

腾格里沙漠民勤沙丘 CO₂ 浓度与昼夜变化规律研究

邵天杰¹, 赵景波^{1,2*}, 郝科科¹, 董治宝^{1,3}

(1. 陕西师范大学旅游与环境学院, 西安 710062; 2. 中国科学院地球环境研究所黄土与第四纪地质国家重点实验室, 西安 710075; 3. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000)

摘要:为查明沙漠区 CO₂ 浓度和对大气 CO₂ 的影响以及在全球碳循环中的作用, 利用红外 CO₂ 监测仪于 2009 年 9 月对腾格里沙漠民勤实验点不同类型不同深度的沙层 CO₂ 含量变化进行了昼夜连续观测. 根据 12 个钻孔 CO₂ 浓度的昼夜观测结果可知, 民勤沙漠区不同观测点 CO₂ 浓度差异较大, 各观测点昼夜 CO₂ 浓度变化在 $310 \times 10^{-6} \sim 2\,630 \times 10^{-6}$ 之间; 夜间沙层 CO₂ 浓度低, 白天 CO₂ 浓度高; CO₂ 浓度在深度上也有明显的差异, 不同深度 CO₂ 浓度由大到小的顺序是: 4 m (3m) > 2 m > 1m; 与温带半湿润的西安地区相比, 位于极端干旱区的民勤沙漠区 CO₂ 浓度显著低; CO₂ 浓度昼夜变化明显, 从当日 09:00 左右到次日 09:00 左右均呈现由低到高再到低的变化规律; 在沙层水分一定的条件下, 昼夜温度变化是造成沙层 CO₂ 浓度昼夜变化的主要原因, 两者呈显著正相关关系; 含水量较高沙层 CO₂ 浓度明显高于含水量较低沙层, 沙层含水量高低是决定沙层 CO₂ 浓度的主要因素; 4 m 深度以上沙层 CO₂ 浓度均高于地表空气 CO₂ 浓度, 表明极端干旱的沙漠区可能是 CO₂ 的来源区, 也指示环境恶劣的裸露流动沙丘微生物活动产生的沙层 CO₂ 浓度仍然超过了大气 CO₂ 浓度.

关键词:腾格里沙漠; 沙层 CO₂ 浓度; 昼夜变化规律; CO₂ 释放; 影响因素

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301 (2010) 12-3004-07

Study on the Change of Dune CO₂ Concentration in the Autumn at Minqin in Tengger Desert

SHAO Tian-jie¹, ZHAO Jing-bo^{1,2}, YU Ke-ke¹, DONG Zhi-bao^{1,3}

(1. College of Tourism and Environment Science, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China; 2. State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710075, China; 3. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: In order to find out the CO₂ concentration of the desert area, the influence of it on the CO₂ in the atmosphere and the role that it played on the global carbon cycle, the research team utilized in September 2009 infrared CO₂ monitor to observe the CO₂ concentration of the 12 drill holes day and night in Minqin desert area in the Tengger desert. The difference of various observation spots' CO₂ concentration of the desert area in the Tengger desert area is relatively big. The CO₂ concentration at night is low but high in the daytime and the CO₂ concentration at each observation spot changes from 310×10^{-6} to $2\,630 \times 10^{-6}$. The CO₂ concentration is also obviously different in depth and the CO₂ concentration at different depths in order of size is as follows: 4 m (3m) > 2 m > 1m. Compared with Xi'an area where is in the temperate and semi-humid region, the CO₂ concentration of the desert area in Tengger desert is very low. The diurnal variation of CO₂ concentration of the desert area in Tengger desert is obvious, and from the day 09:00am to 09:00am the next day, the CO₂ concentrations at different depths which rang from 1m to 4 m present the regularity that it changes from low to high, and then from high to low. The diurnal variation in temperature is the main reason that causes the change of the CO₂ concentration in the sand layer, both of which have the positive correlation. The sand layer's CO₂ concentration with higher water content is obviously higher than that with lower water content. The moisture content of sand layer is the main factor of the CO₂ concentration. The CO₂ concentration above 4m in the desert area is higher than that above the surface, which maybe indicates that the CO₂ from the highest desert area is also the resource of CO₂ in the atmosphere.

Key words: Tengger desert; dune CO₂ concentration; diurnal change; CO₂ release; influence factors

随着全球气温的不断上升和温室效应的不断恶化, 人们对碳循环过程的研究越来越多^[1-6]. CO₂ 作为大气温室气体的主要成分, 其强烈的温室效应对气候变暖的贡献远超过其他气体^[7], 其释放量和释放规律的研究一直是碳循环研究的焦点问题之一^[8-10]. 陆地土壤是地球表面最大的碳库, 也是地球大气 CO₂ 的重要来源之一^[11]. 土壤释放的 CO₂ 约

有 60% 由微生物分解有机质产生^[12], 其余部分由植物根系呼吸和动物呼吸产生^[13]. CO₂ 释放量增加

收稿日期: 2010-01-26; 修订日期: 2010-03-31

基金项目: 教育部长江学者特聘教授基金项目 (801813); 国家自然科学基金项目 (40672108); 中国科学院黄土与第四纪地质国家重点实验室项目 (SKLLQG0606)

