

# 安太堡露天煤矿复垦区不同人工林土壤呼吸特征

郭春燕<sup>1</sup>, 李晋川<sup>1</sup>, 岳建英<sup>1</sup>, 卢宁<sup>1</sup>, 王翔<sup>1</sup>, 贺振伟<sup>2</sup>

(1. 山西省生物研究所, 山西 太原 030006; 2. 中煤平朔集团有限公司, 山西 朔州 036006)

**摘要:** [目的] 探讨复垦模式对土壤呼吸作用的影响, 同时为矿区复垦土地质量评价、复垦模式的筛选提供数据支撑。[方法] 采用动态密闭气室红外 CO<sub>2</sub> 分析法对露天煤矿复垦区 5 块永久性样地土壤呼吸作用及其相关组分的日变化及季节动态进行跟踪测定。[结果] 各样地土壤呼吸作用均呈现出明显的季节变化规律, 但日变化趋势却各不相同。土壤呼吸速率日变化在 5, 9, 10 月份变幅较为平缓, 6, 7, 8 月份变幅较大, 且在 7, 8 月份达到最大值。去根系后, 土壤温度及水分与未处理之间没有显著差异, 但土壤呼吸速率值明显下降, 下降幅度为 19%~46%。土壤总呼吸速率和去根系土壤呼吸速率均与土壤温度、土壤水分、双因子呈幂或指数函数关系。[结论] 刺槐纯林模式更有利于土壤的熟化与肥力的提高。

**关键词:** 土壤呼吸; 去根系; 生态因子; 复垦区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2015)03-0055-07

中图分类号: S718.5

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2015.03.016

## Soil Respiration Characteristics of Different Artificial Forests in Reclaimed Region of Antaibao Opencast Coal Mine

GUO Chunyan<sup>1</sup>, LI Jinchuan<sup>1</sup>, YUE Jianying<sup>1</sup>, LU Ning<sup>1</sup>, WANG Xiang<sup>1</sup>, HE Zhenwei<sup>2</sup>

(1. Shanxi Institute of Biology, Taiyuan, Shanxi 030006, China;

2. Chinacoal Pingshuo Group Co. Ltd, Shuozhou, Shanxi 036006, China)

**Abstract:** [Objective] To explore the effects of reclamation mode on soil respiration in order to provide theoretical support for soil quality evaluation and reclamation mode selection in reclaimed region. [Methods] Using the analysis method of dynamic airtight chamber infrared CO<sub>2</sub>, the diurnal and seasonal variation of soil respiration rate and its related components in five permanent sample plots of opencast coal mine in Shanxi Province were studied. [Results] The soil respiration rate in each sample plot showed obvious seasonal variation, however, the law of diurnal variation of soil respiration rate was different. The width of diurnal variation of soil respiration rate in each sample plot was relatively gentle in May, September and October, and was bigger in June, July and August. The highest value of soil respiration appeared in July or August. Compared to the control, the root exclusion soil temperature and moisture was not significant difference, but the soil respiration rate was significantly declined by 19%~46%. The total and root exclusion soil respiration in relationship with soil temperature and moisture all can be described as a power function or exponential function, respectively. [Conclusion] Pure forest model of *Robinia pseudoacacia* is more advantageous to the improvement of the maturation and fertility of soil.

**Keywords:** soil respiration; root exclusion; environmental factor; reclaimed region

土壤呼吸指土壤向大气排放 CO<sub>2</sub> 的过程, 是土壤有机碳输出的主要形式。从严格意义上讲是指未受扰动的土壤中产生 CO<sub>2</sub> 的所有代谢作用<sup>[1]</sup>。土壤呼吸包括 3 个生物学过程(植物根系呼吸、土壤微生物呼吸和土壤无脊椎动物呼吸)和 1 个非生物学过程(土壤中含碳物质化学氧化过程)<sup>[2]</sup>。土壤呼吸作为土壤生物活性指标, 在一定程度上反映了土壤养分转化和供应能力, 尤其是基础土壤呼吸部分, 反应了土

物呼吸和土壤无脊椎动物呼吸)和 1 个非生物学过程(土壤中含碳物质化学氧化过程)<sup>[2]</sup>。土壤呼吸作为土壤生物活性指标, 在一定程度上反映了土壤养分转化和供应能力, 尤其是基础土壤呼吸部分, 反应了土

收稿日期: 2014-01-16

修回日期: 2014-04-15

资助项目: “十二五”国家科技支撑计划课题“资源转型城市矿区生态修复关键技术与示范”(2012BAC10B04); 山西省科技重大专项项目“山西大型生态脆弱矿区土地复垦与生态重建技术研究与示范”(20121101007); 山西省青年基金项目“晋西北大型露天煤矿复垦区土壤呼吸与生态重建关系”(2010021027-3)

