 33.35 ℃ 水平,2012 年 7—10 月,大气温度持续下降,冬季达到最小。

大气相对湿度呈现春季>冬季>夏季>秋季的变化特征,大气相对湿度日变化最大值 88.36% 出现在春季 8:00,大气相对湿度日变化最小值 26.97% 出现在秋季 12:00。大气相对湿度与大气温度表现出较明显的负相关变化。

用 LSD 检验法对表 1 数据进行多重比较来分析各因子间的季节差异,结果显示各因子之间季节差异

显著($P < 0.05$),仅春季与夏季之间土壤呼吸速率,冬季与夏季之间土壤含水率季节显著性差异不大($P > 0.05$)。潘一矿复垦区环境因子表现出明显的季节变化特征。

由表 1 可以看出,与正常农田观测点数据对比分析可知,大气温度和相对湿度差异不大,土壤呼吸速率、土壤温度、土壤含水率平均值略高于复垦区土壤观测点数据,整体上正常农田呼吸速率和环境因子与复垦区土壤观测点数据季节动态变化特征一致。

3.2 土壤呼吸动态变化特征

由图 1 可以看出,土壤呼吸速率在日间不同时间段具有显著差异。在日间的整个观测期内,潘一矿复

垦区冬季(1月5日)土壤呼吸速率均值在 0.75 ~ 1.08 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 日变化最大值出现在中午 12:00, 日变化最小值出现在 8:00。春季(4月11日)土壤呼吸速率均值在 4.42 ~ 6.14 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 日变化最大值出现在中午 14:00, 日变化最小值出现在 18:00。夏季(7月22日)土壤呼吸速率均值在 4.50 ~ 5.50 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 日变化最大值出现在中午 12:00, 日变化最小值出现在 18:00。秋季(10月23日)土壤呼吸速率均值在 2.34 ~ 4.38 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 日变化最大值出现在中午 14:00, 日变化最小值出现在 8:00。

在日间的整个观测期内, 土壤呼吸速率的日变化曲线存在差异, 均具有明显的日波动变化, 呈单峰曲线变化。土壤呼吸速率最大值发生在 12:00—14:00, 与路亚坤等^[22]研究结论一致。土壤呼吸速率的日变化幅度用变异系数来分析, 各观测时间点数据日变化幅度秋季为 25.33% 数据间差异较大且明显大于其他季节, 冬季(13.48%) 和春季(11.62%) 差异不大, 夏季土壤呼吸速率的日变化幅度为 7.07% 最小。

由图 1 可以看出, 土壤呼吸速率均表现出明显的季节变化特征, 在不同季节具有显著差异(表 1)。土壤呼吸速率均值在 0.87 ~ 5.10 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 土壤

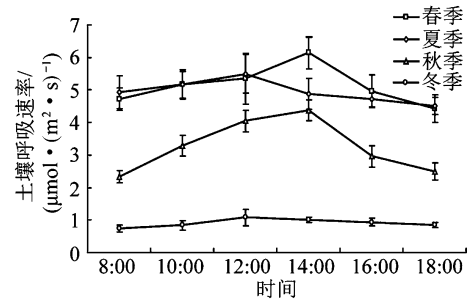


图 1 土壤呼吸速率的日动态变化

Fig. 1 Soil respiration rate of daily dynamic change

呼吸速率均值大小顺序为春季>夏季>秋季>冬季, 且春季和夏季差异不大。

3.3 土壤呼吸速率与环境影响因子的关系

回归分析广泛用于描述土壤呼吸速率与土壤温度、空气温度、土壤湿度与降水量之间的关系。由表 2 可知, 土壤呼吸速率与土壤表面下 10 cm 处温度的拟合曲线中指数函数模型的相关系数 $R^2 = 0.8559$ 最大, 幂函数模型次之, 因此, 拟合效果最好的是指数函数模型。ANOVA 方差分析的 P 值均小于 0.001, 比较 F 值, 指数函数模型的 $F = 599.673$ 最大, 幂函数模型 $F = 94.592$ 次之。则土壤呼吸速率与土壤温度的最佳函数模型为 $y = 1.0136e^{0.0664x}$ 。

表 2 土壤呼吸速率与环境影响因子的回归分析

Table 2 Regression analysis of soil respiration rate and its relevant environmental factors