作者简介: 邵天杰 (1982 ~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为区域环境学, Email: shaotianjie_2002@163.com

* 通讯联系人, E-mail: zhaobjb@snnu.edu.cn

对农作物有施肥作用,也是促进植被生长和农作物增产的积极因素^[14,15],但释放量的异常增加常常会给人们的生产和生活带来不利的影响,甚至导致温室效应的发生.因此,地表土层和沙层 CO₂ 浓度和释放量的研究既有理论意义,又具有重要的实际价值.据研究,在全球气温升高的情况下,土壤碳库中碳储量将会增加^[16-18],这具有减少大气 CO₂ 浓度的良好作用.但目前的研究主要集中在森林^[19,20]、草原^[21,22]、湿地^[23,24]、冻原^[25,26]、农田^[27,28]等地区以及岩溶作用过程中^[29,30],对沙漠区不同深度沙层 CO₂ 浓度的昼夜观测研究很少.国内除关于沙漠边缘绿洲和沙地极个别的植物凋落物 CO₂ 释放的研究外^[31],对沙漠 CO₂ 浓度尤其是流动沙丘 CO₂ 浓度变化规律的研究尚少.本研究根据腾格里沙漠民勤实验点秋季沙层 CO₂ 浓度的昼夜观测,分析了该沙漠区秋季不同沙丘类型 CO₂ 浓度与昼夜变化规律及其影响因素,初步探讨了沙漠区 CO₂ 浓度对大气 CO₂ 的影响以及在全球碳循环中的作用.

1 研究区自然概况及研究方法

腾格里沙漠南越长城,东抵贺兰山,西至雅布赖山,面积约 $4.3 \times 10^4 \text{ km}^2$, 是中国的第四大沙漠.本研究实验区位于民勤县境内,地处腾格里沙漠西北,石羊河下游如图 1,属于温带大陆性干旱气候区,具有典型的大陆性沙漠气候特征.该区冬冷夏热、降水稀少、光照充足、昼夜温差大,多年平均降水量为 110 mm 左右,年蒸发量 2 419.6 mm,是降水量的 20 多倍,且降水量多集中于 7、8、9 这 3 个月.全年盛行西北、西北偏西风,夏秋季东南风也比较盛行.近年来由于石羊河上游祁连山水源涵养能力降低和中游

用水激增,进入民勤的地表水正在逐渐减少.目前,民勤的荒漠化面积已占土地面积的 94%,荒漠边缘正以每年 3~4 m 的速度向绿洲推进.

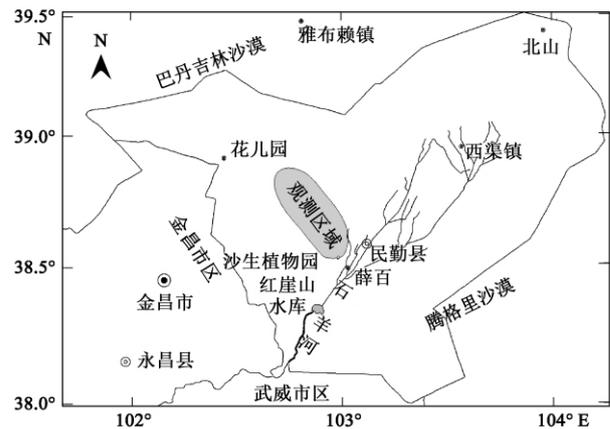


图 1 观测实验区地理位置

Fig. 1 Location of experimental points

采用便携式人工土钻在选定的沙丘上分别打出 1、2 和 4 m 深的测量孔,然后用 GXH-3010D 型红外线 CO₂ 分析仪对每个深度和地面 1 m 高度空气中的 CO₂ 含量进行昼夜监测,监测间隔为 1 h,同时记录地面 1 m 高度空气温度和地下 1 m 深度处沙层的温度.固定沙丘选择植被盖度 > 40% 或者丘表有薄层粘土结皮、盐结皮的半球状沙丘.半固定沙丘选择植被盖度介于 15%~40% 之间,或部分有粘土结皮、盐结皮覆盖的沙丘.流动沙丘 A 和 B 选择在独立的新月形流动沙丘上,观测孔分布在迎风坡中部,且周围 2 m 范围内没有植被生长.实验点具体情况如表 1 所示.

表 1 腾格里沙漠民勤实验点情况

Table 1 Situations of experimental points at Minqin in Tengger desert

沙丘类型	坐标位置	沙丘高度 /m	沙丘面积 /m ²	植被覆盖
固定沙丘	(N38°35'26.6", E 102°58'14.6")	约 5	10	植被(白刺)稠密
半固定沙丘	(N38°37'54.3", E 102°55'02.0")	约 4	15	植被(白刺)稀疏
流动沙丘 A	(N38°37'50.4", E 102°55'14.2")	约 6	500	周围基本无植被
流动沙丘 B	(N38°37'47.3", E 102°55'24.5")	约 6	500	周围基本无植被

2 观测结果

本研究在 2009 年 9 月 19~22 日对腾格里沙漠民勤实验点不同深度沙层 CO₂ 含量进行了间隔为 1 h 的连续昼夜观测.观测时间段内该地天气始终晴好.

