

# 山西省孝义矿区不同植被恢复方式下 土壤呼吸、温度和水分季节特征

李君剑, 温亮, 韩广, 赵溪, 严俊霞, 王健, 李洪建

(山西大学黄土高原研究所, 山西太原 030006)

**摘要:** 对山西省孝义露天煤矿覆土, 种植百脉根、苜蓿、柳树—圆柏混交林和油松林土壤的容重、pH 值、有机碳、总氮以及土壤呼吸、温度、和水分季节变化进行了测定, 并对土壤呼吸与土壤温度、水分之间的关系进行了模拟分析。结果表明, 不同的植被恢复方式对土壤容重、有机碳、碳氮比和土壤呼吸年均值影响较大, 而对土壤 pH 值和总氮未产生显著影响。土壤温度季节变化曲线为单峰, 高斯拟合结果为极显著水平相关; 土壤水分随季节波动较大; 土壤呼吸季节变化近似于单峰曲线, 但高斯拟合的相关性并不显著。苜蓿地土壤呼吸与土壤温度单因子的高斯拟合, 以及与土壤温度和水分的双因子拟合系数较高, 而百脉根和油松林土壤呼吸与土壤水分相关性较强。

**关键词:** 植被恢复方式; 土壤呼吸; 土壤温度; 土壤水分; 关系模型

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2012)03-0056-06

中图分类号: Q142

## Seasonal Characteristics of Soil Respiration, Temperature and Moisture Under Different Regeneration Scenarios in Xiaoyi Mining Area of Shanxi Province

LI Jun-jian, WEN Liang, HAN Guang, ZHAO Xi, YAN Jun-xia, WANG Jian, LI Hong-jian

(Institute of Loess Plateau, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China)

**Abstract:** The research was carried out in Xiaoyi open pit coal mine. Soil bulk density, pH value, organic carbon and total nitrogen, as well as the seasonal variations of soil respiration, temperature and water content, were measured under *Lotus corniculatus*, *Medicago sativa*, *Salix matsudana*, *Sabina chinensis* mixed forest and *Pinus tabulaeformis* plantations. In addition, the relations of soil respiration to temperature and water content were simulated. Results show that significant differences in soil bulk density, soil organic carbon, ratio of carbon to nitrogen and average annual soil respiration are found under different vegetation types, but not significant in soil pH value and total nitrogen. Seasonal variation of soil temperature shows a single curve over season and correlation for Guassian fitting is significant. Soil water content fluctuates with season. Seasonal variation of soil respiration approximately manifests a single peak, but correlation for Guassian fitting is not significant. Higher regression coefficient is found for the relationship between soil respiration and temperature when fitted with Guassian equation and for the relationships between soil respiration and the two variables of temperature and soil water content with linear and nonlinear equations in *M. sativa*. And a stronger exponential relationship between soil respiration and water content is found in both *L. corniculatus* and *P. tabulaeformis*.

**Keywords:** regeneration scenarios; soil respiration; soil temperature; soil moisture; correlation model

土壤呼吸包括 3 个生物学过程, 即土壤微生物呼吸、根系呼吸、土壤动物呼吸, 和一个非生物学过程, 即含碳矿物质的化学氧化作用, 它是陆地生态系统和大气生态系统之间碳转移的主要途径, 在生态系统的碳平衡中扮演着重要角色<sup>[1]</sup>。

土壤呼吸受植被、气候、时空、温度、水分以及人为等因素影响, 大多数报道认为对土壤呼吸影响的主要因素是土壤温度和水分<sup>[2-3]</sup>, 其间的关系一直是土壤科学工作者研究的重点之一, 常用各种关系模型进行描述<sup>[4]</sup>。国内外的土壤呼吸研究主要集中在草原、

收稿日期: 2011-06-23

修回日期: 2011-09-09

资助项目: 国家科技支撑计划项目“宜农工矿废弃地固碳技术与示范”(2008BAD95B04); 山西省农业攻关资助项目“山西矿区废弃地景观与植被重建技术研究”(2008-03-11075)

作者简介: 李君剑(1975—), 男(汉族), 山西省汾阳市人, 博士, 研究方向为土壤生态学。E-mail: lijunjian@sxu.edu.cn.

通信作者: 李洪建(1958—), 男(汉族), 山西省洪洞市人, 博士, 教授, 研究方向为自然地理科学。E-mail: hongli@sxu.edu.cn.

