

沙漠化对沙地土壤呼吸的影响及其对环境变化的响应

赵哈林¹, 李玉强¹, 周瑞莲²

(1. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃兰州 730000; 2. 鲁东大学生命学院, 山东烟台 264025)

摘要:为了了解沙漠化过程中土壤呼吸速率变化及其对环境因素变化的响应,于2005年在科尔沁沙地研究了固定、半固定和流动沙地的土壤呼吸日变化和生长季动态及其与环境变化的关系,得出以下结论:(1)3种沙地土壤呼吸日变化在春季和秋季呈单峰曲线,夏季呈多峰曲线;(2)3种沙地土壤呼吸速率从春季到秋季的季节动态均呈双峰曲线,峰值分别出现在6月下旬和8月下旬;(3)固定和半固定沙地的土壤呼吸的日变化幅度明显大于流动沙地,季节变化幅度也是固定沙地>半固定沙地>流动沙地;(4)随着沙漠化的发展,土壤呼吸平均速率明显下降,生长季平均土壤呼吸速率从固定沙地的 $2.32\text{ }\mu\text{mol CO}_2/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 降为半固定的 $1.65\text{ }\mu\text{mol CO}_2/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 和流动沙地的 $1.06\text{ }\mu\text{mol CO}_2/(\text{m}^2\cdot\text{s})$;(5)3种沙地土壤呼吸速率日变化均与土壤温度呈正相关,与空气湿度呈负相关,在季节尺度上3种沙地土壤呼吸速率与土壤温度、土壤水分和大气湿度均呈正相关,但只有固定沙地的相关性达到了显著水平;(6)沙漠化过程中,虽然土壤温度、土壤有机碳含量和植物根系碳含量都是导致沙地土壤呼吸发生改变的重要因子,但制约其变化的关键因子还是土壤水分和空气湿度。

关键词:沙漠化;科尔沁沙地;土壤呼吸;环境因素;相互关系

Soil respiration rates and its relation with environmental factors in Horqin Sand Land

ZHAO Halin¹, LI Yuqiang¹, ZHOU Ruilian²

1 Cold and Arid Regions Environment and Engineering Institute, CAS, Lanzhou 730000, China

2 Faculty of Life Sciences, Ludong University, Yantai 264025, China

Abstract: Soil respiration impacts carbon sequestration rates and atmospheric carbon dioxide levels. Daily dynamics and seasonal dynamics in soil respiration rate in three types of fixed, semi-fixed and mobile sand land were measured in 2005 to understand soil respiration properties and its relation with environmental factors in land desertification processes of Horqin Sand Land. The results showed that (1) daily fluctuations in soil respiration presented a single peak curve during spring and autumn and a double peak curve during summer in the three sand lands; (2) seasonal dynamics in soil respiration presented a double peak curve in all the three sand lands, with peak values occurring during the last ten-days of June and August; (3) the daily range of soil respiration rate was significantly greater in fixed and semi-fixed sandy lands than in mobile sandy land, and the seasonal range of soil respiration was fixed sandy land > semi-fixed sandy land > mobile sandy land; (4) soil respiration rate decreased significantly with increasing desertification, and the average rate of soil respiration in a growing season decreased from $2.32\text{ mol CO}_2/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ in fixed sand land to $1.65\text{ mol CO}_2/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ in semi-fixed sand land and $1.06\text{ mol CO}_2/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ in mobile sand land; (5) in all of the three sand lands, daily change in soil respiration had a positive correlation with soil temperature, and a negative correlation with air humidity; seasonal change in soil respiration had positive correlation with air humid, soil temperature and moisture, but the correlation was statistically significant only in the fixed sand land; (6) although changes in soil temperature, organic carbon and plant root carbon content were important factors affecting the soil respiration rate in land desertification processes, the primary factors dominating soil respiration were air humidity and soil moisture.

基金项目:国家“973”课题资助项目(2009CB421303)

收稿日期:2009-05-30; 修订日期:2009-12-30

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhaohalin666@hotmail.com

Key Words: desertification; Horqin Sand Land; soil respiration; environment factor; correlation

土壤呼吸速率是反映植物根系呼吸、土壤微生物呼吸和土壤动物活性状况的重要指标,不仅表征着土壤的生物学特性和土壤物质代谢强度,也反映着土壤质量和土壤肥力^[1]。特别是土壤呼吸速率还决定着土壤中碳素周转速度,土壤呼吸作为陆地生态系统碳素循环的重要环节,已成为向大气释放 CO₂的最大碳源,它的微小变化都会引起大气 CO₂浓度的很大改变^[2-3]。因此,研究土壤呼吸不仅对于了解土壤生物学特性具有重要意义,而且对于掌握陆地生态系统中碳源与碳库的关系、了解碳失汇问题以及对目前全球气候变化的影响都具有重要作用^[1, 3]。近些年来,随着全球变暖对人类生存环境和经济发展日益加剧的影响,与全球气候变暖有关的 CO₂等温室气体排放问题正日益受到国际社会的普遍关注,从而推动了不同类型生态系统土壤呼吸的研究^[3-4]。但迄今为止,相关研究主要集中于森林、草地、湿地和农田生态系统,研究内容涉及土壤呼吸的日变化和年季变化、环境变化对土壤呼吸的影响、人为活动对土壤呼吸速率的干扰及其响应等^[2-5],而对于荒漠生态系统土壤呼吸及其与环境因子关系的研究少有报道^[6-7]。

