

大通煤矸石充填复垦区不同植被类型土壤碳排放动态

姚多喜^{1,2}, 赵魁¹, 张治国^{1,2}, 杨清¹, 安士凯², 张文影¹

(1. 安徽理工大学 地球与环境学院, 安徽 淮南 232001; 2. 淮南煤炭工程技术研究院 生态环境研究室, 安徽 淮南 232001)

摘要: 2011 年 7 月至 2012 年 3 月, 利用 LI-8100 土壤 CO₂ 通量系统测定了淮南市大通煤矸石充填复垦区草地、灌丛、小乔木林、大乔木林土壤呼吸强度及其相关影响因子。结果显示, 煤矸石充填复垦区 4 种植被类型下土壤呼吸强度的昼夜及季节变化均呈单峰曲线形式, 最大值出现在夏季的 12:00—16:00 间, 最小值出现在冬季的 4:00 左右; 不同植被类型下土壤呼吸强度差异显著 ($p < 0.05$), 且土壤呼吸强度有强到弱的顺序呈现: 草地 > 灌丛 > 小乔木林 > 大乔木林。4 种植被土壤 CO₂-C 年释放通量分别为 (999.74 ± 62.26) g/(m² · a), (908.49 ± 72.41) g/(m² · a), (869.22 ± 56.23) g/(m² · a), (726.10 ± 63.01) g/(m² · a), 故考虑植被的碳减排效应, 在煤矸石充填复垦区可以多种植乔木、灌木, 而尽量少植人工草坪; 复垦区土壤呼吸除受植被类型影响外, 主要受 10 cm 土层土壤温度的影响, 各植被类型土壤呼吸强度对土壤温度的指数模型均可以解释 88% 以上的土壤呼吸变异; 草地、灌丛、小乔木林、大乔木林碳排放对温度的敏感性 Q₁₀ 值分别为: 2.57, 2.71, 2.96 和 3.67。

关键词: 煤矸石; 复垦区; 碳排放量; 植被类型; 土壤呼吸

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2013)02-0030-05

中图分类号: S154.4

Soil Carbon Discharge Dynamics of Different Vegetation Types in Datong Reclamation District Filled with Coal Gange

YAO Duo-xi^{1,2}, ZHAO Kui¹, ZHANG Zhi-guo^{1,2}, YANG Qing¹, AN Shi-kai², ZHANG Wen-ying¹

(1. School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, China;

2. Department of Ecology and Environment, Coal Engineering Technology Research Institute, Huainan, Anhui 232001, China)

Abstract: Soil respiration rates as well as soil temperature and moisture for four types of vegetation (grassland, bushes, small arbors, arbors) were monitored with Li-8100 automated soil CO₂ flux systems at the reclamation district filled with coal gange, which is located in Datong district of Huainan City, from July 2011 to March 2012. The results indicated that diurnal variations of soil respiration for the four types of vegetation showed a mode of single peak curve with the maximum value appearing in summer between 12:00 and 16:00 and the minimum value appearing in winter around 4:00 AM. The soil respiration under different vegetation types differed significantly ($p < 0.05$), and its rates followed a decreasing order in vegetation types as grassland, shrubs, small arbors and arbors. The annual emission of soil CO₂ for four types of vegetation were 999.74 ± 62.26, 908.49 ± 72.41, 869.22 ± 56.23 and 726.10 ± 63.01 g/(m² · a), respectively. Considering the carbon emission reduction effects, arbors, small arbors and shrubs instead of grassland should be planted in the study area. In addition to vegetation types, soil respiration of the area were affected by soil temperature at the depth of 10 cm. The relationship between soil respiration and soil temperature was described well by an exponential equation, which explains more than 88% of the variance of soil respiration. The Q₁₀ (index of sensitivity) values of grassland, bushes, small arbors and arbors were 2.57, 2.71, 2.96 and 3.67 respectively.