2.1 固定沙丘 CO₂ 浓度观测结果

2009 年 9 月 19~20 日对固定沙丘不同深度沙层 CO₂ 含量进行了间隔为 1 h 的连续昼夜观测[图 2(a)].通过对观测结果分析可知 4 m 深度处 CO₂ 含量的 24 h 平均值最大,为 2.450×10^{-6} ,变化范围为 $2.330 \times 10^{-6} \sim 2.630 \times 10^{-6}$,1 m 深度处 24 h CO₂ 浓度平均值最小,只有 1.550×10^{-6} ,变化范围为

$1\ 330 \times 10^{-6} \sim 1\ 830 \times 10^{-6}$ 2 m 深度处的 24 h CO_2 浓度平均值为 $2\ 400 \times 10^{-6}$, 介于 4 ~ 1 m 深度之间, 变化范围为 $2\ 190 \times 10^{-6} \sim 2\ 720 \times 10^{-6}$.

相同时间段固定沙丘不同深度 CO_2 浓度在一昼夜内的变化有很大差异. 虽然不同深度 CO_2 浓度的高值段都出现在 11:05 至次日 18:05 时段内, 但是 CO_2 浓度的最大值出现时间不同, 1 m 高处 CO_2 浓度的最大值出现在 14:05, 最小值出现在 06:05. 而 1 m 深度处由于受气温等因素的影响较大, CO_2 浓度的最大值也出现在 14:05, 2 m 和 4 m 深度相对较深, 受气温等因素的影响比较小, 其 CO_2 浓度的最大值出现时间要滞后 1 h 左右, 均出现在 15:05. 不同深度 CO_2 浓度的低值段都出现在 01:05 ~ 09:05 时段内, 且最小值分别出现在次日 07:05、08:05 和当日 09:05, 比 1 m 高处 CO_2 浓度的最小值

要晚 1 ~ 3 h 左右.

结合温度的昼夜观测结果可知, 固定沙丘不同深度 CO_2 浓度高低时段与温度高低时段存在一定的对应关系. 固定沙丘 1 m 深度 CO_2 浓度高低时段的变化与 1 m 深度温度高低时段的变化基本一致, 固定沙丘的 2 m 和 4 m 深度处 CO_2 浓度在白天的峰值时段变化比温度的峰值时段变化有一定的滞后性, 滞后约 1 ~ 2 h. 白天太阳辐射强, 地表升温迅速, 沙丘的 1 m 深度的沙层温度和 1 m 高度的气温升降迅速, 而 2 m 和 4 m 处的沙层深度较大, 沙层温度升降缓慢, 且持续时间较长. 由此可见, 固定沙丘的 CO_2 浓度与温度呈现正相关关系. 观测结果还显示, 固定沙丘 CO_2 浓度除存在规律性的高时段和低时段外, 在低值段和高值段都还存在着明显的波动性 [图 2(a)].