沙漠化是土地退化最严重的类型之一^[7-8]。近些年来,随着沙漠化在许多国家的迅速蔓延以及对相关国家国计民生的严重影响,沙漠化研究也日益受到国际社会的普遍关注^[6, 8]。有关沙漠化成因、过程、机制,以及沙漠化危害和防治等有关沙漠化的研究报道已有很多^[5, 9],土壤呼吸与沙漠化关系的研究也有一些报道^[6-7],但有关沙漠化对土壤呼吸的影响及其对环境变化响应的研究少有报道^[6],而开展相关研究有利于揭示沙漠化对生态系统碳循环的影响及其对全球气候变化的响应机制^[8, 10]。

本文的目的是通过研究不同类型沙地土壤呼吸速率的日变化和季节变化,以及生态因子的变化,分析沙漠化过程中土壤呼吸速率变化与环境变化的关系,以期从新的角度揭示区域沙漠化发生机制。

1 研究材料与方法

1.1 研究区自然概况

研究区位于内蒙古东部科尔沁沙地腹地的奈曼旗境内(42°55'—42°57'N, 120°41'—120°45'E, 海拔340—370 m)。该区属温带半干旱大陆性气候,年均降水量356.9 mm,年均蒸发量1900 mm,年均气温6.5 °C,≥10 °C年积温3190 °C,无霜期151d;年平均风速3.4 m·s⁻¹,年平均扬沙天气20—30d。地貌以高低起伏的沙丘地和平缓草甸或农田交错分布为特征,土壤多为风沙土或沙质草甸土。研究区植物群落以中旱生植物为主,主要植物种有白草(*Pennisetum centrasianicum*)、狗尾草(*Setaria viridis*)、毛马唐(*Digitaria ciliaris*)、黄蒿(*Artemisia scoparia*)、猪毛菜(*Salsola collina*)等。受滥垦、滥牧等因素的影响,大部分草地处于退化、沙化状态^[10]。

1.2 研究方法

在研究区内,根据沙地分类标准^[8]分别选择固定沙地(FSL)、半固定沙地(SFSL)、流动沙丘(MSL)各一处,其植被盖度分别为60%、40%和5%,土壤类型分别为固定风沙土、半固定风沙土和流动风沙土。分别于2005年的6月3日,6月22日,7月3日,7月19日,8月3日,8月20日和9月5日测定1次土壤呼吸日动态。土壤呼吸的测定方法为动态密闭气室法,使用的仪器型号为LI-6400(LICOR, Lincoln, NE, USA)及LI-6400-09土壤呼吸室^[6]。测定频率为5:00至17:00每隔1h测定1次,19:00至3:00每隔2h测定1次。每次测定时,在样地中提前1d将6—8个测定基座嵌入土壤中,基座为两端开口的直径10cm、高6cm的聚氯乙烯管,嵌入土中约4cm。同时将基座内的绿色植物齐地剪掉,并尽可能不扰动地表的凋落物。经过24h的平衡后,土壤呼吸速率会恢复到基座放置前的水平,从而避免了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。每一样地在进行24h连续测定时,先对6—8个点进行一轮预测定,保留土壤呼吸速率差异较大的点,每一样地最终为3个测定重复。每次测定土壤呼吸速率时,还利用湿度计(TRIME-FM, IMKO, GmbH, Ettlingen, Germany)测定了10cm深土壤的含水量,利用地温计(HH82, Exphil Calibration Labs, Bohemia, NY, USA)测定了5cm深土壤温度,利用Li6400测定大气湿度,每次测定3个重复。另外,在8月下旬测定土壤呼

吸时,在每个样地中随机设置3个 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 样方,利用刈割法测定地上生物量和凋落物产量,同时用直径10 cm的土钻提取0—100 cm土层的土样,带回实验室测定土壤有机碳含量和地下根系(活根)生物量及其碳含量。植物碳和土壤碳的测定采取重铬酸钾氧化-外加热法^[9, 11]。

1.3 数据分析

应用SPSS13.0软件进行数据的统计分析,应用Microsoft Excel 2003软件进行曲线绘制,采用单因素方差分析(One-Way ANOVA)和最小显著差异法(LSD)比较不同数据组间的差异,用Pearson相关系数评价不同因子间的相互关系^[6, 9]。

2 结果和分析

2.1 不同沙地土壤呼吸速率日动态比较

图1是晚春(6月3日)、夏季(7月19日)和早秋(9月5日)不同样地的土壤呼吸速率日变化曲线。可以看出,春季3种沙地土壤呼吸日动态均为单峰曲线,土壤呼吸速率都是从6:00—7:00开始迅速增加,中午13:00—14:00达到最大,之后下降,至23:00左右降至较低水平(图1)。但固定和半固定沙地的曲线波动幅度明显较大,流动沙地曲线的变化幅度明显较小。夏季3种沙地的土壤呼吸速率日变化曲线均较为平缓,为不明显的双峰曲线。其中,固定沙地的土壤呼吸速率在7:00出现第1个峰值后开始下降,至12:00达到最低后又开始上升,17:00达到第2个峰值,而半固定沙地和流动沙地土壤呼吸日变化与固定沙地呈相反变化趋势(图1)。秋季3个样地土壤呼吸速率日变化曲线和春季一样,均为单峰曲线,都是从6:00左右开始迅速升高,11:00左右达到最大,然后迅速下降,到17:00降至较低水平。但固定和半固定沙地曲线的波动较大,流动沙地曲线变化较为平缓(图1)。