林地和湿地等生态系统的碳通量对大气温室气体浓度增加的影响,及土壤呼吸与环境因子间相关性方面<sup>[5-6]</sup>,而关于生态环境脆弱的工矿废弃地土壤呼吸的研究较少。

土壤呼吸强度可反映土壤中有机质的分解和土壤微生物总的活性,对所在地生态系统的初级生产力产生较大影响,是评价土壤质量的一项重要指标<sup>[7]</sup>。目前在脆弱生态系统恢复之后的土壤理化性质等质量特征及植被群落的演替特征方面均有较为详尽的研究报道<sup>[8-10]</sup>,而对于煤矿废弃地不同复垦方式对土壤呼吸影响的研究甚少。

本文将以山西省孝义露天煤矿苜蓿、百脉根、油松和柳树—圆柏4种植被恢复后复垦地作为研究对象,分析不同植被恢复方式对土壤呼吸差异性、土壤呼吸季节变化的影响以及土壤呼吸与土壤温度和水分之间的相关性,该研究有助于全面了解矿区废弃地恢复后的生态效应,可为矿区废弃地的生态恢复模式筛选和恢复效果评价提供科学依据。

## 1 研究区概况与研究方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于吕梁山脉东翼低山丘陵地带,构造剥蚀剧烈,地势大体西高东低,地表黄土覆盖,沟谷切割土梁冲沟发育,地理坐标为北纬 $37^{\circ}09'4''$ ,东经 $111^{\circ}31'1''$ ,海拔995 m。用于本研究的4个样地均是露天开采后,2009年矿区覆土,分别播种百脉根(播种量 $5\text{ kg/hm}^2$ )和苜蓿(播种量 $10\text{ kg/hm}^2$ ),栽植柳树—圆柏混交林(柳树和圆柏的苗龄分别为7 a和5 a,间距 $2\text{ m}\times 2\text{ m}$ )和油松林(苗龄5 a,间距 $2\text{ m}\times 2\text{ m}$ )。

### 1.2 样品采集

土壤呼吸用LI-6400便携式光合作用系统连接6400-09箱室测定,在测定区域随机选取6个固定点,间距约 $2\sim 3\text{ m}$ ,提前1 d放置PVC环(内径 $10.5\text{ cm}$ ,高 $4.5\text{ cm}$ )土壤 $2\text{ cm}$ 深左右,土壤环长期定位放置。测定时间为2010年6—11月。土壤 $10\text{ cm}$ 处温度用LI-6400系统自带的土壤温度探针测定。8月分别在百脉根、苜蓿、混交林和油松林采样,用土钻采用多点混合土样样品处理法,去除地表植被和覆盖物,每个样地随机取6个样点挖穴( $0\sim 10\text{ cm}$ )并混匀。一部分带回实验室自然风干,研磨过 $2\text{ mm}$ 筛备用;另一部分 $105^{\circ}\text{C}$ 烘干用于测定土壤含水量。

### 1.3 样品分析

土壤容重采用环刀法;土壤颗粒径级组成采用比重计法;pH值采用 $1:5$ 土和水溶液测定;土壤有机

碳采用重铬酸钾氧化法;总氮采用凯氏定氮法。

### 1.4 数据分析

方差分析用于检验样地间土壤理化性质和土壤呼吸速率的差异性。

土壤呼吸( $R_s$ )和土壤温度( $T_s$ )的季节变化与测定天数( $D$ )的关系用高斯参数方程拟合:

$$R_s(T_s) = a \exp[-0.5((D+b)/c)^2] \quad (1)$$

式中: $a, b, c$ ——拟合参数。下同。

土壤呼吸与土壤温度和土壤水分之间的关系分两步进行分析。用线性和非线性方程分析土壤呼吸和土壤温度及水分( $W_s$ )的单因子关系。方程如下:

$$R_s = a + bT_s \quad (2)$$

$$R_s = a \exp(bT_s) \quad (3)$$

$$R_s = a \exp[-0.5(T_s + b)/c]^2 \quad (4)$$

$$R_s = a + bW_s \quad (5)$$

$$R_s = a \exp(bW_s) \quad (6)$$

然后,用以下关系方程分析土壤呼吸与土壤温度和水分的关系:

$$R_s = a + b(T_s W_s) \quad (7)$$

$$R_s = a T_s^b W_s^c \quad (8)$$

$$R_s = a \exp(bT_s) W_s^c \quad (9)$$

在以上复合关系方程中,我们引入新的变量,即土壤温度与土壤水分的乘积( $T_s W_s$ ),用来研究土壤呼吸与温度水分的复合关系。

## 2 结果

### 2.1 土壤碳氮含量

从表1可以看出,土壤容重因植被不同而有所差异,苜蓿地和混交林的土壤容重分别为最小值和最大值,且与其他样地间显著不同。不同植被恢复方式并未造成样地土壤pH值间显著的差异性。不同植被恢复后的土壤有机碳之间存在较大的差异,其中油松林的土壤有机碳含量为 $1.68\text{ g/kg}$ ,显著低于其他3个样地;苜蓿样地土壤有机碳为 $2.29\text{ g/kg}$ ,与其他3个样地间存在显著差异;百脉根和混交林样地的土壤有机碳含量分别为 $2.61\text{ g/kg}$ 和 $2.73\text{ g/kg}$ ,显著高于其他2个样地。

4个样地的土壤总氮含量在 $0.33\sim 0.35\text{ g/kg}$ ,之间均无显著的差异性。样地间的碳氮比差异性与土壤有机碳之间的差异性较为相近,其中油松林的土壤碳氮比为 $4.95$ ,显著低于其他样地;百脉根与苜蓿、混交林之间差异不显著,而苜蓿和混交林之间差异显著。苜蓿样地的土壤呼吸年均值为 $4.52\text{ }\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,显著高于其他3个样地。

### 2.2 土壤温度、水分的季节变化

受气候条件变化的影响,测定期间土壤温度和水

分均表现出明显的季节变化特征(图 1)。土壤温度基本呈现单峰曲线,最高温度出现在 8 月,土壤温度和天数之间高斯拟合均达到了极显著水平,其中混交林拟合系数最高为 0.97。

各样地土壤水分含量在整个测定期内呈现高、低交替波动趋势,在 7 月以前,土壤水分含量变化幅度较大,最低含水量出现在 6、7 月。7 月以后土壤含水量变化趋于平缓。

表 1 不同植被恢复方式下的土壤理化性质

| 植被类型 | 容重/<br>( $g \cdot cm^{-3}$ ) | pH 值             | 有机碳/<br>( $g \cdot kg^{-1}$ ) | 总氮/<br>( $g \cdot kg^{-1}$ ) | 碳氮比               | 土壤呼吸年均值/<br>( $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ ) |
|------|------------------------------|------------------|-------------------------------|------------------------------|-------------------|---|
| 百脉根  | $1.20 \pm 0.38b$             | $7.96 \pm 0.01a$ | $2.61 \pm 0.13c$              | $0.33 \pm 0.005a$            | $7.85 \pm 0.45bc$ | $1.86 \pm 1.59a$                                    |
| 苜蓿   | $1.01 \pm 0.54a$             | $8.01 \pm 0.06a$ | $2.29 \pm 0.28b$              | $0.35 \pm 0.006a$            | $6.61 \pm 0.74b$  | $4.52 \pm 2.30b$                                    |
| 混交林  | $1.35 \pm 0.43c$             | $8.14 \pm 0.11a$ | $2.73 \pm 0.34c$              | $0.33 \pm 0.013a$            | $8.16 \pm 0.72c$  | $1.88 \pm 1.09a$                                    |
| 油松   | $1.17 \pm 0.74b$             | $7.95 \pm 0.01a$ | $1.68 \pm 0.23a$              | $0.34 \pm 0.003a$            | $4.95 \pm 0.70a$  | $1.99 \pm 1.39a$                                    |