Keywords: coal gange; reclamation district; carbon emissions; vegetation type; soil respiration

在已发现的温室气体中, CO₂ 所产生的温室效应占总温室效应的 63%^[1], 被认为是最重要的温室气体。全球主要有 4 大碳库: 大气圈、陆地生物圈、水

圈、岩石圈^[2], 岩石圈及水圈碳库碳储量巨大, 占总量的 99.55% 以上, 但这两个碳库被封存在岩石及海洋深处, 碳的循环极其缓慢^[2]; 陆地生物圈中的碳主要

收稿日期: 2012-08-24

修回日期: 2012-09-13

资助项目: 淮南矿业集团 2011 年科学技术项目“采煤沉陷区植物再造及碳减排效应研究”(HNKY-JT-JS-2011)

作者简介: 姚多喜(1960—), 男(汉族), 安徽省淮南市人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事矿山土壤生态研究。E-mail: dxyao@aust.cn.

分布于陆地植被和土壤中,其中土壤释放 CO_2 (即土壤呼吸) 大约每年 $50\sim 76 \text{ PgC}^{[3]}$, 是陆地生态系统和大气之间 CO_2 交换的主要途径^[4], 土壤碳库有一个较小的波动, 大气中 CO_2 浓度就会有一个较大的变化^[5]。煤矸石充填复垦, 将大量的碳储存到土壤, 在一定程度上弥补了岩石圈碳库扰动带来的碳平衡的破坏, 但同一复垦区不同的植被类型, 其土壤的生化环境不尽相同^[6], 土壤碳释放的速率也就不同, 对煤矸石复垦区不同植被类型下土壤碳排放特征的研究, 有助于筛选出适应于煤矸石充填复垦区生长的碳减排植被, 为复垦区碳减排的研究应用提供依据。对不同植被类型土壤碳排放的研究, 多是对农田或自然植被^[7-11], 对复垦区土壤, 特别是煤矸石充填复垦后不同植被类型土壤碳排放的研究还未多见。本研究以大通煤矸石充填复垦区 4 种植被类型(草地、灌丛、小乔木林、大乔木林)的样地为研究对象, 对各样地土壤呼吸及强度其相关影响因子为期 1 a 的监测, 希望能了解煤矸石充填复垦区不同植被昼夜、季节碳排放动态, 掌握影响煤矸石充填复垦区土壤碳排放的主要环境因子及影响程度, 并根据不同植被土壤碳的排放情况的比较, 筛选出适于煤矸石充填复垦区生长的碳减排植被类型。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

大通煤矸石充填复垦区地处淮南市东部 ($32^{\circ}37'N$, $117^{\circ}01'E$), 是对原泉大资源枯竭矿区采用煤矸石充填覆土后进行生态环境修复所形成的生态示范区, 该区为暖温带气候, 年平均气温 15.3°C , 年降水量 918 mm , 占地面积约 3.38 km^2 , 覆土为黄棕壤, 质地为黏壤土, 土壤有机质为 $1\%\sim 3\%$, 可溶性有机碳含量为 $0.75\sim 1.4 \text{ mg/g}$, pH 值为 $7.4\sim 8.5$ 。选择复垦区大乔木林、小乔木林、灌丛、草地这 4 种植被类型为研究对象, 其中每种植被类型选择 4 种代表性植被作为测点。大乔木林主要代表性树种为: 樟树 (*Cinnamomum camphora*)、高杆女贞 (*Ligustrum lucidum* Aiton)、臭椿 (*Ailanthus altissima*)、水杉 (*Metasequoia glyptostroboides*), 平均种植密度为 $1143 \text{ 株}/\text{hm}^2$ ($2.5 \text{ m}\times 3.5 \text{ m}$), 平均株高为 12.1 , 平均覆盖度为 0.8 , 平均生物量为 $115.30 \text{ t}/\text{hm}^2$, 树下有碎米荠 (*Cardamine hirsuta*)、节节麦 (*Aegilops triuncialis*)、小飞蓬 (*Conyza canadensis*) 等杂草; 小乔木林主要有桂花 (*Osmanthus fragrans*)、木芙蓉 (*Cottonrose hibiscus*)、蚊母树 (*Distylium racemosum*)、石楠 (*Photinia serrulata*), 平均种植密度为