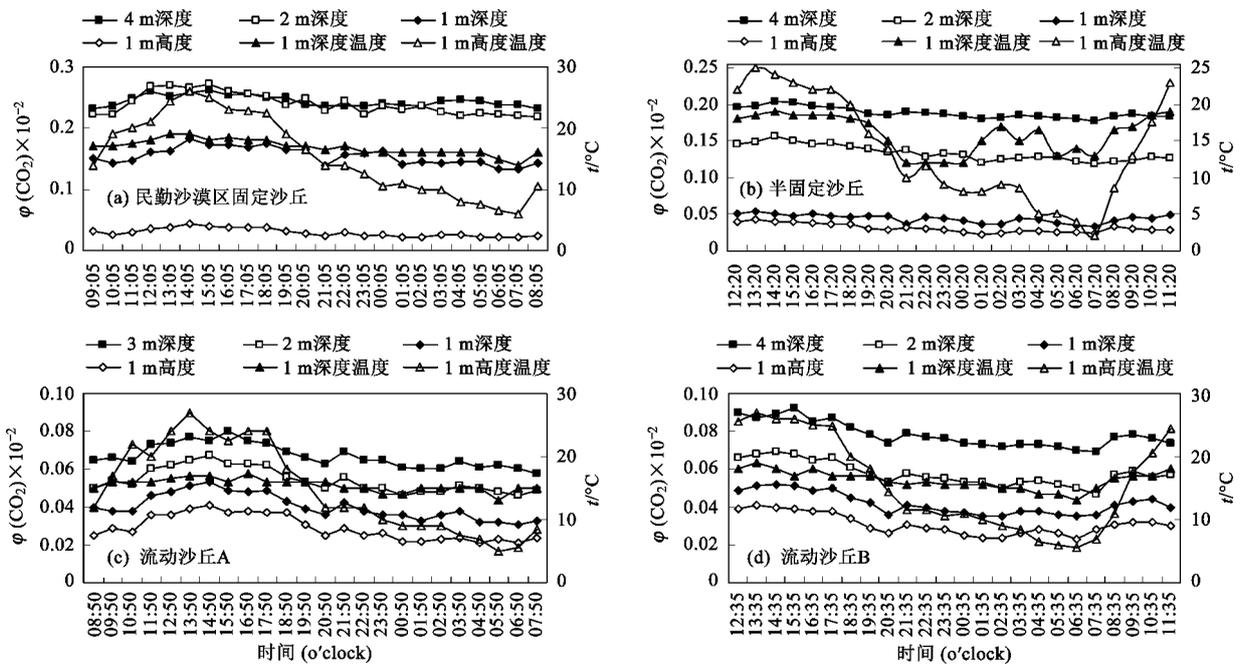


图 2 2009 年 9 月民勤沙丘 CO_2 浓度与气温的昼夜变化

Fig. 2 Diurnal changes of temperature and CO_2 concentration from dunes at Minqin experimental points in September, 2009

2.2 半固定沙丘 CO_2 浓度观测结果

2009 年 9 月 20 ~ 21 日对半固定沙丘不同深度的 CO_2 浓度进行间隔为 1 h 的连续昼夜观测 [图 2(b)]. 通过对观测结果分析可知, 半固定沙丘同固定沙丘一样是 4 m 深度处 24 h CO_2 浓度的平均值最大, 为 $1\ 880 \times 10^{-6}$, 变化范围为 $1\ 780 \times 10^{-6} \sim 2\ 040 \times 10^{-6}$; 1 m 深度处 24 h CO_2 浓度的平均值最小, 只有 440×10^{-6} , 变化范围为 $340 \times 10^{-6} \sim 540 \times$

10^{-6} ; 2 m 深度处 24 h CO_2 浓度的平均值为 $1\ 340 \times 10^{-6}$, 介于 4 m 深和 1 m 深度之间, 变化范围为 $1\ 190 \times 10^{-6} \sim 1\ 560 \times 10^{-6}$. 相同时间段半固定沙丘不同深度 CO_2 浓度在一昼夜内的变化也有一定差异. 虽然不同深度 CO_2 浓度的高值段都出现在光照强烈、温度较高的白天, 但是高值段开始时间和结束时间不同, 1 m 高度处 CO_2 浓度高值段出现最早, 为 12:20 ~ 18:20; 1 m 深度处 CO_2 浓度高值段与 1 m

高度处开始的时间一样,但结束的时间要晚 1 h,为 12:20~19:20;2 m 深度处和 4 m 深度处的 CO₂ 浓度高值段出现依次更晚些,分别为 12:20~20:20 和 12:20~21:20,比 1 m 高度处高值段结束时间分别晚 2~3 h. 由于受气温等因素的影响程度不同,CO₂ 浓度最大值出现时间也不同,1 m 深度处 CO₂ 浓度的最大值出现在 13:20,而 2 m 深度处和 4 m 深度处所处深度大一些,受气温等因素的影响相对较小,CO₂ 浓度的变化相对缓慢,其 CO₂ 浓度的最大值均出现在 14:20,滞后于 13:20 出现的空气最高温度. 不同深度的 CO₂ 浓度的低值段都出现在夜间. 1、2 和 4 m 深度处 CO₂ 浓度的最小值均出现在次日早上 07:20.

2.3 流动沙丘 CO₂ 浓度观测结果

2009 年 9 月 21~22 日对流动沙丘 A 不同深度的 CO₂ 浓度进行了间隔为 1 h 的连续昼夜观测[图 2(c)]. 由观测结果可知,该处的 CO₂ 浓度总体比较小,是所有实验点中最小的一个. 其中 3 m 深度 24 h CO₂ 浓度平均值最大,也仅为 670×10^{-6} ,变化范围为 $580 \times 10^{-6} \sim 800 \times 10^{-6}$;1 m 深度处 CO₂ 浓度的 24 h 平均值最小,只有 400×10^{-6} ,变化范围为 $310 \times 10^{-6} \sim 530 \times 10^{-6}$;2 m 深度处 24 h CO₂ 浓度的平均值介于 3 m 深度处和 1 m 深度处之间,为 540×10^{-6} ,变化范围为 $460 \times 10^{-6} \sim 670 \times 10^{-6}$. 流动沙丘 A 不同深度 CO₂ 浓度昼夜平均值要小于前面的固定沙丘和半固定沙丘. 同固定沙丘和半固定沙丘相似,流动沙丘 A 处 3 m 深度和 2 m 深度 CO₂ 浓度的低值段出现时间比 1 m 深度处和 1 m 高度处要晚些. 不同深度 CO₂ 浓度的高值段都出现在光照强烈、温度较高的白天. 1 m、2 m 深度处和 1 m 高度处 CO₂ 浓度最大值均出现在午后的 14:50,而 3 m 深度处 CO₂ 浓度最大值出现时间要晚 1 h,在午后的 15:50.