第一作者: 郭春燕(1980—), 女(汉族), 山西省长治市人, 博士研究生, 副研究员, 主要从事生态学研究。E-mail: pai109@126.com。

壤的生物学特性和土壤物质的代谢强度,它与土壤的理化性质以及植被类型关系非常密切<sup>[3-7]</sup>。土壤呼吸释放 CO<sub>2</sub> 的过程是在土壤物理、化学和生物等多种因素作用下完成的,因此,土壤呼吸率与土壤质量密切相关<sup>[8]</sup>。目前,国内外土壤呼吸研究主要集中在天然林地、草地、湿地等土壤呼吸变化因素及其对大气中温室气体浓度增加的影响,以及土壤呼吸与环境因子间的相关性方面<sup>[9-10]</sup>。

近年来,煤矿复垦工作取得了显著进展,关于矿区复垦地脆弱生态系统的土壤理化性质等质量特征<sup>[11-13]</sup>及植被群落演替特征方面均有较为详尽的研究报道<sup>[14-15]</sup>,而关于露天煤矿复垦区不同复垦模式对土壤呼吸影响的研究甚少。

本文以山西省朔州市安太堡露天煤矿不同复垦模式下 5 块永久性样地为研究对象,通过对各样地土壤呼吸作用及其相关组分的日变化及季节动态进行跟踪测定,分析各样地土壤呼吸强度及其原因,旨在为矿区复垦土地质量评价、复垦模式的筛选提供数据支撑。

## 1 研究区自然条件和研究方法

### 1.1 研究区自然概况

研究区域位于平朔安太堡露天煤矿排土场内,地

处山西省朔州市平鲁区境内,是中国最大、世界上少有的超大型露天煤矿。该矿区为黄土高原丘陵生态极度脆弱区,东经 112°10′—113°30′,北纬 39°23′—39°37′,属于典型的温带半干旱大陆性季风气候,冬春干旱少雨、寒冷多风,夏秋降水集中、温凉少风。区内年平均降雨量为 428.2~449.0 mm,年蒸发量 1 786.6~2 598.0 mm。空气平均绝对湿度为 6.9 mb,平均相对湿度为 54%。矿区年平均气温 4.8~7.8℃,极端最高温度为 37.9℃,极端最低温度为-32.4℃。全年无霜期 115~130 d。矿区年平均风速为 2.5~4.2 m/s,最大风速 20 m/s。原地貌植被零星分布,覆盖率低,属于干草原类型,土壤为栗钙土与栗褐土的过渡类型。

安太堡露天煤矿排土场按照统一施工标准进行修筑,边坡坡度均为 20°~22°。在对安太堡露天煤矿连续研究 20 a 余的基础上,于 2010 年在 5 块成熟人工林中建立永久性样地(详见表 1),分别为南排 1 号样地(S<sub>I</sub>)、南排 3 号样地(S<sub>III</sub>)、南排 4 号样地(S<sub>IV</sub>)、南排 5 号样地(S<sub>V</sub>)、西排 1 号样地(W),每块样地面积 1 hm<sup>2</sup>,在样地内又划分为 100 个 10 m×10 m 的小样方。对每个小样方内乔木进行挂牌,同时测定其高度、胸径、冠幅和枝下高,对草本进行高度、多度、盖度和生活力调查。

表 1 永久性样地基本情况

样地	海拔/m	立地条件	植被类型	林龄/a	地形	树高/m	胸径/cm	优势种
S <sub>I</sub>	1 360	土石混排	刺槐×油松( <i>Robinia pseudoacacia</i> × <i>Pinus tabulaeformis</i> )	19	斜坡	6.61	8.43	阿尔泰狗娃花( <i>Heteropappus altaicus</i> ),大籽蒿( <i>Artemisia sieversiana</i> ),无芒雀麦( <i>Bromus inermis</i> )
S <sub>III</sub>	1 380	土石混排	刺槐×榆树×臭椿( <i>R. pseudoacacia</i> × <i>Ulmus pumila</i> × <i>Ailanthus altissima</i> )	19	平台	5.10	5.47	大籽蒿( <i>A. sieversiana</i> ),硬质早熟禾( <i>Poa sphondylodes</i> ),披碱草( <i>Elymus dahuricus</i> )
S <sub>IV</sub>	1 450	土石混排	刺槐×油松( <i>R. pseudoacacia</i> × <i>P. tabulaeformis</i> )	19	斜坡	6.96	8.01	大籽蒿( <i>A. sieversiana</i> ),黄花蒿( <i>Artemisia annua</i> ),披碱草( <i>E. dahuricus</i> )
S <sub>V</sub>	1 420	土石混排	刺槐纯林( <i>R. pseudoacacia</i> )	17	平台	5.55	6.43	黄花蒿( <i>A. annua</i> ),披碱草( <i>E. dahuricus</i> ),益母草( <i>Leonurus artemisia</i> )
W	1 460	土石分排,表层黄壤土	榆树×北沙柳×青扦×白扦×油松( <i>U. pumila</i> × <i>Salix psammophila</i> × <i>Picea wilsonii</i> × <i>Picea meyeri</i> × <i>P. tabulaeformis</i> )	17	平台	5.53	7.43	硬质早熟禾( <i>P. sphondylodes</i> ),阿尔泰狗娃花( <i>H. altaicus</i> ),糙隐子草( <i>Cleistogenes squarrosa</i> )