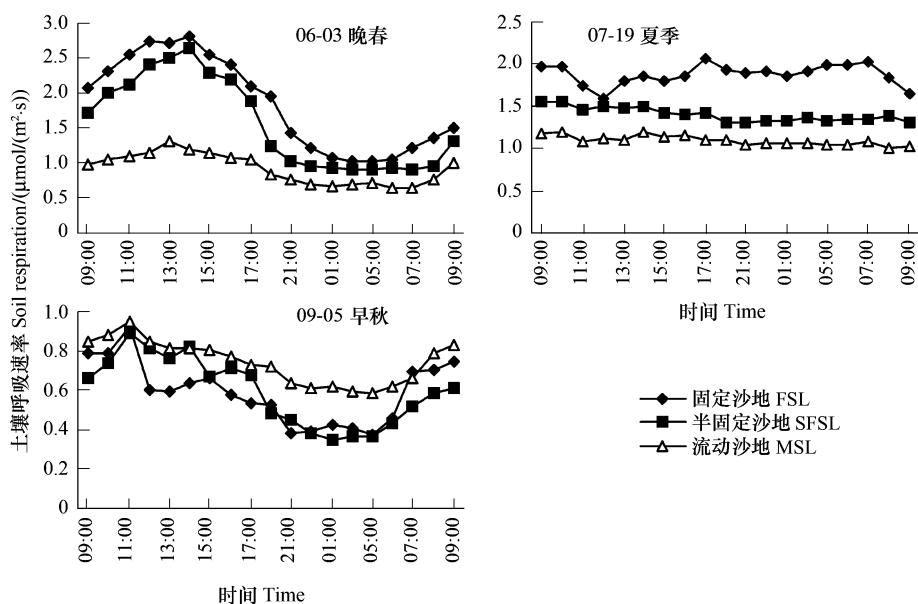


图1 6月3日、7月19日、9月5日3个样地土壤呼吸日变化曲线

Fig. 1 Diurnal variations in soil respiration rate

2.2 不同沙地环境要素的日变化比较

图2是晚春(6月3日)、夏季(7月19日)和早秋(9月5日)5cm土壤温度和空气相对湿度的日变化曲线。可以看出,3种沙地不同时期的土壤温度日变化既有相似之处,又有一定差别。相同之处是3个时期不同沙地的土壤温度均在早晨最低,之后逐步升高,在午后达到最高,然后下降,不同之处是最低、最高值出现的时间和大小有一定差别。例如,晚春(图2),3种沙地的土壤温度均在5:00时为最低,而最大值出现时间分别在15:00(固定沙地,34.81℃)、14:00(半固定沙地,34.78℃)和13:00(流动沙地,32.03℃),而在早秋3

种沙地最低温度出现时间分别出现在3:00(固定沙地,13.23℃)、5:00(半固定沙地,15.15℃)和6:00(流动沙地,15.79℃),而最高温度出现时间分别为15:00(固定沙地,29.55℃)、16:00(半固定沙地,26.15℃),15:00(流动沙地,28.50℃)。从图2还可以看出,空气湿度的变化曲线和土壤温度相反,不同时期和处理的空气湿度均为清晨最高,下午最低,而且除了晚春3个处理之间有一定差别外,夏季和早秋3种沙地之间的变化曲线基本一致(图2)。