注:表中数值为平均值±标准偏差,不同字母表示样地间  $p < 0.05$  水平上差异显著。

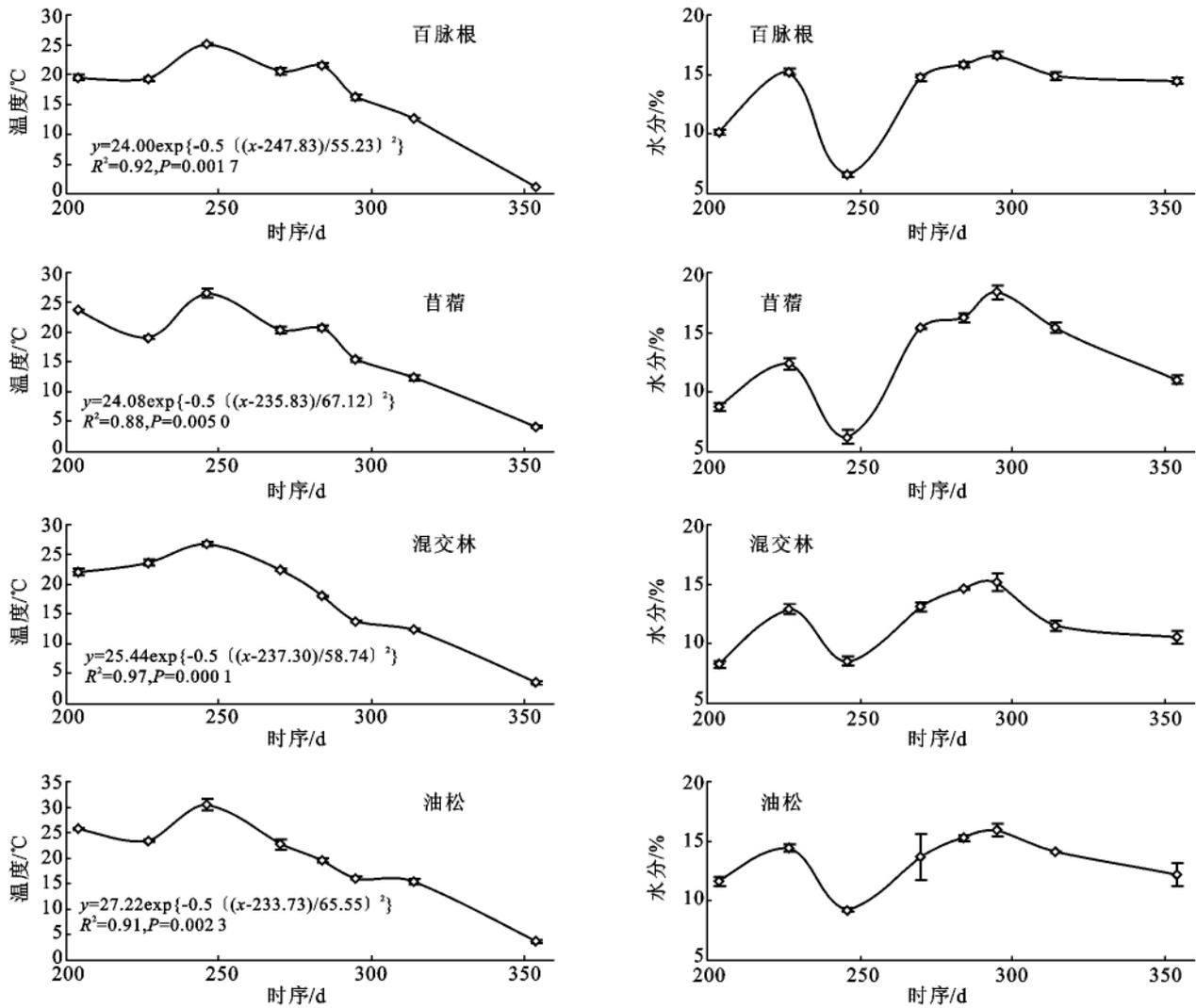


图 1 不同植被恢复类型土壤温度和水分季节变化

### 2.3 土壤呼吸的季节变化

从图 2 可以看出,土壤呼吸强度随季节变化呈现较大幅度的变化,分别在 7 月中旬和 9 月下旬,苜蓿、混交林和油松林地的土壤呼吸强度出现 2 次峰值,百脉根也呈现基本相同的趋势,主要不同在于其第 1 峰值出现在了 8 月下旬。6 月上旬和 8 月上旬出现较小