## 1.2 研究方法

2010年10月在每块人工林永久性观测样地内按“S”或“W”型确定10个土壤呼吸测定小样方(10 m × 10 m),每个小样方内分别用PVC(直径30 cm,高10 cm)管确定2个测量位点,将PVC管埋于土中,露出地面3 cm,在其中1个测量位点旁做去根处理。去根处理的具体做法为:挖一个长宽高分别为30 cm的土柱,放入隔离圈(PVC管,直径30 cm,高30 cm),将挖出的土柱按从表层到底层的顺序放于朔料布上,拣除土中根系,并按原土壤层次回填入隔离圈内。2011年选择植物生长季5月至10月,每月中旬选择天气状况比较稳定日,采用美国LI-cor公司生产的LI-6400便携式光合作用测量系统连接LI-6400-09土壤呼吸室对各测量位点进行土壤呼吸测定。 $S_{III}$ ,  $S_{IV}$ , W永久性样地进行土壤呼吸日变化测定。从8:00—18:00,每2 h测定1次,重复3次,每一个月测定5 d。在每次测量的前1天,将土壤圈(PVC管,直径10 cm,高5 cm)插入测量点,同时将土壤圈内的植物齐地表剪下,尽量不扰动土壤。鉴于前期安太堡露天煤矿复垦区土壤呼吸试验证明,5 cm较10 cm深度的土壤温度、水分与土壤呼吸的相关性高<sup>[16]</sup>,因此,本试验中只测定了土壤5 cm处的水分与温度。土壤呼吸与5 cm深度的土壤温度用Li-6400光合系统的土壤温度探针测定,空气温度由Li-6400便携式光合作用测量系统测出,5 cm深度的土壤含水量由EC50水分仪测定。

## 1.3 数据分析

采用SPSS统计分析软件包(SPSS 17.0 for Windows, Chicago, USA)分析不同月份、不同样地间土壤呼吸强度的显著性,对土壤呼吸强度与土壤水分、温度的关系进行回归分析。用线性和非线性方程分析土壤呼吸和土壤温度和水分单因子关系:

$$\text{贡献率} = 100\% \times (\text{土壤总呼吸速率} - \text{去根系土壤呼吸速率}) / \text{土壤总呼吸速率}$$

## 2 结果与讨论

### 2.1 土壤呼吸速率日变化

不同月份各样地土壤呼吸速率日变化规律不同。从图1可看出,除7和8月份的异养呼吸外, $S_{IV}$ 样地在各月份中土壤呼吸值均高于 $S_{III}$ , W样地,各样地土壤异养呼吸速率低于总呼吸速率,同一块地土壤总呼吸速率与异养呼吸速率日变化趋势基本一致。 $S_{III}$ ,  $S_{IV}$ , W样地不同月份日变化幅度均为在6, 7, 8

月份较大,最低值出现在18:00,最高值出现在9:00—14:00;5, 9, 10月份日变化幅度较小,最低值出现在8:00,最高值出现在10:00—16:00。表明在一天中,土壤呼吸速率主要受土壤温度的影响,同时受植被生理特征的限制,不同样地最高、最低值出现时间会有提前或推后。在降雨较少的月份,土壤水分成为限制土壤呼吸速率的主要因子之一。在相对干旱的5月,表现尤为明显,干旱胁迫在一定程度上降低了土壤呼吸速率对土壤温度的响应<sup>[17]</sup>。