$1667 \text{ 株}/\text{hm}^2$ ($2 \text{ m}\times 3 \text{ m}$), 平均株高为 7.5 m , 平均覆盖度为 0.7 , 平均生物量为 $83.27 \text{ t}/\text{hm}^2$, 地面有灰菜 (*Chenopodium album*)、碎米荠等杂草; 灌丛代表性植物为紫穗槐 (*Amorpha fruticosa*)、大叶黄杨 (*Buxus megistophylla*)、海桐 (*Pittosporum tobira*)、纤齿枸骨 (*Ilex ciliospinosa*), 平均种植密度为 $2500 \text{ 株}/\text{hm}^2$ ($2 \text{ m}\times 2 \text{ m}$), 平均株高为 4.2 m , 平均覆盖度为 0.7 , 平均生物量为 $15.76 \text{ t}/\text{hm}^2$, 灌丛间混有狗牙根 (*Cynodon dactylon*)、白茅 (*Imperata cylindrica*) 等杂草; 草地代表性植物为: 人工麦冬 (*Ophiopogon japonicus*)、狗牙根、假俭草 (*Eremochloa ophiuroides*)、双穗雀稗 (*Paspalum distichum*), 平均覆盖度为 0.8 , 平均生物量为 $7.69 \text{ t}/\text{hm}^2$, 其间混有少量杂草; 以上植被复垦年限均为 5 a 。

1.2 研究方法

在草地、灌丛、小乔木林、大乔木林这 4 种植被群落内, 依据植被种类各选择 4 个代表性样方, 在每一个小样方处中心取一个点, 于试验前 24 h 埋入一个直径为 20 cm 的 PVC 圈, 埋深为 $5\sim 8 \text{ cm}$, 上部高出地面 $2\sim 3 \text{ cm}$, 利用 Li-8100 自动土壤碳通量系统及自带的土壤温度、水分探头, 分别于 2011 年 7 和 10 月, 2012 年 1 和 3 月测定各样点的土壤呼吸强度及土壤 10 cm 处土壤温度、土壤 20 cm 处水分、地表空气温度及相对湿度, 每月测定 3 个昼夜, 每 4 h 测 1 次, 仪器设定为 3 次重复, 并取相应点 $5\sim 10 \text{ cm}$ 处土样, 带回实验室测定土壤有机质和 pH 值等指标。

1.3 数据处理

数据统计分析及作图采用 SPSS 16.0 及 Excel 软件。不同植被类型土壤碳排放情况对温度的敏感性用 Q_{10} 值表示, 定义为土壤温度每升高 10°C , 土壤碳排放速率的升高的倍数:

$$Q_{10} = e^{10b} \quad (1)$$

式中: b ——土壤呼吸与土壤温度指数拟合模型 $y = ae^{bx}$ 中的拟合常数^[12]。

2 结果与分析

2.1 各植被类型土壤呼吸昼夜变化和季节变化

草地、灌丛、小乔木林、大乔木林土壤呼吸强度均呈典型的单峰曲线形式(图 1), 最大值出现在 $12:00\sim 16:00$, 最大值分别为: $(3.11 \pm 1.03) \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, $(2.92 \pm 0.90) \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, $(2.69 \pm 0.71) \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, $(2.42 \pm 0.71) \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; 最小值约出现在凌晨 $4:00$, 其值分别为: $(2.14 \pm 0.97) \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, $(1.80 \pm 0.73) \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, $(1.95 \pm 0.55) \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, $(1.46 \pm 0.55) \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,

昼夜波动不大;各时间点的土壤呼吸强度,草地均为最大,大乔木林均为最小。复垦区草地、灌丛、小乔木林、大乔木林这 4 种植被类型土壤呼吸强度均呈极显著的季节变化($p < 0.01$)(图 2),夏季最大,其值分别为(5.53 ± 0.17) $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, (4.74 ± 0.21) $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, (3.88 ± 0.16) $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, (3.17 ± 0.22) $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 其次是秋季和春季,冬季最小,其值分别为: (0.94 ± 0.14) $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, (0.83 ± 0.07) $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, (0.71 ± 0.08) $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, (0.52 ± 0.12) $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 最大值为最小值的 5~6 倍,在土壤呼吸强度最大的 7 月份,各植被土壤呼吸强度大小顺序为:草地>灌丛>小乔木林>大乔木林。