值,这主要是由于受水分胁迫所致,而 11 月下旬出现最低值最主要是受温度胁迫(图 1)。

对土壤呼吸与测定天数进行高斯拟合,油松林地的拟合相关系数为 0.82,并达到显著水平,而其他 3 个样地的拟合均未达到显著水平,其中百脉根和混交林拟合系数最低。

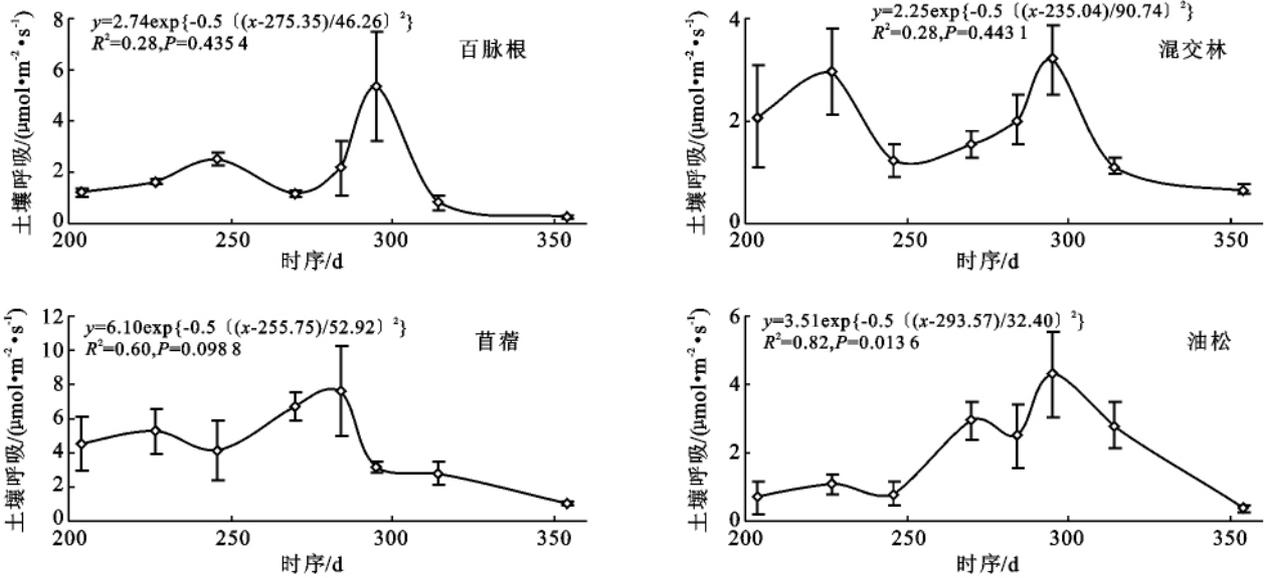


图 2 不同植被恢复类型土壤呼吸季节变化

2.4 土壤呼吸与土壤温度和水分的关系

土壤呼吸与土壤温度、水分之间单因子关系及其复合关系的拟合结果分别如表 2—4 所示。从表 2 中可看出,土壤呼吸与土壤温度之间线性和指数关系检

验均不显著,而对两者进行高斯曲线拟合时,发现苜蓿、油松及所有数据之间存在显著的相关性,其中对 4 个样地所有数据的相关性检测达到了极显著水平 ( $p < 0.01$ )。

表 2 土壤呼吸与土壤温度间拟合关系分析

| 植被类型 | $R_s = a + bT_s$ |       |       |         | $R_s = a\exp(bT_s)$ |      |       |         | $R_s = a\exp\{-0.5[(T_s + b)/c]^2\}$ |        |      |       |         |
|------|------------------|-------|-------|---------|---------------------|------|-------|---------|--------------------------------------|--------|------|-------|---------|
|      | a                | b     | $R^2$ | P       | a                   | b    | $R^2$ | P       | a                                    | b      | c    | $R^2$ | P       |
| 百脉根  | 0.08             | 0.57  | 0.13  | 0.376 1 | 0.97                | 0.04 | 0.10  | 0.430 4 | 5.13                                 | -16.39 | 2.11 | 0.36  | 0.321 6 |
| 苜蓿   | 0.72             | 0.21  | 0.68  | 0.062 4 | 2.11                | 0.04 | 0.37  | 0.108 6 | 6.31                                 | -20.82 | 5.73 | 0.83  | 0.012 8 |
| 混交林  | 1.14             | 0.04  | 0.12  | 0.409 9 | 1.34                | 0.02 | 0.09  | 0.463 5 | 2.39                                 | -18.15 | 8.95 | 0.39  | 0.289 4 |
| 油松   | 2.23             | -0.02 | 0.01  | 0.836 6 | 1.14                | 0.01 | 0.01  | 0.987 5 | 3.44                                 | -16.24 | 6.09 | 0.77  | 0.026 0 |
| 所有数据 | 1.35             | 0.06  | 0.06  | 0.160 2 | 1.77                | 0.02 | 0.05  | 0.238 1 | 3.44                                 | -18.72 | 7.08 | 0.27  | 0.009 6 |