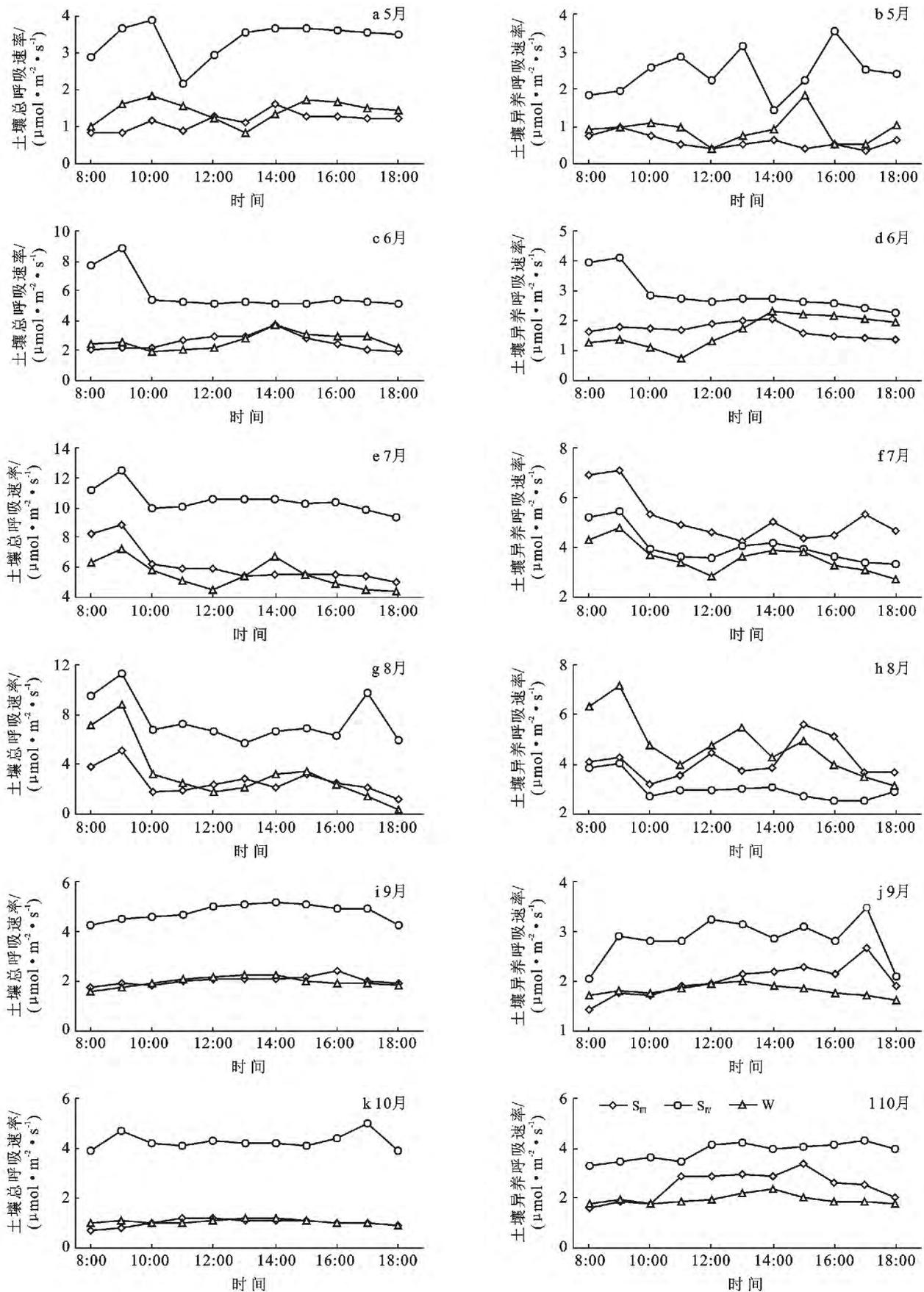
### 2.2 土壤水分与温度月变化

各永久性样地去根系与未处理的土壤水分呈现显著的季节性变化( $p < 0.01$ )。从图2中可看出,除 $S_{III}$  ( $p = 0.04$ ),  $S_{IV}$  ( $p = 0.03$ )样地外,其他样地去根系与未处理土壤水分之间差异不显著。在整个植物生长期,各样地土壤水分月均值基本相同(11%~13%),且基本为去根系大于未处理,土壤水分最高出现在7月份W样地(20%, 19%),最低为5月份 $S_I$ 样地(6%, 5%)。

各永久性样地去根系与未处理的土壤温度也呈现出显著的季节变化( $p < 0.01$ ),但两者之间差异不显著( $0.66 < p < 0.99$ )。在整个植物生长期,各样地土壤温度均为10月份最低,7月份最高( $S_{IV}$ 样地除外),且 $S_{IV}$ 样地土壤温度月均值最大(19.53 °C, 19.72 °C),其次是 $S_{IV}$ 样地(15.57 °C, 15.37 °C);土壤温度最高值出现在6月份 $S_{IV}$ 样地(25.48 °C, 26.62 °C),最低值出现在10月份 $S_I$ 样地(7.85 °C, 6.76 °C)。