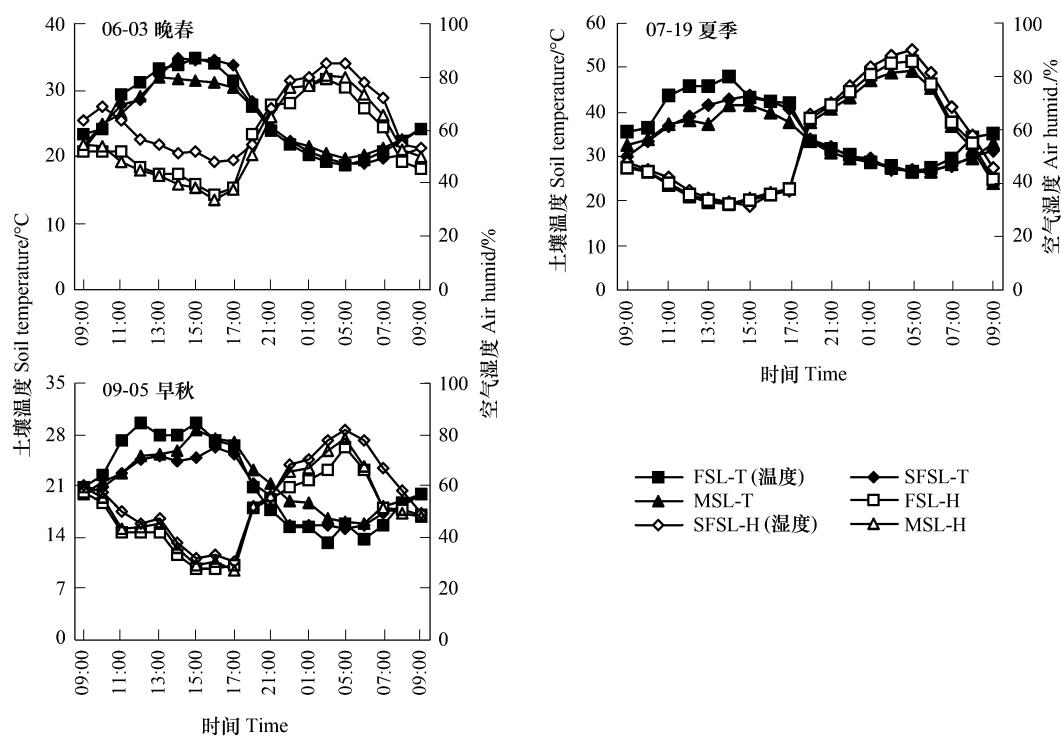


图2 土壤温度(5cm深)和空气相对湿度的日变化曲线

Fig. 2 Diurnal variations in soil temperature and air humidity

2.3 不同沙地土壤呼吸日均速率的季节变化比较

图3是3种沙地生长季土壤呼吸日均速率的比较。可以看出,一方面,不同时期的日均土壤呼吸速率除9月5日外,都是固定沙地>半固定沙地>流动沙地,而且整个生长季的日均土壤呼吸速率也是固定沙地($2.3 \mu\text{mol CO}_2 / (\text{m}^2 \cdot \text{s})$)>半固定沙地($1.71 \mu\text{mol CO}_2 / (\text{m}^2 \cdot \text{s})$)>流动沙地($1.1 \mu\text{mol CO}_2 / (\text{m}^2 \cdot \text{s})$);另一方面,不同时期各样地土壤呼吸日均速率之间的差异也不相同,其中6月22日和8月3日固定沙地呼吸速率分别要比流动沙地高234.2%和200.8%,而9月5日3种类型沙地间的差异不明显($P > 0.05$)。另外,固定沙地土壤呼吸速率的季节变化较大,半固定沙地和流动沙地依次下降,其变异系数($CV = SD/\text{平均值}$)分别为

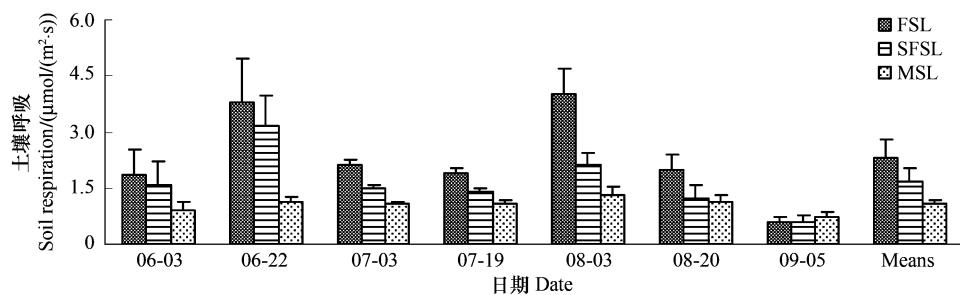


图3 不同沙地土壤呼吸日均速率的季节变化

Fig. 3 Season change in daily soil respiration rate in different habitats

0.52、0.48 和 0.18。

2.4 不同沙地日均土壤温度和日均空气湿度的季节变化比较

从图 4 可以看出,3 种沙地日均土壤温度(5cm 深)的季节变化趋势大致相同,即从春季到夏季土壤温度逐步上升,在 7 月 19 日达到最大后迅速下降。但不同季节 3 种沙地日均土壤温度的差别有很大不同,如固定沙地春季土壤升温速度要低于半固定沙地和流动沙地,而夏季升温速度则相反,秋季降温速度也是固定沙地高于半固定沙地和流动沙地。但从生长季平均地温看,3 种沙地差别并不显著($P > 0.05$),依次为 27.7°C (固定沙地)、27.7°C (半固定沙地) 和 27.8°C (流动沙地)。和日均土壤温度的季节变化趋势不同,3 种沙地日均空气湿度的季节变化趋势有较大差别(图 4)。其中,固定沙地在晚春(6 月 3 日)、仲夏(7 月 19 日)和早秋(9 月 5 日)较低,其它时间较高,而半固定沙地和流动沙地从晚春到仲夏均较低,之后有个较大的升高,然后又迅速下降。从整个生长季平均日均空气湿度看,固定沙地的日均空气湿度(68.8%)要高于半固定沙地(65.3%)和流动沙地(61.7%)。

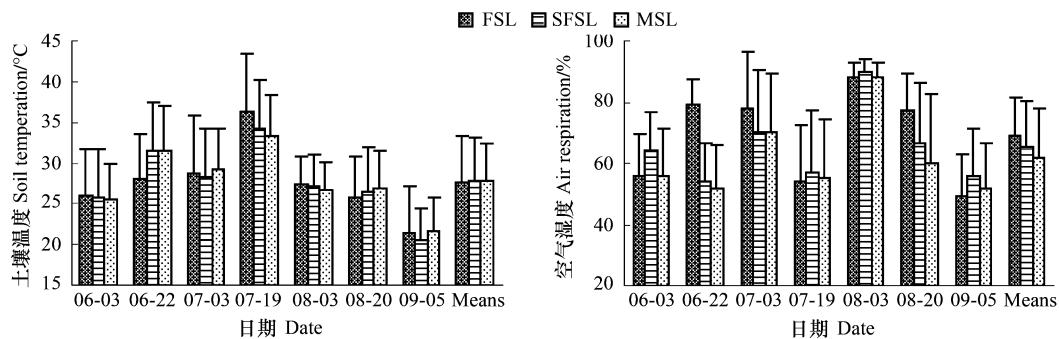


图 4 不同沙地生长季日均土壤温度和空气湿度的比较

Fig. 4 Season change in daily soil respiration rate and air humid in different sites

2.5 不同沙地其它环境因素的比较

图 5 是不同类型沙地土壤碳储量的比较。可以看出,无论是植物根内的碳含量,还是土壤有机碳含量,均是固定沙地(46.9g/kg 和 2333.1g/kg) > 半固定沙地(33.1g/kg 和 1177.4g/kg) > 流动沙地(10.4g/kg 和 481.8g/kg),不同沙地之间差异显著($P < 0.05$)。几种类型沙地 0—20cm 深度土壤含水量的比较,可以看出不同沙地生长季的平均土壤含水量的变化曲线极为相似,均是从春季到夏季明显下降,之后急剧上升,在 8 月 3 日达到最大后迅速降低,但固定沙地土壤含水量的变化曲线始终高于半固定沙地和流动沙地,因此其生长季平均土壤含水量也是固定沙地(4.16%)明显高于半固定沙地(2.71%)和流动沙地(1.96%)($P < 0.05$) (图 5)。