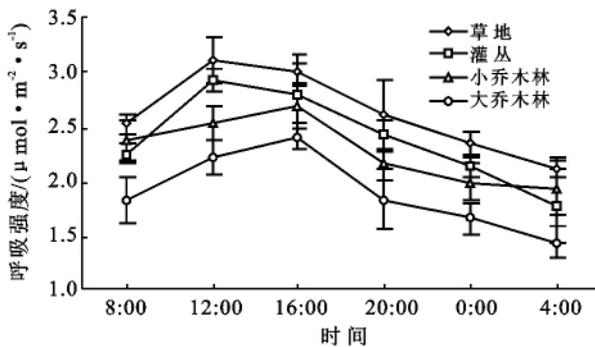


图 1 不同植被类型土壤呼吸强度的昼夜变化

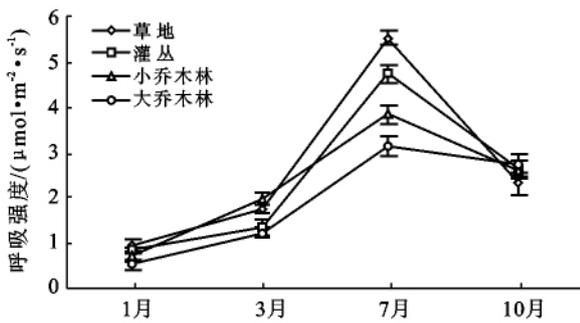


图 2 不同植被类型土壤呼吸强度的季节动态

2.2 不同植被类型土壤呼吸强度及 CO₂-C 释放量的估算

2.2.1 复垦区不同植被类型土壤呼吸强度的比较
方差分析显示,不同植被类型土壤呼吸强度差异显著($p < 0.05$),LSD 多重比较发现,除灌丛与小乔木林间的土壤呼吸强度差异不显著外,其余各植被类型两两间差异均显著($p < 0.05$);分别对每种植被类型下 4 个季节测得的所有土壤呼吸强度值求平均,得到各植被类型下土壤呼吸强度年均值,土壤呼吸强度大小顺序为:草地>灌丛>小乔木林>大乔木林,年均值分别为: (2.93 ± 0.37) $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, ($2.39 \pm$

0.33) $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, (2.29 ± 0.25) $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, (1.91 ± 0.24) $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

2.2.2 复垦区不同植被类型土壤 CO₂-C 年释放量的估算
以各月所测的不同植被类型土壤呼吸强度的平均值,作为不同植被下所测月土壤呼吸强度日均值(表 1),再利用公式(2),可由日平均土壤呼吸强度求得不同植被类型下所测月份 CO₂-C 日释放通量。

$$F_d = R_d \times 10^{-6} \times (12/44) \times 44 \times 3\ 600 \times 24 \quad (2)$$

式中: F_d ——CO₂-C 日通量 ($\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$);
 R_d ——日平均土壤呼吸强度 ($\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$);
CO₂ 摩尔质量为 44 g/mol; 10^{-6} , 3 600, 24, 12/44——转换常数(表 2)。

表 1 4 种植被类型下各月份的日平均土壤呼吸强度

样地	1月	3月	7月	10月
灌丛	0.83 ± 0.07^a	1.31 ± 0.18^a	4.74 ± 0.21^A	2.68 ± 0.30^a
草地	0.94 ± 0.14^b	1.74 ± 0.09^b	5.53 ± 0.17^B	2.32 ± 0.27^b
小乔木林	0.71 ± 0.08^a	1.94 ± 0.15^c	3.88 ± 0.16^C	2.63 ± 0.20^a
大乔木林	0.52 ± 0.12^c	1.22 ± 0.09^a	3.17 ± 0.22^D	2.75 ± 0.24^a