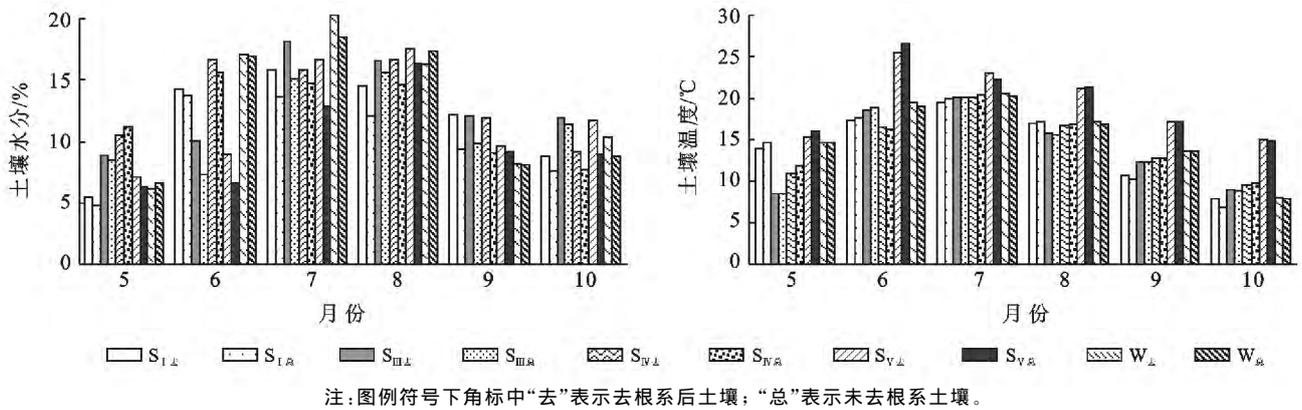
### 2.3 土壤呼吸速率月变化

各样地土壤呼吸速率均表现出明显的月变化,且变化规律相似(表2),即从5月份逐渐升高,到7, 8月份达到最大值,随后逐渐降低,除 $S_{IV}$ 样地外,10月份为最低值。土壤呼吸速率在不同样地、不同月份间均存在极显著差异( $p < 0.01$ ),各月份均为 $S_{IV}$ 样地土壤呼吸速率值最高。植物生长季各样地土壤总呼吸速率均值从大到小依次为: $S_{IV}$ ,  $S_{IV}$ ,  $S_{III}$ , W,  $S_I$ , 异养呼吸均值大小依次为 $S_{IV}$ , W,  $S_{IV}$ ,  $S_I$ ,  $S_{III}$ ;总呼吸变化幅度为: $S_{IV} > W > S_{III} > S_{IV} > S_I$ ;异养呼吸变化幅度为: $S_{IV} > W > S_{III} > S_I > S_{IV}$ 。除 $S_{IV}$ 样地外,各样地自养呼吸贡献率存在明显的季节变化,均为春季(5月)、秋季(9, 10月)较大,夏季(6, 7, 8月)较小。在植物生长季, $S_{IV}$ 样地月均自养呼吸贡献率最大,为46%; $S_I$ ,  $S_{III}$ 样地次之,为20%; $S_{IV}$ , W最小,仅为19%。



注:  $S_{I}$ ,  $S_{II}$ ,  $S_{III}$ ,  $S_{IV}$ , W 代表不同的样地。下同。

图 1 不同月份各永久性样地土壤呼吸速率日变化



注:图例符号下角标中“去”表示去根系后土壤;“总”表示未去根系土壤。

图 2 各永久性样地土壤水分与温度月变化

表 2 不同样地不同月份间土壤呼吸速率的比较

样地	土壤呼吸速率/ $(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$						
	5月	6月	7月	8月	9月	10月	
S <sub>I</sub>	1	1.79±0.16 <sup>Aa</sup>	5.33±0.98 <sup>Bb</sup>	7.17±0.69 <sup>Ac</sup>	5.25±0.52 <sup>Ab</sup>	1.80±0.18 <sup>Aa</sup>	1.79±0.78 <sup>ABa</sup>
	2	1.08±0.22 <sup>ABa</sup>	4.31±0.53 <sup>Cb</sup>	6.29±0.73 <sup>ABc</sup>	4.95±0.46 <sup>Ab</sup>	1.71±0.15 <sup>Aa</sup>	1.02±0.10 <sup>Aa</sup>
S <sub>Ⅲ</sub>	1	1.61±0.21 <sup>Aab</sup>	2.31±0.19 <sup>Aab</sup>	9.29±0.73 <sup>Ad</sup>	6.40±0.60 <sup>Ac</sup>	2.70±0.28 <sup>Ab</sup>	1.40±0.12 <sup>Aa</sup>
	2	1.24±0.10 <sup>Aa</sup>	1.72±0.09 <sup>Aab</sup>	7.93±0.51 <sup>Bd</sup>	4.66±0.53 <sup>Ac</sup>	2.18±0.16 <sup>ABb</sup>	1.15±0.06 <sup>Aa</sup>
S <sub>Ⅳ</sub>	1	4.35±1.17 <sup>Bab</sup>	6.26±0.50 <sup>Bab</sup>	7.67±0.70 <sup>ABc</sup>	10.40±2.07 <sup>Bc</sup>	5.28±1.52 <sup>Bab</sup>	3.35±0.61 <sup>Ba</sup>
	2	2.57±0.65 <sup>BCab</sup>	3.73±0.61 <sup>BCab</sup>	4.74±0.59 <sup>Ab</sup>	4.16±1.16 <sup>Ab</sup>	2.62±0.48 <sup>Bab</sup>	1.89±0.37 <sup>Ba</sup>
S <sub>Ⅴ</sub>	1	4.89±0.71 <sup>Ba</sup>	7.12±0.62 <sup>Cab</sup>	13.40±0.79 <sup>Bc</sup>	14.03±0.64 <sup>Cc</sup>	8.17±0.85 <sup>Cb</sup>	5.92±1.00 <sup>Cab</sup>
	2	3.39±0.52 <sup>Ca</sup>	6.25±0.39 <sup>Dbc</sup>	11.21±0.43 <sup>Cd</sup>	10.77±1.09 <sup>Bd</sup>	6.90±0.39 <sup>Cc</sup>	5.01±0.21 <sup>Cab</sup>
W	1	2.82±0.32 <sup>Aa</sup>	2.93±0.18 <sup>Ab</sup>	9.11±0.52 <sup>Ad</sup>	6.41±0.51 <sup>Ac</sup>	1.64±0.15 <sup>Aa</sup>	0.81±0.07 <sup>Aa</sup>
	2	1.23±0.08 <sup>Aa</sup>	2.57±0.29 <sup>ABb</sup>	7.91±0.50 <sup>Bd</sup>	6.23±0.73 <sup>Ac</sup>	1.32±0.12 <sup>Aa</sup>	0.75±0.05 <sup>Aa</sup>