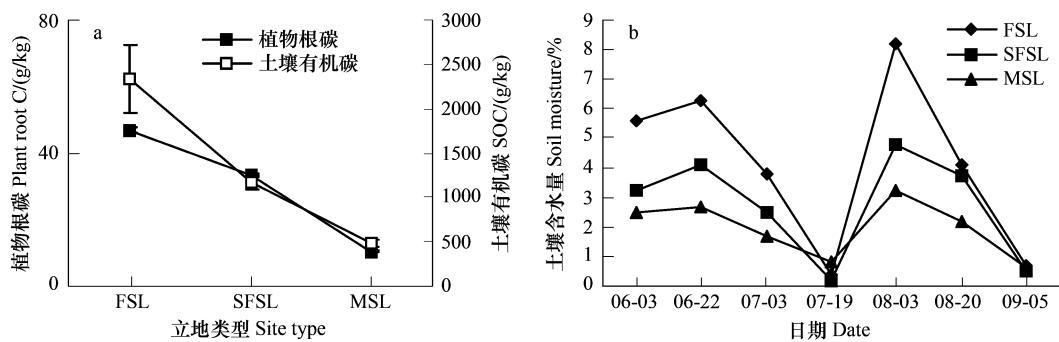


图 5 不同类型沙地土壤碳含量和土壤水分含量比较

Fig. 5 Comparisons on carbon storage and soil moisture among different sand lands

2.6 土壤呼吸变化与环境因素的相关分析

相关分析结果表明,3种沙地土壤呼吸日动态均与其土壤温度呈显著正相关关系($P < 0.05$),3种沙地土壤呼吸日动态均与其大气湿度存在负相关关系,但只有半固定沙地、流动沙地的相关性达到了显著水平($P < 0.05$),而固定沙地在夏季和秋季的相关性均未达到显著水平($P > 0.05$) (表1)。从整个生长季看,3种沙地土壤呼吸的季节变化均与土壤温度、土壤水分和空气湿度季节变化呈正相关关系,但只有固定沙地土壤呼吸的季节变化与土壤水分和土壤温度的相关性达到了显著水平($P < 0.05$)。对于不同沙地而言,土壤呼吸速率变化与土壤温度变化呈负相关关系,与空气湿度、土壤水分、土壤有机碳含量、植物根系碳含量变化均呈正相关关系(表2),但只有与空气湿度和土壤水分的相关性达到显著水平($P < 0.05$)。

表1 各类沙地土壤呼吸速率日动态和季节动态与环境因素的相关分析

Table 1 Correlation between soil respiration and environmental factor in different habitats

沙地类型 Sand type	日期 Date	昼夜尺度 Day scale		季节尺度 Season scale	
		土壤温度 Soil temp.	空气湿度 Air humid	项目 Items	土壤呼吸 Soil respiration
固定沙地 Fixed sand land	06-03	0.912 **	-0.805 **	土壤温度 Soil temp.	0.264
	07-19	0.478 *	-0.453	空气湿度 Air humid	0.813 *
	09-05	0.506 *	-0.432	土壤水分 Soil moist.	0.827 *
半固定沙地 Semi-fixed sand land	06-03	0.839 **	-0.693 **	土壤温度 Soil temp.	0.583
	07-19	0.484 *	-0.679 **	空气湿度 Air humid	0.093
	09-05	0.840 **	-0.744 **	土壤水分 Soil moist.	0.655
流动沙地 Mobile sand land	06-03	0.861 **	-0.864 **	土壤温度 Soil temp.	0.555
	07-19	0.659 **	0.588 **	空气湿度 Air humid	0.675
	09-05	0.561 *	0.613 **	土壤水分 Soil moist.	0.653

注:昼夜尺度样本数36个,季节尺度样本数14个

表2 样地间生长季土壤呼吸与所测环境因子的相关系数

Table 2 Correlation coefficients between soil respiration rate and environmental factors

项目 Items	地温 Soil temperature	空气湿度 Air humid	土壤水分 Soil moisture	根系碳含量 Root caibon	土壤有机碳含量 SOC
土壤呼吸 Soil respiration	-0.987	0.999 *	0.999 *	0.984	0.994

注: $n=6$

3 讨论

3.1 沙漠化对土壤呼吸速率的影响

唐凯等指出,无论是森林,还是草地,其土壤呼吸速率在一天的不同时段差异很大,而且受不同地带或生态系统的影响,土壤呼吸日变化曲线可能会是单峰曲线,也可能会是多峰曲线^[12]。例如,骆土寿等在分析海南岛尖峰岭热带山地雨林呼吸时发现,其土壤呼吸最高峰在20:00,在12:00和04:00—06:00出现2个次高峰^[13];而黄湘等在研究荒漠地区不同群落土壤呼吸时发现,胡杨(*Populus euphratica*)和柽柳(*Tamarix* spp.)群落的土壤呼吸速率日变化均为单峰曲线^[7]。本研究中,不同类型沙地在不同季节其土壤呼吸速率日变化曲线存在较大差异。其中,在晚春(6月3日)和早秋(9月5日),3个样地均为单峰曲线,峰值分别在14:00和12:00,最小值均出现在5:00左右。这和黄湘等人的研究结果^[7]基本一致。但是,3种类型沙地的日变化曲线有很大差别,如春季固定和半固定沙地的日变化曲线明显高于流动沙地,而且较为陡峭,秋季流动沙地的日变化曲线虽然位于固定和半固定沙地之上,但十分平缓。这说明,春季固定和半固定沙地土壤呼吸速率要明显高于流动沙地,而且昼夜变化剧烈,秋季流动沙地的土壤呼吸速率虽然高于固定和半固定沙地,但昼夜变化幅度仍小于固定、半固定沙地。就夏季(7月19日)而言,3种沙地土壤呼吸速率与春季和秋季明显不同,不仅日变化幅度很小,而且呈现出不十分明显的多峰曲线,这与骆土寿等对海南岛热带雨林除掉凋落物的夏