注:土壤呼吸强度单位 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; 同一列不同小写字母代表差异显著($p < 0.05$),不同大写字母代表差异极显著($p < 0.01$)。

表 2 4 种植被类型下各月份的土壤日平均 CO₂-C 通量

样地	1月	3月	7月	10月
灌丛	0.86 ± 0.08	1.36 ± 0.18	4.92 ± 0.22	2.78 ± 0.31
草地	0.98 ± 0.14	1.80 ± 0.09	5.74 ± 0.17	2.40 ± 0.28
小乔木林	0.73 ± 0.08	2.01 ± 0.16	4.02 ± 0.17	2.73 ± 0.21
大乔木林	0.54 ± 0.12	1.26 ± 0.10	3.29 ± 0.23	2.85 ± 0.25

分别以 1 月份日通量代表 12—2 月日通量值,3 月日通量代表 3—5 月份日通量值,7 月日通量值代表 6—8 月日通量值,10 月日通量值代表 9—11 月日通量值,利用公式(3)求得灌丛、草地、小乔木林、大乔木林土壤 CO₂-C 的年释放量分别为: (908.49 ± 72.41) $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, (999.74 ± 62.26) $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, (869.22 ± 56.23) $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, (726.10 ± 63.01) $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。

$$F_a = F_{d1} \times 90 + F_{d3} \times 92 + F_{d7} \times 92 + F_{d10} \times 91 \quad (3)$$

式中: F_a ——CO₂-C 年通量 ($\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$); F_{d1} , F_{d3} , F_{d7} , F_{d10} ——1, 3, 7, 10 月份 CO₂-C 日通量 ($\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$)。

2.3 煤矸石充填复垦区土壤呼吸强度的影响因子分析

土壤呼吸主要是植物的根呼吸以及土壤微生物的呼吸^[13],土壤温度、土壤水分、空气温度、空气相对湿度等影响植物及微生物的因素都可能对土壤呼吸产生影响,不同植被下土壤呼吸强度与各环境要素的皮尔逊相关(pearson correlation)关系详见表 3。由表 3 可知,不同植被下土壤呼吸强度均与土壤温度以

及与空气温度呈极相关关系,但是,如果存在某一共同变量的干扰,两个变量间可能出现假相关,为此,对各影响因子分别作偏相关(partial correlation)分析(表 4)。从表 4 可以看出,排除其他环境因子的干扰,土壤呼吸强度受土壤 10 cm 土层温度的影响显著,土壤水分、气温、空气相对湿度所表现出的对土壤呼吸的影响,主要是受土壤温度的干扰所致。

众多研究表明^[14-16],土壤呼吸与土壤温度呈显著的指数关系,由 4 种植被类型土壤呼吸对土壤 10 cm 土层温度的指数拟合曲线可以看出,煤矿复垦区土壤呼吸与土壤 10 cm 处温度的指数模型均为极显著水平($p < 0.01$),其指数模型均可解释 88% 以上的土壤呼吸变异。

表 3 不同植被下土壤呼吸强度与各环境要素的皮尔逊相关系数

样地	土壤温度	土壤水分	空气温度	空气湿度
灌丛	0.963**	0.375	0.930**	-0.362
草地	0.930**	0.694*	0.887**	-0.281
小乔木林	0.968**	0.446*	0.955**	-0.277
大乔木林	0.969**	0.328	0.940**	-0.435*

注:**表示 $p < 0.01$ 水平显著相关,*表示 $p < 0.05$ 水平显著相关。下同。

表 4 不同植被下土壤呼吸强度与各环境要素的偏相关系数

样地	土壤温度	土壤水分	空气温度	空气湿度
灌丛	0.654**	-0.017	-0.146	-0.227
草地	0.494**	0.365	0.175	0.216
小乔木林	0.512*	-0.074	0.342	0.117
大乔木林	0.498*	-0.340	0.390	0.350