环境因子	拟合类型	拟合模型	相关系数	F 值	P 值
土壤温度	指数函数	$y = 1.0136e^{0.0664x}$	0.8559	599.673	0
	线性函数	$y = 0.1549x + 1.1317$	0.6170	162.706	
	幂函数	$y = 0.434x^{0.7677}$	0.7414	94.592	
	对数函数	$y = 1.7462 \ln x - 0.7328$	0.7328	276.930	
	二项式	$y = -0.0074x^2 + 0.3837x - 0.0355$	0.7326	136.964	
	三项式	$y = 0.0005x^3 - 0.034x^2 + 0.7215x - 0.8056$	0.6840	218.595	
	土壤含水率	指数函数	$y = 0.7256e^{0.0483x}$	0.1924	
线性函数		$y = 0.1222x + 0.0731$	0.2040	25.882	
幂函数		$y = 0.0256x^{1.4192}$	0.1847	22.883	
对数函数		$y = 3.5341 \ln x - 8.196$	0.1895	23.618	
二项式		$y = 0.0105x^2 - 0.5293x + 9.6433$	0.2396	15.752	
三项式		$y = 0.0005x^3 - 0.0336x^2 + 0.7847x - 3.0584$	0.2417	15.871	
大气温度		指数函数	$y = 1.069e^{0.0562x}$	0.6684	203.575
	线性函数	$y = 0.1322x + 1.2365$	0.6128	159.857	
	幂函数	$y = 0.4728x^{0.7095}$	0.8417	537.097	
	对数函数	$y = 1.6206 \ln x - 0.5558$	0.7268	268.626	
	二项式	$y = -0.0054x^2 + 0.3286x + 0.0652$	0.7441	145.367	
	三项式	$y = 8.240 \times 10^{-5}x^3 - 0.01x^2 + 0.3939x - 0.0881$	0.7447	96.251	
	相对湿度	指数函数	$y = 3.4935e^{-0.0025x}$	0.0043	0.433
线性函数		$y = 0.0057x + 3.2863$	0.0038	0.619	0.537
幂函数		$y = 6.1461x^{-0.1761}$	0.0067	0.677	0.412
对数函数		$y = 0.2542 \ln x + 2.6081$	0.0023	0.233	0.631
二项式		$y = 0.0002x^2 - 0.0161x + 3.8952$	0.0048	0.243	0.785
三项式		$y = -7.488 \times 10^{-5}x^3 + 0.0138x^2 - 0.7869x + 17.398$	0.0745	2.657	0.053

土壤呼吸速率与土壤表面下 10 cm 处含水率的拟合曲线中三项式函数模型的相关系数 $R^2 = 0.2417$ 最大,二项式模型次之,因此,拟合效果最好的是三项式函数模型。ANOVA 方差分析的 P 值均小于 0.001,比较 F 值,三项式函数模型 $F = 15.871$ 最大,二项式函数模型 $F = 15.752$ 次之。则土壤呼吸速率与土壤含水率的最佳函数模型为 $y = 0.0005x^3 - 0.0336x^2 + 0.7847x - 3.0584$ 。

土壤呼吸速率与大气温度的拟合曲线中幂函数模型的相关系数 $R^2 = 0.8417$ 最大,三项式函数模型次之,因此,拟合效果最好的是幂函数模型。ANOVA 方差分析的 P 值均小于 0.001,比较 F 值,幂函数模型的 $F = 537.097$ 最大,三项式函数模型 $F = 96.251$ 次之。因此,土壤呼吸速率与大气温度的最佳函数模型为 $y = 0.4728x^{0.7095}$ 。

从表 2 可以看出,土壤呼吸速率与环境影响因子之间的相关系数 R^2 值大小顺序:土壤温度(0.8559) > 大气温度(0.8417) > 土壤含水率(0.2417),且土壤呼吸速率与这 3 个环境因子呈显著正相关($P < 0.01$)。土壤呼吸速率与大气相对湿度之间无显著相关关系($P > 0.05$)。因此,在季节变异尺度上,土壤温度(10 cm)、大气温度和土壤含水率(10 cm)均是土壤呼吸速率重要的环境调控因子。