注:表中数值为平均值±标准误;1为样地土壤总呼吸速率;2为样地异养呼吸速率;不同大写字母表示在同一个月份内不同样地的土壤呼吸速率存在显著性差异( $p < 0.01$ );不同小写字母表示同一样地不同月份内的土壤呼吸速率存在显著性差异( $p < 0.01$ )。

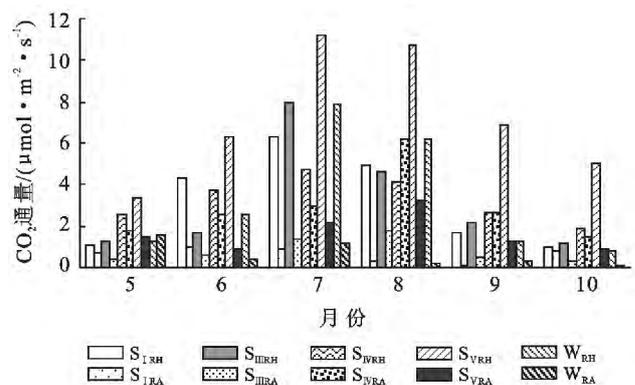
### 2.4 土壤呼吸组成成分分析

从图 3 中可看出,土壤异养呼吸(RH)变幅较自养呼吸(RA)大,异养呼吸速率变化范围为 1.02~11.21  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,自养呼吸速率变化范围为 0.06~6.24  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。各样地土壤异养呼吸速率与自养呼吸速率月变化明显,均为 7, 8 月最强,6, 9 月次之,5, 10 月最低。随着温度的升高,水分的增加,土壤异养呼吸在土壤总呼吸中所占比例迅速增大。这可能是异养呼吸与自养呼吸对环境变量的响应不同所致。异养呼吸主要由土壤温度与水分驱动,而自养呼吸由根生物量和单位根呼吸速率所决定的,随着植物的种类、年龄以及生长环境的改变而变化。因此,自养呼吸速率受到许多生物和非生物因子的调控,这些因子与植物的状况、生活史和环境有关。各样地异养呼吸速率月均值大小依次为 S<sub>V</sub>, W, S<sub>Ⅳ</sub>, S<sub>I</sub>, S<sub>Ⅲ</sub>;自养呼吸速率月均值大小依次为:S<sub>Ⅳ</sub>, S<sub>V</sub>, S<sub>Ⅲ</sub>, S<sub>I</sub>, W。

### 2.5 土壤呼吸与温度及水分相关性

通过对各样地土壤呼吸速率(R)与土壤温度(T)、水分(W)的线性和非线性回归方程的分析,最终筛选出相关指数最高的拟合方程(表 3)。去除根系并

没有改变土壤呼吸速率与 5 cm 土壤温度与水分之间的关系,各样地土壤总呼吸速率、异养呼吸速率与土壤温度、水分单因子均分别呈幂函数、指数函数相关,且除 S<sub>Ⅳ</sub> 和 S<sub>V</sub> 样地外,均为显著相关。总体来说,土壤异养呼吸速率与水分的相关性较总呼吸高,与温度的相关性则较总呼吸低。土壤总呼吸、异养呼吸与土壤温度、水分双因子呈指数相关,相关指数较单因子方程有不同程度的提高。除 S<sub>Ⅳ</sub> 样地外,均为显著相关。



注:RH 表示异养呼吸,RA 表示自养呼吸。

图 3 各永久样地不同月份土壤异养呼吸速率与自养呼吸速率比较

表 3 各永久样地土壤呼吸速率与土壤温度及水分的回归方程

样地	土壤水分			土壤温度			双因子			
	回归方程	$R^2$	$p$	回归方程	$R^2$	$p$	回归方程	$R^2$	$p$	
S <sub>I</sub>	1	$R=0.95e^{0.11W}$	0.30	0.00	$R=0.34T^{0.77}$	0.33	0.00	$R=1.22e^{0.45T}W^{0.68}$	0.46	0.00
	2	$R=0.64e^{11.96W}$	0.34	0.00	$R=0.24T^{0.86}$	0.31	0.00	$R=1.01e^{0.45T}W^{0.63}$	0.40	0.00
S <sub>III</sub>	1	$R=0.93e^{10.52W}$	0.35	0.00	$R=0.52T^{0.59}$	0.06	0.01	$R=0.88e^{0.53T}W^{0.67}$	0.45	0.00
	2	$R=0.66e^{11.63W}$	0.45	0.00	$R=0.27T^{0.81}$	0.08	0.02	$R=0.87e^{0.48T}W^{0.73}$	0.53	0.00
S <sub>IV</sub>	1	$R=2.47e^{5.87W}$	0.11	0.00	$R=0.36T^{0.90}$	0.09	0.00	$R=2.78e^{0.24T}W^{0.36}$	0.13	0.00
	2	$R=2.14e^{2.79W}$	0.02	0.35	$R=0.23T^{0.89}$	0.06	0.08	$R=1.94e^{0.17T}W^{0.22}$	0.05	0.12
S <sub>V</sub>	1	$R=3.72e^{7.28W}$	0.25	0.00	$R=1.14T^{0.64}$	0.09	0.00	$R=4.89e^{0.22T}W^{0.48}$	0.23	0.00
	2	$R=4.57e^{6.63W}$	0.26	0.00	$R=1.63T^{0.60}$	0.09	0.16	$R=6.01e^{0.18T}W^{0.47}$	0.23	0.00
W	1	$R=0.44e^{13.65W}$	0.61	0.00	$R=0.03T^{1.51}$	0.35	0.00	$R=0.62e^{0.50T}W^{0.86}$	0.74	0.00
	2	$R=0.63e^{10.43W}$	0.44	0.00	$R=0.03T^{1.47}$	0.35	0.00	$R=0.79e^{0.42T}W^{0.78}$	0.61	0.00