2009 年 9 月 22~23 日对流动沙丘 B 不同深度的 CO₂ 浓度进行间隔为 1 h 的连续昼夜观测[图 2(d)]. 通过对观测结果分析可知,流动沙丘 4 m 深度处 24 h CO₂ 浓度的平均值最大,为 780×10^{-6} ,变化范围 $690 \times 10^{-6} \sim 920 \times 10^{-6}$;1 m 深度处 24 h CO₂ 浓度的平均值最小,只有 420×10^{-6} ,变化范围为 $350 \times 10^{-6} \sim 520 \times 10^{-6}$;2 m 深度处 24 h CO₂ 浓度平均值为 580×10^{-6} ,介于 4 m 和 1 m 深度处之间,变化范围为 $470 \times 10^{-6} \sim 690 \times 10^{-6}$. 相同时间段流动沙丘不同深度 CO₂ 浓度在一昼夜内的变化

主要是 4 m 和 2 m 深度处 CO₂ 浓度低值段比 1 m 深度处的 CO₂ 浓度低值段出现要晚. 此外,由于受气温等因素的影响程度不同,CO₂ 浓度的最小值出现时间也不同,1 m 高度处和 1 m 深度处 CO₂ 浓度的最小值均出现在次日 06:35,而 2 m 深度处和 4 m 深度处受气温等因素的影响相对较小,CO₂ 浓度的变化相对缓慢,CO₂ 浓度的最小值均出现在次日 07:35. 同其它类型的沙丘一样流动沙丘 B 不同深度 CO₂ 浓度高值段也出现在光照强烈、温度较高的白天午后. 1 m 高度处 CO₂ 浓度的最大值出现在 13:35,而 1、2 和 4 m 深度处 CO₂ 浓度的最大值出现时间要滞后 1~2 h,分别出现在 14:35、14:35、15:35.

3 讨论

3.1 沙层 CO₂ 浓度在深度上的变化规律

在相同观测时间内,不同深度 CO₂ 浓度存在很大差别(见图 3). 2009 年 9 月 19~23 日对沙丘昼夜 CO₂ 浓度的观测数据进行计算分析可知:固定沙丘 4 m 深度沙层 CO₂ 浓度昼夜累积值(一昼夜内,观测点沙层 CO₂ 浓度每次读数之和)在所有观测点中最大,为 5.87×10^{-2} ;而 CO₂ 浓度昼夜累积最小值为 0.97×10^{-2} ,出现在流动沙丘 A 实验点 1 m 深度. 半固定沙丘 4 m 和 1 m 深度处沙层 CO₂ 浓度昼夜累积值相差最大,其 4 m 深度处沙层 CO₂ 浓度昼夜累积值为 4.52×10^{-2} ,而 1 m 深度处只有 1.06×10^{-2} ,不足前者的 1/4. 3 种类型沙丘 4 m(3 m)、2 m 和 1 m 深度处的 CO₂ 浓度昼夜累积值都表现为 4 m(3 m) > 2 m > 1 m. 这是由于沙丘沙层中 CO₂ 主要是由微生物分解有机质产生,在 2~4 m 深度左右的沙层中温度适宜,不受蒸发作用的影响,含水量较高,利于微生物活动,同时沙丘疏松多孔的结构,又为微生物活动提供了空间条件,所以沙丘之下 2~4 m 左右处 CO₂ 含量仍较高.

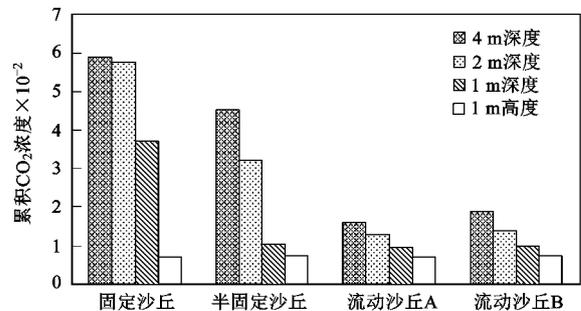


图 3 不同类型、不同深度沙丘昼夜 CO₂ 浓度累积值对比
Fig. 3 Comparison of the CO₂ cumulative value of concentration from different types of dune in 24 hours at different depths

3.2 不同类型沙丘沙层 CO₂ 浓度差异

不同类型沙丘 CO₂ 浓度的昼夜累积值具有较大的差异. 固定沙丘的昼夜 CO₂ 浓度的累积值大于半固定沙丘昼夜 CO₂ 浓度累积值, 而半固定沙丘的昼夜 CO₂ 浓度累积值又大于流动沙丘昼夜 CO₂ 浓度累积值(图 3). 流动沙丘 A 和 B 相同深度 CO₂ 浓度昼夜累积值很接近, 造成这种差异的主要原因是不同类型沙丘上发育的植被和植物密度不同. 流动沙丘上几乎没有植物分布, 也就不会受到植物分布位置和稠密状况的影响. 固定沙丘和半固定沙丘相同深度 CO₂ 浓度的昼夜累积值却常常会因为植被分布的位置和稠密状况不同而有很大的差异, 植物密集之处 CO₂ 浓度比植物稀疏之处的高. 沙层 CO₂ 约有 60% 是微生物分解有机物产生的^[12], 而植物生长为微生物的分解活动提供了物质基础, 所以植物分布较多的沙丘 CO₂ 浓度较高, 裸露沙丘 CO₂ 浓度较低.