注: a, b, c 均为拟合参数;  $R^2$  为相关系数; P 为置信水平。下同。

表 3 土壤呼吸与土壤水分间单拟合关系分析

| 植被类型 | $R_s = a + bW_s$ |      |       |         | $R_s = a\exp(bW_s)$ |      |       |         |
|------|------------------|------|-------|---------|---------------------|------|-------|---------|
|      | a                | b    | $R^2$ | P       | a                   | b    | $R^2$ | P       |
| 百脉根  | 1.07             | 0.06 | 0.02  | 0.757 7 | 0.00                | 0.97 | 0.52  | 0.043 6 |
| 苜蓿   | 3.02             | 0.11 | 0.04  | 0.623 6 | 3.20                | 0.02 | 0.04  | 0.625 9 |
| 混交林  | -0.33            | 0.18 | 0.29  | 0.167 8 | 0.41                | 0.12 | 0.34  | 0.125 3 |
| 油松   | -4.36            | 0.47 | 0.55  | 0.034 4 | 0.02                | 0.35 | 0.66  | 0.013 7 |
| 所有数据 | 0.61             | 0.15 | 0.06  | 0.174 5 | 0.75                | 0.09 | 0.09  | 0.102 2 |

表 4 土壤呼吸与土壤温度、水分间双因子拟合关系分析

| 植被类型 | $R_s = a + b(T_s, W_s)$ |       |       |         | $R_s = aT_s^b W_s^c$ |      |      |       |         | $R_s = a\exp(bT_s)W_s^c$ |      |      |       |         |
|------|-------------------------|-------|-------|---------|----------------------|------|------|-------|---------|--------------------------|------|------|-------|---------|
|      | a                       | b     | $R^2$ | P       | a                    | b    | c    | $R^2$ | P       | a                        | b    | c    | $R^2$ | P       |
| 百脉根  | 0.48                    | 0.010 | 0.17  | 0.307 2 | 0.110                | 0.73 | 0.27 | 0.62  | 0.086 2 | 0.030                    | 0.1  | 0.75 | 0.61  | 0.095 6 |
| 苜蓿   | 0.10                    | 0.020 | 0.71  | 0.008 9 | 0.060                | 1.02 | 0.53 | 0.89  | 0.004 4 | 0.070                    | 0.09 | 0.95 | 0.92  | 0.001 6 |
| 混交林  | 0.62                    | 0.010 | 0.34  | 0.125 2 | 0.030                | 0.52 | 1.09 | 0.63  | 0.086 1 | 0.030                    | 0.04 | 1.32 | 0.57  | 0.123 4 |
| 油松   | 0.94                    | 0.004 | 0.06  | 0.543 4 | 0.001                | 0.62 | 3.64 | 0.69  | 0.054 8 | 0.0001                   | 0.05 | 4.20 | 0.64  | 0.077 8 |
| 所有数据 | 0.68                    | 0.010 | 0.16  | 0.023 2 | 0.050                | 0.72 | 0.69 | 0.35  | 0.000 8 | 0.070                    | 0.06 | 0.91 | 0.25  | 0.014 2 |

表 3 是土壤呼吸与土壤水分之间的直线和指数关系分析,油松林土壤呼吸与土壤水分之间线性和指数关系均呈显著相关,其中指数相关系数较大;百脉根地土壤呼吸与土壤水分之间只有指数关系呈显著相关;而苜蓿和混交林中土壤呼吸和水分之间均不存在显著的线性和指数关系。用线性模型和非线性模型对土壤呼吸与土壤温度、水分的复合关系进行分析表明(表 4),苜蓿样地土壤呼吸与土壤温度、水分之间的线性和非线性模型均为极显著相关( $p < 0.01$ ),其中线性模型中相关系数最小,而指数—幂函数的相关系数最大;其他 3 个样地,土壤呼吸与土壤温度、水分之间的 3 个模型拟合水平均不显著,其中线性拟合关系最差,幂函数模型拟合关系最佳;而对 4 个样地所有数据进行模型分析结果显示,土壤呼吸与土壤温度、水分之间在 3 个模型中均为显著相关,相关系数最小值和最大值分别出现在线性模型和幂函数模型,且幂函数模型中呈极显著相关( $p < 0.01$ )。