注:表中样地 1 为土壤总呼吸速率与土壤温度与水分间的回归方程;样地 2 为土壤异养呼吸与土壤温度与水分间的回归方程。

### 3 结论与讨论

(1) 土壤呼吸动态特征。各样地土壤呼吸均呈现出明显的季节变化规律,但日变化趋势却各不相同,这与其他相关研究<sup>[6,18-21]</sup>结果一致。南排 3 号(S<sub>III</sub>)、南排 4 号(S<sub>IV</sub>)及西排一号(W)样地土壤呼吸日动态一致性较差,规律不明显,主要是因为土壤呼吸除受土壤温度的驱动外,也受植被类型、立地条件、地形的影响较大。南排五号(S<sub>V</sub>)样地较其他样地土壤总呼吸、异养呼吸月均值高,这主要是因为刺槐纯林年际凋落物量要高于针阔混交林,且平台有利于腐殖质的形成。腐殖质层厚,土壤有机质就相对较丰富,有利于土壤微生物的生长。各样地土壤呼吸在去根系后明显下降,平均下降幅度为 19%~46%,这一结果与其它温带地区的研究很相近<sup>[22-23]</sup>。自养呼吸贡献率受植被类型、物种组成、植被碳分配、植被根系特征、土壤水热状况等因子<sup>[24-25]</sup>的综合影响。西排一号样地自养呼吸较其他样地低,这可能与该生态系统主要以针叶林为主,林分密度低,根系生物量和生产力较低有关,这与 Burton<sup>[26]</sup>等对不同北美森林生态系统的根呼吸研究结果相同。

(2) 土壤呼吸与环境因子的相关性。本研究中,土壤呼吸和土壤温度及水分的双因子拟合方程相关指数较单因子拟合均有一定程度的提高,表明把土壤水分因子增加到土壤呼吸与土壤温度的函数关系中可以提高土壤呼吸的预测准确性,这与大多数研究结果一致<sup>[27-28]</sup>。无论是土壤总呼吸还是异养呼吸均与土壤温度、土壤水分、双因子呈幂或指数函数关系,与一些人工生态系统<sup>[29-31]</sup>土壤呼吸与土壤温度、水分的相关关系有所差异。这可能与研究区域自然条件有关,不同的生态系统中水分对土壤呼吸的影响方向和程度有很大的差别,在土壤水分不成为限制因子的条

件下,土壤呼吸与土壤温度呈正相关,而在水分成为限制因子的干旱、半干旱地区,土壤呼吸受土壤水分和温度的共同影响,且土壤呼吸与温度和水分之间的关系变得较为复杂<sup>[9,32]</sup>。

(3) 土壤呼吸是一个复杂的过程,需要长期动态监测。土壤呼吸受多种因素的共同影响,包括土壤温度、土壤水分、植被类型、土壤有机质、净生态系统生产力(NEP)、地上和地下生物量的分配、种群和群落的相互作用和人类干扰等<sup>[33]</sup>。本文仅重点研究了土壤温度与水分对土壤呼吸的影响,未能全面反映出各样地土壤呼吸的动态特征,在今后的研究中应加强土壤有机质、植被类型、土壤微生物与土壤呼吸关系的研究,为进一步探讨植被与土壤的关系及人工生态系统碳循环提供基础数据。

致谢:本研究得到了平朔煤业有限公司领导与工作人员的大力配合及山西省生物研究所崔国良师傅的协助,特此致谢!

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 曹裕松,李志安,江远清,等. 陆地生态系统土壤呼吸研究进展[J]. 江西农业大学学报,2004,26(1):138-143.
- [2] 唐凯,丁丽佳,陈往溪. 土壤呼吸研究概述[J]. 广东气象,2008,30(3):36-38.
- [3] Jakub H, Ladislav D, Jana K. Monitoring microbial biomass and respiration in different soils from the Czech Republic: A summary of results[J]. Environment International, 2004,30(1):19-30.
- [4] Nael M, Khademi H, Hajabbasi M A. Response of soil quality indicators and their spatial variability to land degradation in central Iran[J]. Applied Soil Ecology, 2004, 27(3):221-232.
- [5] Raich J W, Tufekciogul A. Vegetation and soil respira-