季土壤呼吸曲线的研究结果^[13]具有相似之处。

据报道,温带森林土壤CO₂排放量的季节变化一般是在冬季呼吸速率很低,春季以后随着温度的不断回升,呼吸速率逐渐增加,并在雨季7、8月份达到最大^[12]。但本研究结果并非如此,在本研究中,从春季到夏季,土壤呼吸速率并不是逐渐增加的,而是在6月份明显增加,7月份又明显下降,8月份再次明显增加,之后又急剧下降。其中,固定沙地和流动沙地在8月初达到最大值,而半固定沙地在6月下旬为最大值。这和冯文婷等对云南省景东县哀牢山常绿阔叶林土壤呼吸季节变化测定结果较为相似,其土壤呼吸速率是5月初升高,而后下降,在7、8月份达到最大,之后持续下降^[14]。不同生态系统土壤呼吸的季节变化之所以出现很大差异,可能和其生态系统结构和环境特征有关,特别是哪些对土壤呼吸影响较大的限制因子的季节变化有关^[15-16]。而在本研究中,不论是日均土壤呼吸速率,还是季节平均的土壤呼吸速率,都是固定沙地>半固定沙地>流动沙地,而且无论日变化,还是季节变化,其变化幅度也都是固定沙地>半固定沙地>流动沙地,这说明随着沙漠化的发展,不仅土壤呼吸速率下降,而且其对环境变化的敏感程度也相应降低。由于土壤呼吸是反应土壤生物活性的重要指标,土壤呼吸速率下降及其对环境变化敏感程度的降低,也就说明随着沙漠化的发展,沙地土壤生物活性下降,土壤生物对环境变化敏感程度降低^[6, 8, 11]。但和我国其它荒漠生态系统土壤呼吸速率相比,本研究所测土壤呼吸速率值较高。如我国新疆地区胡杨林8月所测土壤呼吸速率为2.2—3.9 μmol CO₂/(m²·s),腾格里沙漠人工植被区9月份的土壤呼吸速率仅为0.03—0.15 μmol CO₂/(m²·s)降低^[2, 7],而本研究8月和9月份日均土壤呼吸速率分别为1.2—4.0 μmol CO₂/(m²·s)和0.6—0.7 μmol CO₂/(m²·s)。新疆梭梭林生长季平均土壤呼吸速率仅为0.4—0.6 μmol CO₂/(m²·s)^[17],而本研究3种沙地生长季平均呼吸速率均大于1.0 μmol CO₂/(m²·s)。但是,要和草原植被或森林植被相比,本研究所测土壤呼吸速率还是较低的。如我国黄土丘陵草原地区夏季土壤呼吸速率为4.2—6.6 μmol CO₂/(m²·s),美国内华达山脉西黄松林地夏季平均土壤呼吸速率为5.0—6.1 μmol CO₂/(m²·s)^[1, 3, 12]。分析其原因,主要是地处半干旱地区的科尔沁沙地其水分条件要明显优于我国西部干旱区,但其水热条件一般要比草原或森林植被区差些^[5, 12]。

3.2 土壤呼吸速率对环境变化的响应

张东秋等指出,影响土壤呼吸的因子很多,主要包括气象因子、土壤理化性状和生物性状、植物群落类型和发育状况、以及人类活动等,它们在不同生态系统的不同时间、空间中所起的作用各不相同^[12-17]。但众多研究结果表明,对于大多数生态系统而言,温度和水分都是影响土壤呼吸的重要因子^[2-3, 12]。本研究结果也表明,无论是固定、半固定沙地,还是流动沙地,其土壤呼吸日变化都与温度和湿度密切相关。其中,3个样地所有测次的土壤呼吸日变化均与土壤温度呈显著正相关,与大气湿度呈负相关。这说明,在科尔沁沙地,生长季土壤呼吸速率的日变化明显受到空气湿度和土壤温度的制约,是随着土壤温度和大气湿度的昼夜变化而波动^[6-7]。在白天,随着土壤温度的升高和大气湿度的下降,其土壤呼吸速率明显升高,在夜晚随着土壤温度的下降和大气湿度的升高而下降^[8-9, 11]。这证实了秦小光有关在昼夜尺度上,土壤温度升高和大气湿度下降将有利于土壤CO₂向大气扩散对流过程的结论^[18-19]。但是,季节尺度和日尺度不同,在生长季3种沙地的土壤呼吸均与温度和湿度呈现正相关关系,但除了固定沙地土壤呼吸与大气湿度和土壤水分的关系达到了显著水平外,其它均为达到显著水平。这一方面说明,在季节尺度上,沙地土壤呼吸虽受环境温度和湿度的影响,但影响程度远不如土壤呼吸日动态那样明显^[12, 15];另一方面也说明,随着沙地的活化,土壤呼吸的季节变化与环境温度和湿度的关系受到了很大影响^[6-8]。其原因,可能是在较长的季节尺度上影响土壤呼吸的因素很多,一些因素不仅直接对土壤呼吸产生影响,还会削弱土壤呼吸对环境湿度和温度变化的响应程度^[1, 15],而且土地沙漠化也会明显改变环境因子对土壤呼吸影响的途径和程度^[6, 8, 10]。