3.4 土壤呼吸对温度的敏感性

土壤呼吸对温度的敏感性通常用 Q_{10} 值来表示, Q_{10} 表示温度每升高 10 °C 土壤呼吸速率的变化比率。由于受土壤理化性质、温度、含水率、生物活性等因素的影响,土壤呼吸对温度的敏感性在时间和空间上都存在着较大的差异。土壤呼吸的 Q_{10} 值通常是从温度的季节变化中得到的,因此,估算出来的 Q_{10} 值是多个过程对温度变化响应的结果。土壤呼吸的 Q_{10} 值依地理位置和生态系统类型的不同相差很大^[23-24],从略大于 1(低敏感性)直到大于 10(高敏感性)。全球的 Q_{10} 值的中间值为 2.4,陆地生态系统土壤呼吸速率的 Q_{10} 值变化在 1.3 ~ 5.6^[1 25]。中国土壤呼吸 Q_{10} 值的变化范围为 1.09 ~ 6.27,平均值为 2.26。在不同的生态系统类型之间, Q_{10} 平均值的大小顺序为森林(2.35) > 农田(2.18) > 草地(2.03)。在不同的气候带之间, Q_{10} 平均值的大小顺序为寒温带(2.70) > 暖温带(2.38) > 热带(2.14) > 亚热带(1.90)^[26]。以 10 cm 深土壤温度为计算依据,潘一矿复垦区土壤呼吸的 Q_{10} 值为 1.94。对比分析该研究区域人工重构土壤呼吸的 Q_{10} 值,均低于中国土壤呼吸 Q_{10} 平均值和农田生态系统的 Q_{10} 平均值。潘一矿复垦区地处暖温带半湿润大陆性季风气候区,

Q_{10} 值低于暖温带 Q_{10} 平均值。 Q_{10} 不仅受土壤温度、水分状况的影响,也与植被类型、土壤微生物的种类和数量、呼吸底物的质量和数量有关^[27-29]。与农田土壤相比,潘一矿复垦区土壤受人为扰动和机器碾压造成土壤物理特性改变,土壤密度为 1.49 g/cm^3 ,值偏大,有机质含量在 1% 以内,达到了缺乏水平,土壤含水量均值在 6.01% ~ 7.10%,偏低^[6]。复垦区土壤理化特性的改变,引起影响土壤呼吸速率变化的重要环境调控因子的变化,可能导致潘一矿复垦区土壤呼吸的 Q_{10} 值偏低。因此,需要对研究区域影响土壤呼吸温度敏感性的关键因子开展进一步的研究工作。

3.5 估算土壤呼吸速率

根据表 1 数据,利用多元线性回归中的逐步方法(Stepwise),在 95% 的置信区间内,分析土壤呼吸速率与土壤温度(10 cm)、大气温度和土壤含水率之间的关系,建立最优模型,函数模型如下:

$$Y = 0.284\theta + 0.88T_{10} - 0.654T_g - 7.639, \\ R^2 = 0.96$$

其中, Y 为土壤呼吸速率; θ 为土壤的含水率; T_{10} 为 10 cm 处土壤的温度; T_g 为大气温度。方差分析结果表明,该函数模型包含这 3 个自变量时,其显著性概率值均小于 0.001,函数拟合效果很好,可以解释 96% 的土壤呼吸速率的季节变化特征,说明煤矿复垦区人工重构土壤呼吸速率由土壤温度(10 cm)、大气温度和土壤含水率共同影响。

将每个观测时间点测得土壤温度、土壤含水率和大气温度值,带入建立的多元函数模型中对土壤呼吸速率进行估算(假设 1 h 内土壤呼吸速率不变),见表 3。

表 3 日间土壤呼吸排放量估算

Table 3 Estimation of daytime soil respiration emission

研究区域	g/(m ² ·h)			
	冬季	春季	夏季	秋季
潘一矿复垦区	0.16	0.88	0.39	0.57
对照农田	0.38	1.09	0.92	0.67
其他矿区	0.11 ^①	1.32 ^②	0.36 ^③	0.22 ^③

注:数据①来自文献[30],数据②来自文献[18],数据③来自文献[31]。

分析表 3 可知,与对照农田相比潘一矿复垦区土壤呼吸速率估算值均小于对照农田估算值,土壤呼吸的日排放量小于对照农田;与其他同类型矿区相比,复垦区土壤呼吸速率冬季估算值是淮北平原农耕地(0.11)的 1.45 倍,春季估算值低于徐州垓城煤矿煤矸石复垦区(1.32),是山西安太堡露天煤矿复垦区