3.3 沙层昼夜温度变化与 CO₂ 浓度变化规律

人们对降水较多地区土壤 CO₂ 浓度、CO₂ 释放量和土层 CO₂ 浓度的昼夜变化规律进行了大量研究^[19 20 27 28 31 32], 认识到从当日早晨到次日早晨, 土壤 CO₂ 昼夜浓度具有从低到高再到低的变化规律^[30]. 但对环境恶劣的沙漠区 CO₂ 昼夜变化规律研究相对较少, 在极端干旱的沙漠区, CO₂ 浓度是否存在昼夜规律的变化尚不明确. 笔者在民勤沙漠区的观测资料表明, 白天沙丘的 CO₂ 浓度与释放量高于夜间. 此外, 不论是固定沙丘、半固定沙丘还是无植物生长的裸露的流动沙丘, CO₂ 的浓度在一昼夜内从当日 09:00 左右到次日 09:00 左右均呈现由低到高再到低的变化规律, 这种变化与昼夜温度从低到高再到低的变化相一致, 表明这种变化规律在极端干旱的沙漠区具有普遍性. 因为地表土层 CO₂ 主要来自微生物的活动^[12], 且民勤沙漠区植物稀少, 植

物根系呼吸产生的 CO₂ 很少, 所以该区沙层微生物活动决定了 CO₂ 的浓度. 因此, 沙层 CO₂ 浓度变化也指示了微生物活动规律的变化. 在 24 h 内地表与沙层中变化最大的因素是温度, 显然温度是影响沙层微生物昼夜活动变化和其产生的 CO₂ 浓度变化的最主要因素. 早晨大气温度开始升高, 到 14:00 左右温度上升到最高, 之后开始降低, 并一直持续到次日早晨. 在一昼夜内, 大气温度从当日早晨到次日早晨呈现由低变高再变低的规律, 这是沙丘深层 CO₂ 在一昼夜内呈现由低到高再到低的主要原因. 由于沙丘沙层厚度大, 深层温度的升降相对于空气温度的升降具有滞后性, 这就导致了两者具有不同步变化的现象. 固定沙丘和半固定沙丘 CO₂ 浓度要比空气温度的升降滞后 1~3 h, 而流动沙丘 CO₂ 浓度只比空气温度的升降滞后 1~2 h, 这可能与固定沙丘和半固定沙丘表层生长的植被对光照作用有一定缓冲和阻碍作用有关.

3.4 沙层 CO₂ 浓度与温度的相关性

上述观测结果表明, 沙层 CO₂ 浓度具有清楚的昼夜变化规律, 随温度的升高而升高, 这与温度的变化规律基本一致. 利用 SPSS 软件进行拟合可知, 在 4 m 深度以内, 所有实验观测点不同深度沙层 CO₂ 昼夜浓度与空气温度都具有较好的正相关关系(图 4). 线性拟合模型和指数分布模型均通过 0.01 的显著性检验. 这表明在极端干燥的沙漠区, 当在沙层水分不变(一昼夜内深部沙层水分含量基本不变)的情况下, 空气温度仍然是影响沙层 CO₂ 浓度和 CO₂ 释放的最主要的因素. 温度升高, 微生物活动加强, 加速了沙层中有机质的分解和 CO₂ 的产生, 同时沙层中生物的呼吸作用也会加强, 这些都促使了沙层 CO₂ 浓度的增大. 反之亦然. 不同深度沙层 CO₂ 浓度和空气温度的线性拟合模型和指数分布模型的相关系数见表 2.

表 2 不同深度沙丘 CO₂ 浓度与气温的线性关系和指数关系

Table 2 Linear correlation coefficient and exponential correlation between temperature and dune CO₂ concentration in different depths

沙丘类型	孔深 /m	线性模型 相关系数	指数模型 判定系数	沙丘类型	孔深 /m	线性模型 判定系数	指数模型 判定系数
半固定沙丘	3	0.729	0.527	半固定沙丘	4	0.821	0.677
	2	0.867	0.750		2	0.815	0.662
	1	0.814	0.660		1	0.878	0.751
	4	0.878	0.773		4	0.855	0.736
流动沙丘 A	2	0.908	0.829	流动沙丘 B	2	0.891	0.793
	1	0.908	0.825		1	0.901	0.812