一些研究还表明,不同生态系统影响土壤呼吸的因素有很大差别^[20-21]。在本研究中,不同类型沙地土壤呼吸存在较大差别,土壤呼吸与其环境因子的相关分析结果表明,不同沙地的土壤呼吸的变化与其地温变化呈负相关,与空气湿度、土壤含水量、根系碳含量和土壤有机质含量变化呈正相关^[1, 9, 19],但只有与空气湿度和土壤水分的相关性达到了显著水平,与其它因素的相关性未达到显著水平。这说明,在从固定沙地到流动

沙地的沙地活化过程中,土壤呼吸是随着地温的升高和土壤水分、空气湿度、根系碳含量和土壤有机碳含量的下降而下降的^[4, 6]。其中,在所测几项环境因子中,与土壤呼吸变化关系最密切的,或者说土壤呼吸反应敏感的主要环境因子还是土壤水分和空气湿度^[15-16]。大量研究表明,无论是草地、农田,还是沙地,在其沙漠化过程中均会表现出地温升高、土壤含水量、空气湿度、植物根系(碳)产量和土壤有机质含量和养分含量下降^[8-10]。因此,随着沙漠化的发展,土壤呼吸速率和CO₂交换量的减少也就是其必然结果了^[6-7]。

综上分析,沙漠化之所以能够导致土壤呼吸速率下降和日变化、季节变化幅度降低,主要源于四个原因;一是以风沙活动为主要特征的土地沙漠化可以导致土壤有机质和养分的大量损失^[10, 12],进而影响到土壤中生物数量和活性^[1, 3],从而造成土壤呼吸速率的下降;二是土地沙漠化可以导致生态系统水热条件的明显恶化^[6-7],而已有研究证实温度和水分是影响土壤呼吸的重要因子^[14, 18],沙漠化过程中生态系统水热条件的恶化是导致土壤呼吸速率下降的另一重要原因^[6-7];三是在我国半干旱地区,随着沙漠化的发展,土壤水热条件恶化,但其日变化和季节变化幅度趋于缩小^[8, 10],从而导致土壤呼吸速率的日变化和季节变化幅度降低;四是在雨季,不同沙漠化土地之间水热条件的差异最大,而在其它季节其间水热条件差异较小^[7, 9],从而导致本试验中秋季不同沙漠化土地土壤呼吸速率差异较小,这也是(9月5日)严重沙漠化草地土壤速率较高的可能因素之一。

4 结论

通过对试验结果的分析和讨论,本文得到以下几点结论:(1)在科尔沁沙地,不同类型沙地土壤呼吸日变化在春季和秋季呈单峰曲线,夏季呈多峰曲线;(2)3种类型沙地的土壤呼吸速率的季节变化均呈双峰曲线,峰值分别在6月下旬和8月下旬;(3)固定和半固定沙地的土壤呼吸的日变化幅度明显大于流动沙地,季节变化也是固定沙地>半固定沙地>流动沙地;(4)随着沙漠化的发展,土壤呼吸平均速率明显下降,生长季平均土壤呼吸速率从固定沙地的2.32 μmol CO₂/(m²·s)逐步降为半固定的1.65 μmol CO₂/(m²·s)和流动沙地的1.06 μmol CO₂/(m²·s);(5)沙地土壤呼吸日变化与土壤温度呈正相关,与空气湿度呈负相关,说明在昼夜尺度上高温低湿将有利于土壤呼吸或土壤CO₂向大气的扩散;(6)沙地土壤速率的季节变化与土壤温度、土壤水分和大气湿度均呈正相关,但只有固定沙地的相关性达到了显著水平;(7)沙漠化过程中,虽然土壤温度、土壤有机碳含量和植物根系碳含量都是导致沙地土壤呼吸发生改变的重要因子,但其关键原因还是水分因子发生了变化。

References:

- [1] Qi Z Y, Wang H Y, Wang J L. The development on the research of terrestrial ecosystem soil respiration. System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture, 2003, 19 (2): 116-119.
- [2] Hou L, Lei R D, Wang D X, Su Z Y. A Review of soil respiration in forest ecosystem. Chinese Journal of Soil Science, 2006, 37(3): 589-595.
- [3] Liu L X, Dong Y S, Qi Y C. The development on the soil respiration of grassland ecosystem. Progress in Geography, 2004, 23 (4): 35-43.
- [4] Huang B, Wang J G, Gong Y S, Stahr K, Yang Q. Soil respiration and carbon balance in winter wheat and summer maize fields. Journal of Agro-Environment Science, 2006, 25(1): 156-160.
- [5] Houghton R A, Hackler J L. Emissions of C from forestry and land-use change in tropical Asia. Global Change Biol., 1999, 5: 481-492.
- [6] Li Y Q, Zhao H L, Zhao X Y, Zhang T H, Chen Y P. Soil respiration, carbon balance and carbon storage of sandy grassland under postgrazing natural restoration. Acta Prataculturae Sinica, 2006, 15 (5): 25-31.
- [7] Huang X, Li W H, Chen Y N, Ma J X. Soil respiration of desert riparian forests in the lower reaches of Tarim River as affected by air temperature at 10cm above the ground surface and soil water. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(5): 1951-1960.
- [8] Zhu Z D, Chne G T. Desertification in northern China. Beijing: Sciences Press, 1994.
- [9] Zhao H L, Zhou R L, Drake S. Effects of aeolian deposition on soil properties and crop growth in sandy soils of North China. Geoderma, 2007, 142: 342-348.
- [10] Zhao H L, Zhou R L, Su Y Z, Zhou R L. Changes of soil organic C and total N contents as affected by desertification in Horqin Sand Land, North China. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(3): 976-982.
- [11] Zhao H L, Zhou R L, Zhang T H, Zhao X Y. Effects of desertification on soil and crop growth properties in Horqin sandy farmland of Inner