### 3 讨论

研究表明,矿区经不同植被恢复后对土壤容重、有机碳含量和土壤呼吸速率影响的差异性较大,差异性最主要是由于不同植被的生长状况不同,耐贫瘠的苜蓿地生长最佳,地表覆盖率达 90% 以上,而同为草本的百脉根对营养条件要求高,生长较差(覆盖率只有 10% 左右),刚刚定植 2 a 的木本植物根系并不发达。关于土壤呼吸因植被类型而有所差异的报道也很多,通常认为草本土壤呼吸速率要高于乔木和灌木<sup>[1,11-12]</sup>。本研究中矿区不同植被恢复后,4 个样地的土壤呼吸的变化规律为波浪型,除油松林外,其他样地的土壤呼吸与天数的高斯拟合分析中均不显著相关,这与呈现于土壤温度与天数间极显著的相关性差别很大,土壤呼吸还受另一环境因子即土壤水分的影响,尤其在 7 月土壤水分成为了土壤呼吸速率的主要胁迫因子。而有研究报道土壤呼吸速率季节变化呈明显的单峰曲线<sup>[12-15]</sup>,与本文研究结果有所不同的主要原因是土壤水分对土壤呼吸影响的差异性,在黄土高原地区降雨量较少且分布不均匀,因此经常成为土壤呼吸的胁迫因子。

在土壤呼吸与土壤温度、水分的关系模型拟合中,发现土壤温度和水分协同影响土壤呼吸速率。土壤呼吸与土壤温度间线性和指数关系均不显著相关,而高斯模型拟合相关系数较高,苜蓿和油松林中呈显著相关,说明土壤温度对土壤呼吸只呈现促进作用,在对内蒙古半干旱草原的土壤呼吸研究中有类似现象<sup>[5,16]</sup>。样地覆盖率较低的油松林和百脉根中土

壤呼吸与土壤水分之间相关性较强,这是由于在同样的降水条件下,覆盖率低的样地蒸发强烈,土壤水分更易处于干旱胁迫状态,抑制土壤微生物和根系代谢活动,从而导致土壤温度对土壤呼吸的作用降低,土壤水分对土壤呼吸影响更为重要<sup>[4,17]</sup>。

土壤呼吸可用土壤温度和水分的双因子模型建立较好的土壤呼吸关系模型<sup>[18-19]</sup>。Epron 等<sup>[20]</sup>用指数、阿列纽斯和幂函数研究土壤呼吸速率与土壤温度和水分的关系,结果表明,把土壤水分作为一个线性变量加到土壤呼吸速率与土壤温度的关系方程中,相关系数  $R^2$  值从 0.56 提高至 0.72。本研究中,对于某一具体样地来说,双因子模型的相关系数并不一定比单因子的有所提高,但对所有数据进行分析时,双因子模型的相关系数得到一定的提高,尤其是非线性模型。覆盖率较高的苜蓿样地土壤呼吸与土壤温度、水分之间的拟合模型较好,这可能与其较好的持水能力相关。可推断随着植被恢复年限的延长,植被覆盖率提高,土壤持水能力提高,不同植被土壤呼吸与土壤温度和水分的协同关系将有所提高。

### 4 结论

孝义矿区经不同的植被恢复后,混交林的土壤容重、有机碳和碳氮比显著高于其他 3 个样地,苜蓿土壤呼吸年均值显著高于其他 3 个样地;而土壤 pH 值和总氮在不同恢复方式下差异并不显著。土壤温度和呼吸的季节变化呈单峰曲线,其中土壤温度季节变化高斯拟合为极显著水平相关,而土壤呼吸高斯拟合并不显著;土壤水分随季节的变化没有一定的规律。土壤呼吸和温度、水分之间的单因子及双因子的拟合分析表明,苜蓿地土壤呼吸与温度及水分的单双因子拟合系数较高;土壤水分是影响土壤呼吸季节变化的主要因子。

#### [参 考 文 献]

- [1] Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to climate [J]. *Tellus*, 1992,44B(1):81-89.
- [2] Lee X, Wu H, Sigler J, et al. Rapid and transient response of soil respiration to rain[J]. *Global Change Biology*, 2004,10(6):1017-1026.
- [3] Conant R T, Dalla-Bett P, Klopatek C C, et al. Controls on soil respiration in semiarid soils [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004,36(6):945-951.
- [4] Gaumont-Guay D, Andrew B T, Griffis T J, et al. Interpreting the dependence of soil respiration on soil temperature and water content in a boreal aspen stand [J].