3.5 沙漠区植被与水分对沙层 CO₂ 浓度的影响

观测结果表明, 裸露沙丘或草灌很稀疏的沙丘

CO₂ 浓度低, 草灌较密集的沙丘 CO₂ 浓度较高. 这表明植被对沙层 CO₂ 浓度有明显的影 响. 根据理论

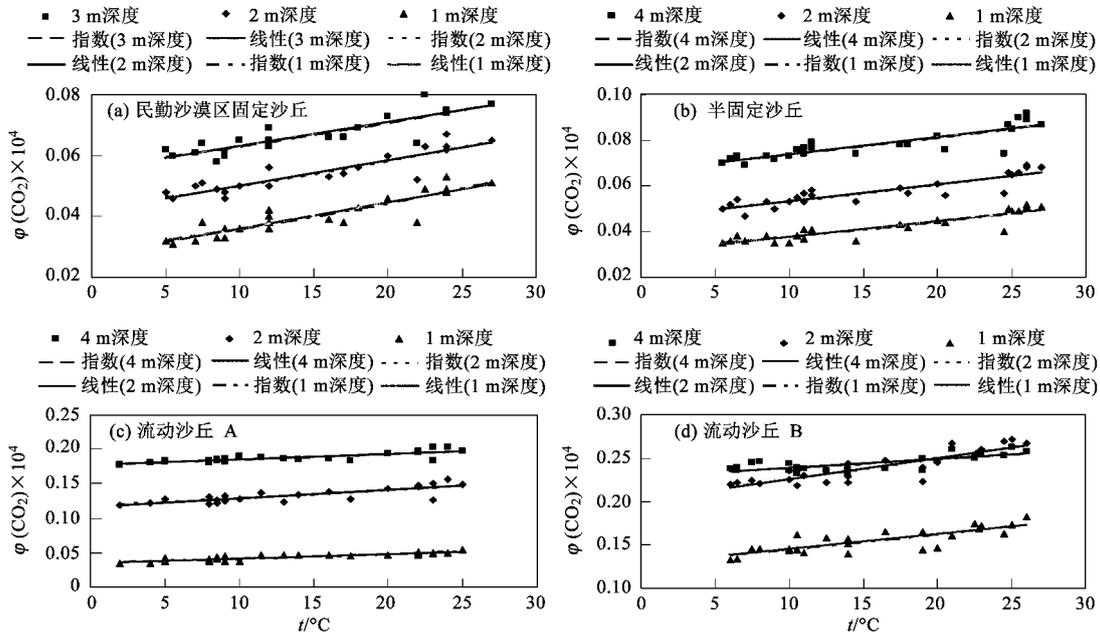


图4 大气温度与不同深度沙丘 CO₂ 浓度的线性拟合模型和指数分布模型曲线

Fig.4 Model of linear fit and exponential between temperature and dune CO₂ concentration in different depths

分析和实验观测可知,植被发育好的地区 CO₂ 浓度高主要有以下 3 个原因.一是植物及其根系产生了有机物,为微生物分解有机物产生 CO₂ 提供了物质条件.二是植物生长好的地方沙层含水量较高,在适宜的湿度条件下微生物活动加强.虽然含水量过多会对微生物活动产生不利影响,但沙漠区沙层含水量很低,所以沙层含水量增高对沙层 CO₂ 浓度大小有决定作用.三是植物根系的呼吸作用产生了部分 CO₂.植被发育差的地方沙层含水量低,干燥的沙层

不利于微生物的活动.为证实沙层水分对 CO₂ 浓度的影响,笔者对不同植被覆盖情况下 3 m 深度范围的沙层含水量进行了采样测定,采样间距 10 cm,利用烘干称重法进行含水量测定.结果表明,草灌发育好的沙层含水量高于裸露沙层,3 m 深度范围内流动沙丘平均含水量为 1.2%,固定沙丘平均含水量为 1.77% (表 3),后者几乎是前者的 1.5 倍.这充分证明,在干燥缺水的沙漠区,沙层水分含量多少是决定 CO₂ 浓度高低的主要因素.

表 3 民勤沙漠区秋季沙层含水量/%

Table 3 Moisture content of sand layer in autumn in the desert area of Minqin/%

沙丘类型	0~1 m 含水量范围	0~1 m 平均含水量	1.1~2 m 含水量范围	1.1~2 m 平均含水量	2.1~3 m 含水量范围	2.1~3 m 平均含水量	0~3 m 平均含水量
流动	0.26~4.41	2.00	0.42~2.24	1.14	0.21~1.03	0.46	1.20
固定	0.94~2.4	1.57	1.15~6.03	2.27	0.44~4.75	1.53	1.77

4 结论

(1) 民勤沙漠区不同观测点 CO₂ 浓度差异较大 2009 年 9 月各观测点昼夜 CO₂ 浓度变化在 310 × 10⁻⁶ ~ 2 630 × 10⁻⁶ 之间.夜间沙层 CO₂ 浓度低,白天 CO₂ 浓度高.

(2) 民勤沙漠区固定沙丘、半固定沙丘和流动沙丘 4 m、2 m 和 1 m 深度处的 CO₂ 浓度昼夜累积值在深度上均表现为 4 m > 2 m > 1 m,这种差别是沙

漠区极端干旱的气候和 1 m 左右沙层含水量小造成的.

(3) 植物分布稠密的固定沙丘的 CO₂ 浓度大于半固定沙丘的 CO₂ 浓度,植物分布较多的半固定沙丘的 CO₂ 浓度又大于植物稀少的流动沙丘的 CO₂ 浓度.

(4) 在极端干旱的沙漠区,不论是固定沙丘、半固定沙丘还是流动沙丘,沙层 1、2、3、4 m 深度 CO₂ 浓度从当日 09:00 左右到次日 09:00 左右均呈现由

低到高再到低的变化规律. 但由于沙丘沙层厚度大, 深层温度的升降相对于大气温度的升降具有滞后性.

(5) 民勤沙漠区植物分布较密集、生长较好的沙层 CO₂ 浓度较高, 植物分布稀疏、生长较差的沙层 CO₂ 浓度较低. 在极端干旱的沙漠区, 沙层含水量高低是决定沙层 CO₂ 浓度水平的主要因素.