夏季(0.36)的1.08倍和秋季的(0.22)2.59倍。与其他矿区同季节土壤呼吸速率数值上的差异,主要来自于土壤理化特性和土地利用方式上的差异。单因素方差分析结果表明,潘一矿复垦区土壤呼吸速率估算值与对照农田、其他同类型矿区无显著差异($P>0.05$),土壤呼吸的日排放量差异也不大。因此,建立的多元函数模型可以应用于淮南矿区复垦土壤呼吸科学评估工作上。

4 结 论

(1) 潘一矿复垦区环境影响因子表现出明显的季节变化特征,土壤呼吸速率与环境影响因子之间的相关系数 R^2 值大小顺序为:土壤温度>大气温度>土壤含水率,且土壤呼吸速率与这3个环境因子呈显著正相关。土壤呼吸速率与大气相对湿度之间无显著相关关系。在季节尺度上,土壤温度(10 cm)、大气温度和土壤含水率均是土壤呼吸速率重要的环境调控因子。

(2) 土壤呼吸速率的日变化曲线均呈单峰曲线变化,土壤呼吸速率日变化观测最大值发生在12:00—14:00,观测最小值出现在8:00和18:00两个时间点。土壤呼吸速率表现出明显的季节变化特征,在不同季节具有显著差异,均值大小顺序为:春季>夏季>秋季>冬季,且春季和夏季差异性不大。与正常农田观测点数据对比分析可知,大气温度和相对湿度差异不大,土壤呼吸速率、土壤温度、土壤含水率平均值略高于复垦区土壤观测点数据,整体上正常农田呼吸速率和环境因子与复垦区土壤观测点数据季节动态变化特征一致。

(3) 煤矿复垦区人工重构土壤呼吸速率由土壤温度(10 cm)、大气温度和土壤含水率(10 cm)共同决定,建立多元函数模型并进行估算,类比同类型矿区复垦土壤呼吸速率,可应用于淮南矿区复垦土壤呼吸速率的科学评估。

(4) 潘一矿复垦区人工重构土壤呼吸的 Q_{10} 值,低于暖温带 Q_{10} 平均值,低于中国土壤呼吸 Q_{10} 平均值和农田生态系统的 Q_{10} 平均值。这可能与复垦区土壤受人为扰动和机器碾压造成土壤理化特性改变,引起影响土壤呼吸速率变化的重要环境调控因子变化,可能导致潘一矿复垦区土壤呼吸的 Q_{10} 值偏低,还需要开展进一步的研究。

参考文献:

[1] Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation [J]. *Telhus B*, 1992, 44

(2): 81-99.