- Mongolia. Soil & Tillage Research, 2006, 87: 175-185.
- [12] Tang K, Ding L J, Chen W X. A Review of Soil Respiration. Guangdong Meteorology, 2008, 30(3): 36-38.
- [13] Luo T S, Chen B F, Li Y D. Litter and soil respiration in a tropical mountain rain forest in Jianfengling, Hainan Island. Acta Ecologica Sinica, 2001, 21(12): 2013-2017.
- [14] Feng W T, Zou X M, Sha L Q. Comparisons between seasonal and diurnal patterns of soil respiration in a montane evergreen broad-leaved forest of Ailao Mountains, China. Journal of Plant Ecology, 2008, 32(1): 31-39.
- [15] Jenkinson D S, Adams D E. Model estimates of CO₂ emissions from soil in response to global warming. Nature, 1991, 351: 304 - 306.
- [16] Dejong E. Calculation of soil respiration and activity from CO₂ profiles in the soil. Soil Sci., 1992, 113: 328 - 333.
- [17] Zhang L H, Chen Y N, Li W H, Zhao R F, Ge H T. Soil respiration in desert ecosystems of the arid region. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(5): 1912-1923.
- [18] Qin X G, Cai B G, Wu J S, Liu D S, Wang G A. The diurnal variations of soil CO₂ source, sink and flux in grassland of Lingshan Mts,. Beijing and their relationships with temperature and soil moisture. Ecology and Environment, 2004, 13(4): 470-475.
- [19] Tang J W, Misson L, Gershenson A, Cheng W X, Goldstein A H. Continuous measurements of soil respiration with and without roots in a ponderosa pine plantation in the Sierra Nevada Mountains. Agricultural and Forest Meteorology, 2005, 132: 212-227.
- [20] Epron D, Nouvellon Y, Rouspard O, Mouvondy W, Mabiala A, Saint-Andre L, Joffre R, Jourdan C, Bonnefond J M, Berbigier P, Hamel O. Spatial and temporal variations of soil respiration in a Eucalyptus plantation in Congo. For. Ecol. Manage., 2004, 202: 149-160.
- [21] Moa W H, Lee M S, Uchida S. Seasonal and annual variations in soil respiration in a cool-temperate deciduous broad-leaved forest in Japan. Agricultural and Forest Meteorology, 2005, 134: 81-94.

参考文献:

- [1] 齐志勇, 王宏燕, 王江丽. 陆地生态系统土壤呼吸的研究进展. 农业系统科学与综合研究, 2003, 19 (2): 116-119.
- [2] 侯琳, 雷瑞德, 王得祥. 森林生态系统土壤呼吸研究进展. 土壤通报, 2006, 37(3): 589-595.
- [3] 刘立新, 董云社, 齐玉春. 草地生态系统土壤呼吸进展. 地理科学进展, 2004, 23(4): 35-43.
- [4] 黄斌, 王敬国, 龚元石. 冬小麦夏玉米农田土壤呼吸与碳平衡的研究. 农业环境科学学报, 2006, 25(1): 156-160.
- [6] 李玉强, 赵哈林, 赵学勇, 张铜会, 陈银萍. 不同强度放牧后自然恢复的沙质草地土壤呼吸、碳平衡与碳储量. 草业学报, 2006, 15(5): 25-31.
- [7] 黄湘, 李卫红, 陈亚宁, 马建新. 塔里木河下游荒漠河岸林群落土壤呼吸及其影响因子. 生态学报, 2007, 27(5): 1951-1960.
- [8] 朱震达, 陈广庭. 中国北方沙质荒漠化. 北京: 科学出版社, 1994.
- [10] 赵哈林, 周瑞莲, 苏永中, 周瑞莲. 科尔沁沙地沙漠化过程中土壤有机碳和全氮含量变化. 生态学报, 2008, 28(3): 976-982.
- [12] 唐凯, 丁丽佳, 陈往溪. 土壤呼吸研究概述. 广东气象, 2008, 30(3): 36-38.
- [13] 骆土寿, 陈步峰, 李意德. 海南岛尖峰岭热带山地雨林土壤和凋落物呼吸研究. 生态学报, 2001, 21(12): 2013-2017.
- [14] 冯文婷, 邹晓明, 沙丽清. 哀牢山中山湿性常绿阔叶林土壤呼吸季节和昼夜变化特征及影响因子比较. 植物生态学报, 2008, 32(1): 31-39.
- [17] 张丽华, 陈亚宁, 李卫红, 赵锐锋, 葛洪涛. 干旱区荒漠生态系统的土壤呼吸. 生态学报, 2008, 28(5): 1912-1923.
- [18] 秦小光, 蔡炳贵, 吴金水, 刘东升, 王国安. 北京灵山草地土壤 CO₂ 源汇和排放通量与温度湿度昼夜变化的关系. 生态环境, 2004, 13(4): 470-475.