- Agricultural and Forest Meteorology, 2006, 140(2): 220-235.
- [5] 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.
- [6] Jia B, 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.
- [7] 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.
- [8] Heneghan L M S P, Baer S, Callahan M A, et al. Integrating soil ecological knowledge into restoration management [J]. Restoration Ecology, 2008, 16(4): 608-617.
- [9] 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 & Soil Pollution, 2008, 193(1/4): 211-228.
- [10] 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.
- [11] 孙倩,方海兰,刘鸣达,等. 上海典型植物群落冬季土壤呼吸特征及其影响因子[J]. 上海交通大学学报:农业科学版, 2009, 27(3): 231-234.
- [12] 张鸽香,徐娇,王国兵,等. 南京城市公园绿地不同植被类型土壤呼吸的变化[J]. 生态学杂志, 2010, 29(2): 274-280.
- [13] Khomik M, Arain M, McCaughey J H. Temporal and spatial variability of soil respiration in a boreal mixed-wood forest [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2006, 140(2): 244-256.
- [14] Flanagan L B, Johnson B G. Interacting effects of temperature, soil moisture and plant biomass production on ecosystem respiration in a northern temperate grassland [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2005, 130(3): 237-253.
- [15] Wiseman P E, Seiler J R. Soil CO<sub>2</sub> efflux across four age classes of plantation loblolly pine (*Pinus taeda* L.) on the Virginia Piedmont [J]. Forest Ecology and Management, 2004, 192(2): 297-311.
- [16] 陈全胜,韩兴国,阎志丹,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.
- [17] Dilustro J, Collins B, Duincan L, et al. Moisture and soil texture effects on soil CO<sub>2</sub> efflux components in southeastern mixed pine forests [J]. Forest Ecology and Management, 2005, 204(1): 85-95.
- [18] Shibistova O, Llody J, Evgrafova S, et al. Seasonal and spatial variability in soil efflux rates for a central Siberian *Pinus sylvestris* forest [J]. Tellus, 2002, 54B(5): 552-567.
- [19] Xu Ming, Qi Ye. Soil-surface CO<sub>2</sub> efflux and its spatial and temporal variation in a young ponderosa pine plantation in northern California [J]. Global Change Biology, 2001, 7(6): 667-677.
- [20] Epron D, Ngao J, Granier A. Interannual variation of soil respiration in a beach forest ecosystem over a six-year study [J]. Annals of Forest Science, 2004, 61(6): 499-505.

(上接第36页)

- [7] 王金龙,高玉葆,白宇. 大针茅和克氏针茅对 PEG 渗透胁迫适应性反应的比较研究[J]. 南开大学学报:自然科学版, 2005, 38(4): 127-131.
- [8] Michael B E, Kaufmann M R. The osmotic potential of polyethylene glycol 6000 [J]. Plant Physiology, 1973, 51(5): 914-916.
- [9] 王赞,李源,吴欣明,等. PEG 渗透胁迫下鸭茅种子萌发特性及抗旱性鉴定[J]. 中国草地学报, 2008, 30(1): 50-55.
- [10] 魏永胜,梁宗锁,山仑,等. 利用隶属函数值法评价苜蓿抗旱性[J]. 草业科学, 2005, 22(6): 33-36.
- [11] 陈晓远,罗远培,石元春. 作物对水分胁迫的反应[J]. 生态农业研究, 1998, 6(4): 12-15.
- [12] Nathawat N S, Nair J S, Kumawat S M, et al. Effect of seed soaking with thiols on the antioxidant enzymes and photosystem activities in wheat subjected to water stress [J]. Biologia Plantarum, 2007, 51(1): 93-97.
- [13] 秦文静,梁宗锁. 四种豆科牧草萌发期对干旱胁迫的响应及抗旱性评价[J]. 草业学报, 2010, 19(4): 61-70.
- [14] 刘杰,刘公社,齐冬梅,等. 聚乙二醇处理对羊草种子萌发及活性氧代谢的影响[J]. 草业学报, 2002, 11(1): 59-64.
- [15] 焦树英,李永强,沙依拉·沙尔合提,等. 干旱胁迫对3种狼尾草种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 西北植物学报, 2009, 29(2): 308-313.
- [16] Pilet O E, Saugy M. Effect of applied and endogenous indol-3-acetic acid on maize root growth [J]. Planta, 1985, 164(2): 254-258.
- [17] 孙景宽,李田,夏江宝,等. 干旱胁迫对沙枣幼苗根茎叶生长及光合色素的影响[J]. 水土保持通报, 2011, 31(1): 68-71.