- [2] Buchnarm N. Biotic and abiotic factors controlling soil respiration rates in *Picea abies* stands [J]. *Soil Biology and Biochemistry* 2000, 32(11): 1625-1635.
- [3] Schlesinger W H, Andrews J A. Soil respiration and the global carbon cycle [J]. *Biogeochemistry* 2000, 48: 7-20.
- [4] 郑永红, 张治国, 姚多喜, 等. 煤矿复垦区土壤重金属含量时空分布及富集特征研究 [J]. *煤炭学报* 2013, 38(8): 1476-1483. Zheng Yonghong, Zhang Zhiguo, Yao Duoxi, et al. Characteristics of temporal-spatial distribution and enrichment of heavy metals in coal mine reclaimed soil [J]. *Journal of China Coal Society* 2013, 38(8): 1476-1483.
- [5] 胡振琪, 魏忠义, 秦萍. 矿山复垦土壤重构的概念与方法 [J]. *土壤* 2005, 37(1): 8-12. Hu Zhenqi, Wei Zhongyi, Qin Ping. Concept of and methods for soil reconstruction in mined land reclamation [J]. *Soils* 2005, 37(1): 8-12.
- [6] 郑永红, 张治国, 姚多喜, 等. 煤矿石充填复垦对土壤特性影响研究 [J]. *安徽理工大学学报(自然科学版)* 2013, 33(4): 7-11. Zheng Yonghong, Zhang Zhiguo, Yao Duoxi, et al. Study on influence of gangue on reclaimed soil properties [J]. *Journal of Anhui University of Science and Technology (Natural Science)* 2013, 33(4): 7-11.
- [7] Houghton R A. Land-use change and the carbon cycle [J]. *Global Change Biology* 1995, 1: 275-287.
- [8] 吴仲民, 曾庆波, 李意德, 等. 尖峰岭热带森林土壤 C 储量和 CO₂ 排放量的初步研究 [J]. *植物生态学报* 1997, 21(5): 416-423. Wu Zhongmin, Zeng Qingbo, Li Yide, et al. A preliminary research on the carbon storage and CO₂ release of the tropical forest soils in Jianfengling, Hainan Island, China [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology* 1997, 21(5): 416-423.
- [9] 程根伟, 罗辑. 贡嘎山亚高山林地碳的积累与耗散特征 [J]. *地理学报* 2003, 58(2): 179-185. Cheng Genwei, Luo Ji. The carbon accumulation and dissipation features of sub-alpine woodland in Mt. Gongga [J]. *Acta Geographica Sinica* 2003, 58(2): 179-185.
- [10] 王鹏程, 邢乐杰, 肖文发, 等. 三峡库区森林生态系统有机碳密度及碳储量 [J]. *生态学报* 2009, 29(1): 97-107. Wang Pengcheng, Xing Lejie, Xiao Wenfa, et al. Organic carbon density and storage of forest ecosystems in Three Gorges Reservoir Area [J]. *Acta Ecologica Sinica* 2009, 29(1): 97-107.
- [11] 齐玉春, 董云社, 耿元波, 等. 我国草地生态系统碳循环研究进展 [J]. *地理科学进展* 2003, 22(4): 342-352. Qi Yuchun, Dong Yunshe, Geng Yuanbo, et al. The progress in the carbon cycle researches in grassland ecosystem in China [J]. *Progress in Geography* 2003, 22(4): 342-352.
- [12] 徐淑新, 张丽华, 郭笃发. 草地生态系统碳通量研究进展 [J]. *环境科学与管理* 2010, 35(7): 146-149. Xu Shuxin, Zhang Lihua, Guo Dufa. The progress of research on carbon flux in grassland ecosystems [J]. *Environmental Science and Management* 2010, 35(7): 146-149.