3 结论与讨论

(1) 煤矸石充填复垦区土壤碳排放昼夜及季节变化。煤矸石充填复垦区 4 种植被类型土壤呼吸强度昼夜变化整体上均呈单峰曲线形式,最大值均出现在 12:00—16:00,最小值均出现在凌晨 4:00 左右,草地土壤呼吸速率昼夜各时间点均为最大,12:00 时最大,大乔木林土壤呼吸昼夜各时间点均为最小,4:00 时最小;土壤呼吸季节变化显著,夏秋季节较大,春冬季节较小,最大值是最小值的 5~6 倍,变动幅度较大。这和大多数生态系统的土壤呼吸昼夜及季节动态相一致^[17-19]。土壤的呼吸主要是植物根部及土壤微生物的呼吸,而无论是植物根的呼吸还是土壤微生物的呼吸,都是酶促作用的结果,随着昼夜或季节的改变,土壤温度、含水量等环境因子也随外界条件的变化而变化,使得酶促反应的各种酶类活性不同,酶促反应的速度和程度也就不同,从而致使土壤呼吸

强度的昼夜及季节差异。

(2) 煤矸石充填复垦区的碳减排植被类型。煤矸石充填复垦区不同植被类型下土壤呼吸强度有显著差异($p < 0.01$),多重比较发现,除灌丛和小乔木林土壤呼吸强度差异不显著外,其它植被类型间土壤呼吸强度差异均显著,且大小顺序为:草地 > 灌丛 > 小乔木林 > 大乔木林。这是由于不同的植被类型,其根系的分布、植被的覆盖程度、土壤有机质的量等都不相同,这会造成土壤表层的微生物类型及数量以及酶活性的差异,土壤与大气间 CO_2 -C 通量也就不同。张鸽香等^[20]对南京中山植物园内草坪、疏林和近自然林的土壤呼吸速率的研究发现,不同植被类型的土壤呼吸速率有显著差异,草坪类型的土壤呼吸年平均值是近自然林类型的 1.7 倍,是疏林类型的 1.63 倍;孙倩等^[21]对上海植物园 13 种植物的土壤呼吸的研究发现土壤呼吸速率:草坪 > 灌丛;丁访军等^[22]对黔中喀斯特地区的灌丛、阔叶混交林、针叶阔交林土壤呼吸的研究发现,土壤呼吸强度大小依次为:灌丛 > 针叶阔交林 > 阔叶混交林。由此可知,煤矸石充填复垦区土壤呼吸受植被的影响和其它生态区一致,均为草地土壤呼吸强度最大,林地较小,而灌丛和小乔木林土壤呼吸差异并不大($p > 0.05$),所以在煤矸石充填复垦区,考虑植被的碳减排效应,可以多种植乔木、灌丛,而尽量少植人工草坪。

(3) 环境因子对煤矸石充填复垦区碳排放的影响。偏相关分析结果表明,土壤呼吸强度仅和 10 cm 土层土壤温度呈极显著相关,与土壤水分、气温、空气相对湿度的相关性不显著,土壤呼吸与土壤温度的指数模型可以解释 88% 以上的土壤呼吸。由此可知,土壤呼吸强度对土壤温度的指数模型在煤矸石充填复垦区仍然适用,土壤温度既影响植物根的活性,又影响到土壤微生物的氧化分解,从而影响到土壤呼吸强度;由公式(1)所求得的草地、灌丛、小乔木林、大乔木林土壤呼吸 Q_{10} 值分别为:2.56, 2.69, 2.96 和 3.67,高于全球平均水平 2.4 的中位值^[23],土壤温度每升高 10 °C,大乔木林土壤呼吸强度将增加 3.67 倍,故其温度敏感性最强,其次为小乔木林及灌丛,草地对土壤温度的敏感性最小, Q_{10} 值的差异,反映了植被类型对土壤呼吸的温度敏感性的影响,即在全球变暖的背景下,大乔木林将会释放出更多的 CO_2 ;土壤水分对土壤呼吸的影响比较复杂,在水分充足的时候,土壤呼吸和土壤水分的相关关系并不明显^[24-25],该复垦区各植被土壤呼吸与土壤水分的相关关系不显著,原因可能是相对于土壤温度的显著性影响,该区土壤的水分由于变化不大影响可以忽略;空气温度