- tion: correlations and controls [J]. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1):71-90.
- [6] Sanchez M L, Ozores M I, Colle R, et al. Soil CO<sub>2</sub> fluxes in cereal land use of the Spanish plateau: Influence of conventional and reduced tillage practices [J]. *Chemosphere*, 2002, 47(8):837-844.
- [7] Fang C, Moncrieff J B. The dependence of soil CO<sub>2</sub> efflux on temperature [J]. *Biology and Biochemistry*, 2001, 33(2):155-165.
- [8] 崔玉亭, 韩纯儒, 卢进登. 集约高产农业生态系统有机物分解及土壤呼吸动态研究 [J]. *应用生态学报*, 1997, 8(1):59-64.
- [9] 李凌浩, 王其兵, 白永飞, 等. 锡林河流域羊草草原群落土壤呼吸及其影响因子的研究 [J]. *植物生态学报*, 2000, 24(6):680-686.
- [10] Jia Bingrui, Zhou G, Wang Y, et al. Effects of temperature and soil water-content on soil respiration of grazed and ungrazed *Leymus chinensis* steppes Inner Mongolia [J]. *Journal of Arid Environments*, 2006, 67(1):60-76.
- [11] Heneghan L, Miller S P, Baer S, et al. Integrating soil ecological knowledge into restoration management [J]. *Restoration Ecology*, 2008, 16(4):608-617.
- [12] 卞正富. 矿区开采沉陷农用土地质量空间变化研究 [J]. *中国矿业大学学报*, 2004, 33(2):213-218.
- [13] 笪建原, 张绍良, 王辉, 等. 高潜水位矿区耕地质量演变规律研究: 以徐州矿区为例 [J]. *中国矿业大学学报*, 2005, 34(3):383-389.
- [14] Li Suqing, Yang Binsheng, Wu Dongmei. Community succession analysis of naturally colonized plants on coal gob piles in Shanxi mining areas, China [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2008, 193(1/2/3/4):211-228.
- [15] 许建伟, 李晋川, 白中科, 等. 黄土区大型露天矿复垦地土壤对植物多样性的影响研究: 以平朔安太堡露天矿排土场为例 [J]. *山西农业科学*, 2010, 38(4):48-51.
- [16] 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.
- [17] Conant R T, Klopatek J M, Klopatek C C. Environmental factors controlling soil respiration in three semi-arid ecosystems [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64(1):383-390.
- [18] 杨晶, 黄建辉, 詹学明, 等. 农牧交错区不同植物群落土壤呼吸日动态观测与测定方法比较 [J]. *植物生态学报*, 2004, 28(3):318-325.
- [19] Bo E. Seasonal trends of soil CO<sub>2</sub> dynamics in a soil subject to freezing [J]. *Journal of Hydrology*, 2003, 276(1):159-175.
- [20] Lee M S, Nakane K, Nakatsubo T. Seasonal change in the contribution of root respiration to total soil respiration in a cool-temperate deciduous forest [J]. *Plant and Soil*, 2003, 225(1):311-318.
- [21] 陈全胜, 李凌浩, 韩兴国, 等. 典型温带草原群落土壤呼吸温度敏感性与土壤水分的关系 [J]. *生态学报*, 2004, 24(4):831-836.
- [22] Bowden R D, Nadelhoffer K J, Boone R D. Contribution of aboveground litter, belowground litter, and root respiration total soil respiration in a temperate mixed hardwood forest [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 1993, 23(7):1402-1407.
- [23] Striegl R G, Wickland K P. Effects of a clear cut harvest on soil respiration in a jack pine-lichen woodland [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 1998, 28(4):534-539.
- [24] Gower S T, Krankina O N, Olson R J, et al. Net primary production and carbon allocation patterns of boreal forest ecosystems [J]. *Ecological Applications*, 2001, 11(5):1395-1411.
- [25] Höglberg P, Nordgren A, Ågren G I. Carbon allocation between tree root growth and root respiration in boreal pine forest [J]. *Oecologia*, 2002, 132(4):579-581.
- [26] Burton A J, Pregitzer K S, Ruess R W, et al. Root respiration in North American forests: Effects of nitrogen concentration and temperature across biomes [J]. *Oecologia*, 2002, 131(4):559-568.
- [27] Gaumont G, Andrew B T, Griffins T J. Interpreting the dependence of soil respiration on soil temperature and water content in a boreal aspen stand [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 140(1):220-235.
- [28] Janssens I, Pilegaard K. Large seasonal change in Q<sub>10</sub> of soil respiration in a beech forest [J]. *Global Change Biology*, 2003, 9(6):911-918.
- [29] 李红生, 刘广全, 王鸿喆, 等. 黄土高原四种人工植物群落土壤呼吸季节变化及其影响因子 [J]. *生态学报*, 2008, 28(9):4099-4106.
- [30] 朱凡, 王光军, 田大伦, 等. 杉木人工林去除根系土壤呼吸的季节变化及影响因子 [J]. *生态学报*, 2010, 30(9):2499-2506.
- [31] 高会议, 郭胜利, 刘文兆. 黄土旱塬裸地土壤呼吸特征及其影响因子 [J]. *生态学报*, 2011, 31(18):5217-5224.
- [32] Ma Siyan, Chen Jiquan, John R. Biophysical controls on soil respiration in the dominant patch types of an old-growth, mixed-conifer forest [J]. *Forest Science*, 2005, 51(3):221-232.
- [33] Rustad L E, Huntington T G, Boone R D. Controls on soil respiration: Implications for climate change [J]. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1):1-6.