- [13] 韩道瑞,曹广民,郭小伟,等. 青藏高原高寒草甸生态系统碳增汇潜力[J]. 生态学报, 2011, 31(24): 7408-7417.
Han Daorui, Cao Guangmin, Guo Xiaowei, et al. The potential of carbon sink in alpine meadow ecosystem on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(24): 7408-7417.
- [14] 刘允芬,欧阳华,张宪洲,等. 青藏高原农田生态系统碳平衡[J]. 土壤学报, 2002, 39(5): 636-642.
Liu Yunfen, Ouyang Hua, Zhang Xianzhou, et al. Carbon balance in agro-ecosystem in Qinghai-Tibet plateau[J]. Acta Pedologica Sinica, 2002, 39(5): 636-642.
- [15] 李琪,胡正华,薛红喜,等. 淮河流域典型农田生态系统碳通量变化特征[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(12): 2545-2550.
Li Qi, Hu Zhenghua, Xue Hongxi, et al. Variation of net ecosystem carbon flux over typical agro-ecosystem in Huaihe River Basin[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2009, 28(12): 2545-2550.
- [16] 邓祥征,姜群鸥,林英志,等. 中国农田土壤有机碳贮量变化预测[J]. 地理研究, 2010, 29(1): 93-101.
Deng Xiangzheng, Jiang Qun'ou, Lin Yingzhi, et al. Simulation of the changes of soil organic carbon stock of cropland in China[J]. Geographical Research, 2010, 29(1): 93-101.
- [17] 齐永青,刘荣慧,沈彦俊,等. 海河流域农田林网碳储量及其潜力评估[J]. 中国农学通报, 2011, 27(28): 69-73.
Qi Yongqing, Liu Ronghui, Shen Yanjun, et al. The carbon storage and its potential estimation of shelterbelt in agricultural area of Haihe River Basin[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(28): 69-73.
- [18] 牟守国,董霁红,王辉,等. 采煤塌陷地充填复垦土壤呼吸的研究[J]. 中国矿业大学学报, 2007, 33(5): 663-668.
Mu Shouguo, Dong Qihong, Wang Hui, et al. Study of reclaimed soil respiration on the sites by filling mining wastes and fly ash into subsidence area due to coal mining[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2007, 33(5): 663-668.
- [19] 李君剑,曹杰,严俊霞,等. 矿区不同复垦措施下土壤呼吸与环境因子关系的研究[J]. 环境科学学报, 2014, 34(8): 2102-2110.
Li Junjian, Cao Jie, Yan Junxia, et al. Correlation between soil respiration and environmental factors under different reclamation systems in a mining area[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, 34(8): 2102-2110.
- [20] 赵魁,张治国,杨清,等. 煤矿塌陷地不同复垦方式下土壤呼吸特征[J]. 安徽理工大学学报(自然科学版), 2012, 32(3): 41-45.
Zhao Kui, Zhang Zhiguo, Yang Qing, et al. Soil respiration characteristics of different reclamation mode in collapsed coal mine area[J]. Journal of Anhui University of Science and Technology(Natural Science), 2012, 32(3): 41-45.
- [21] 张治国,郝永红,姚多喜,等. 煤矿塌陷复垦区 6 种菊科植物土壤重金属污染修复潜力研究[J]. 煤炭学报, 2010, 35(10): 1742-1747.
Zhang Zhiguo, Zhao Yonghong, Yao Duoxi, et al. The phytoremediation potential of six compositae plants to soil pollution of heavy metal in coal mine collapse and reclaimed area[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(10): 1742-1747.
- [22] 路亚坤,刘加珍,陈永金,等. 东平湖湖滨带不同植被类型下春季土壤 CO₂ 通量研究[J]. 中国农学通报, 2012, 28(28): 8-14.
Lu Yakun, Liu Jiazhen, Chen Yongjin, et al. The research on carbon dioxide flux of the three communities in the Dongpinghu Riparian zone[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012, 28(28): 8-14.
- [23] Simmons J A, Fernandez I J, Briggs R D, et al. Forest floor carbon pools and fluxes along a regional climate gradient in Maine USA[J]. Forest Ecology and Management, 1996, 84: 81-95.
- [24] Chen H, Harmon M E, Griggs R P, et al. Effects of temperature and moisture on carbon respired from decomposing woody roots[J]. Forest Ecology and Management, 2000, 138(13): 51-64.
- [25] Chen H, Harmon M E, Tian H Q. Effects of global change on litter decomposition in terrestrial ecosystems[J]. Acta Ecologica Sinica, 2001, 12: 1549-1563.
- [26] 展小云,于贵瑞,郑泽梅,等. 中国区域陆地生态系统土壤呼吸碳排放及其空间格局[J]. 地球科学进展, 2012, 31(1): 97-108.
Zhan Xiaoyun, Yu Guirui, Zheng Zemei, et al. Carbon emission and spatial pattern of soil respiration of terrestrial ecosystems in China: Based on geostatistic estimation of flux measurement[J]. Advances in Earth Science, 2012, 31(1): 97-108.
- [27] 唐燕飞,王国兵,阮宏华. 土壤呼吸对温度的敏感性研究综述[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2008, 32(1): 124-128.
Tang Yanfei, Wang Guobing, Ruan Honghua. A review on the sensitivity of soil respiration to temperature[J]. Journal of Nanjing Forestry University(Natural Sciences Edition), 2008, 32(1): 124-128.
- [28] 刘洪升,刘华杰,王智平,等. 土壤呼吸的温度敏感性[J]. 地球科学进展, 2008, 27(4): 51-60.
Liu Hongsheng, Liu Huajie, Wang Zhiping, et al. The temperature sensitivity of soil respiration[J]. Advances in Earth Science, 2008, 27(4): 51-60.
- [29] 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.
Yang Qingpeng, Xu Ming, Liu Hongsheng, et al. Impact factors and uncertainties of the temperature sensitivity of soil respiration[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(8): 2301-2311.
- [30] 高东,鲁绍伟,绕梁懿,等. 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, 27(4): 91-99.
Gao Dong, Lu Shaowei, Rao Liangyi, et al. Soil respiration flux of four land-use types in non-growing season in North Plain of Huai River[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(4): 91-99.
- [31] 卢宁,李晋川,郭春燕,等. 露天煤矿复垦地土壤呼吸的日变化研究——以平朔安太堡露天煤矿排土场为例[J]. 山西农业科学, 2010, 38(4): 52-54, 64.
Lu Ning, Li Jinchuan, Guo Chunyan, et al. The daily changes study of soil respiration to opencast coal mine reclamation: In case of the dump of Antaibao Opencast Coal Mine[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2010, 38(4): 52-54, 64.