及空气相对湿度通过对土壤温度、土壤水分的影响间接对土壤呼吸造成影响,故排除土壤温度等的干扰,空气相对湿度及空气温度与土壤呼吸强度的相关性也不显著。

[参 考 文 献]

- [1] 唐红侠,韩丹,赵由才,等. 农林业温室气体减排与控制技术[M]. 北京:化学工业出版社出版,2009.
- [2] Falkowski P, Scholes R J, Boyle E, et al. The global carbon cycle: A test of our knowledge of earth as a system[J]. *Science*, 2000,290(5490):291-296.
- [3] Raich J W, Potter C S. Global patterns of carbon dioxide emissions from soils[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1995,9(1):23-26.
- [4] Raich J W, Tufekcioglu A. Vegetation and soil respiration: Correlations and controls [J]. *Biogeochemistry*, 2000,48(1):71-90.
- [5] Schlesinger W H, Andrews J A. Soil respiration and the global carbon cycle[J]. *Biogeochemistry*, 2000,48(1):7-20.
- [6] 杨喜田,宁国华,董惠英,等. 太行山区不同植被群落土壤微生物学特征变化[J]. *应用生态学报*,2006,17(9):1761-1764.
- [7] 刘颖,韩士杰. 长白山四种森林土壤呼吸的影响因素[J]. *生态环境学报*,2009,18(3):1061-1065.
- [8] 常宗强,史作民,冯起. 气温对祁连山不同植被状况土壤呼吸的影响[J]. *中国农业气象*,2005,26(2):85-89.
- [9] Zhang Yan, Li Linghao, Wang Yanfen, et al. Comparison of soil respiration in two grass-dominated communities in the Xilin River basin: Correlations and controls [J]. *Acta Botanica Sinica*, 2003,45(9):1024-1029.
- [10] 李红生,刘广全,王鸿喆. 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*, 2009,28(9):4099-4106.
- [11] 王同朝,卫丽,田原. 冬小麦—夏玉米一体化垄作覆盖下农田土壤呼吸变化研究[J]. *农业环境科学学报*, 2009,28(9):1970-1974.
- [12] Boone R D, Nadelhoffer K J, Canary J D, et al. Roots exert a strong influence on the temperature sensitivity of soil respiration[J]. *Nature*, 1998,396(6711):570-572.
- [13] 李凌浩,陈佐忠. 草地群落的土壤呼吸[J]. *生态学杂志*,1998,17(4):45-51.
- [14] 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*. 2007,36(5):663-667.
- [15] 彭少麟,李跃林,任海,等. 全球变化条件下的土壤呼吸效应[J]. *地球科学进展*. 2002,17(5):705-713.
- [16] 严俊霞,李洪建,汤亿,等. 小尺度范围内植被类型对土壤呼吸的影响[J]. *环境科学*, 2009,30(11):3121-3129.
- [17] 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.
- [18] 车国升,郭胜利. 黄土区夏闲期土壤呼吸变化特征及其影响因素[J]. *土壤学报*,2010,47(6):1159-1168.
- [19] 王慧清,王云龙,杜金玲. 锡林河湿地土壤呼吸日变化及温度响应特征研究[J]. *安徽农业科学*, 2011,39(14):8395-8397.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 丁访军,聂洋,高艳平. 黔中喀斯特地区 5 种林型冬季土壤呼吸研究[J]. *水土保持通报*,2010,30(1):11-16.
- [23] Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate [J]. *Tellus*, 1992,44(2):81-99.
- [24] Wang Yuesi, Hu Yiqiong, Ji Baoming, et al. An investigation on the relationship between emission/uptake of greenhouse gases and environmental factors in semiarid grassland[J]. *Advances in Atmospheric Science*, 2003,20(1):119-127.
- [25] 陈全胜,李凌浩,韩兴国,等. 水分对土壤呼吸的影响及机理[J]. *生态学报*. 2003,23(5):973-979.