参考文献:

- [1] Masahito U, Yoshinobu H, Yongwon K, *et al.* Response of the carbon cycle in sub-arctic black spruce forests to climate change: Reduction of a carbon sink related to the sensitivity of heterotrophic respiration [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, **149** (3-4): 582-602.
- [2] Luca C, Manuel C, Marco C, *et al.* Thermodynamic analysis of different two-stage transcritical carbon dioxide cycles [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2009, **32** (5): 1058-1067.
- [3] Petra T, Elisabeth H S, Dennis S O, *et al.* Holistic, adaptive management of the terrestrial carbon cycle at local and regional scales [J]. *Global Environmental Change*, 2008, **18** (1): 128-141.
- [4] 葛全胜, 戴君虎, 何凡能, 等. 过去 300 年中国土地利用、土地覆被变化与碳循环研究 [J]. *中国科学 (D 辑): 地球科学*, 2008, **38** (2): 197-210.
- [5] Nabuurs G J, Thürig E, Heidema N, *et al.* Hotspots of the European forests carbon cycle [J]. *Forest Ecology and Management*, 2008, **256** (3): 194-200.
- [6] Martin P, Johannes H. Life cycle assessment of carbon dioxide capture and storage from lignite power plants [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2009, **3** (1): 49-66.
- [7] 张金屯. 全球气候变化对自然土壤碳、氮循环的影响 [J]. *地理科学*, 1998, **18** (5): 463-471.
- [8] Tian H Q, Melillo J M, David W K, *et al.* Regional carbon dynamics in monsoon Asia and its implications for the global carbon cycle [J]. *Global and Planetary Change*, 2003, **37** (3-4): 201-217.
- [9] Higuchi K, Chan Y H, Yuan C W, *et al.* Doubled CO₂ impact on subarctic marine carbon cycle: a case study at Ocean Station P [J]. *Marine Chemistry*, 2000, **72** (2-4): 273-295.
- [10] 李俊, 于强, 孙晓敏, 等. 华北平原农田生态系统碳交换及其环境调控机制 [J]. *中国科学 (D 辑): 地球科学*, 2006, **36** (增刊 I): 210-223.
- [11] Flanagan L B, Wever L A, Carlson P J. Seasonal and interannual variation in carbon dioxide exchange and carbon balance in a northern temperate grassland [J]. *Global Change Biology*, 2002, **8**: 599-615.
- [12] 麦克拉伦 A D, 波得森 G H, 斯库金斯 D, 等. *土壤生物化学* [M]. 北京: 农业出版社, 1984. 490-492.
- [13] 申建波, 张福锁, 毛达如. 根际微生态系统中的碳循环 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2001, **7** (2): 232-240.
- [14] Frank A B, Leibig M A, Hanson J D. Soil carbon dioxide fluxes in northern semiarid grasslands [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2002, **34**: 1235-1241.
- [15] Gilmanov T G, Johnson D A, Saliendra N Z. Growing season CO₂ fluxes in a sagebrush-steppe ecosystem in Idaho: Bowen ratio/energy balance measurements and modeling [J]. *Basic and Applied Ecology*, 2003, **4**: 167-183.
- [16] Williams M A, Rice C W, Owensby C E. Carbon dynamics and microbial activity in tall grass prairie exposed to elevated CO₂ for 8 years [J]. *Plant and Soil*, 2000, **227** (1-2): 127-137.
- [17] Sowerby A, Blum H, Gray T R G, *et al.* The decomposition of *Lolium perenne* in soils exposed to elevated CO₂: Comparisons of mass loss of litter with soil respiration and soil microbial biomass [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, **32** (10): 1359-1366.
- [18] Phillips R L, Zak D R, Holmes W E, *et al.* Microbial community composition and function beneath temperate trees exposed to elevated atmospheric carbon dioxide and ozone [J]. *Oecologia*, 2002, **131** (2): 236-244.
- [19] Matamala R, William S H. Effects of elevated atmospheric CO₂ on fine root production and activity in an intact temperate forest ecosystem [J]. *Global Change Biology*, 2000, **6** (8): 967-979.
- [20] Jassal R S, Black T A, Drewitt G B, *et al.* A model of the production and transport of CO₂ in soil: predicting soil CO₂ concentrations and CO₂ efflux from a forest floor [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, **124** (3-4): 219-236.
- [21] 王庚辰, 杜睿, 孔琴心, 等. 中国温带草原土壤呼吸特征的研究 [J]. *科学通报*, 2004, **49** (7): 692-696.
- [22] Gilmanov T G, Soussana J F, Aires L, *et al.* Partitioning European grassland net ecosystem CO₂ exchange into gross primary productivity and ecosystem respiration using light response function analysis [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2007, **121** (1-2): 93-120.
- [23] 杨青, 吕宪国. 三江平原湿地生态系统土壤呼吸动态变化的初探 [J]. *土壤通报*, 1999, **30**: 254-256.
- [24] 王毅勇, 宋长春, 闫百兴, 等. 三江平原不同土地利用方式下湿地土壤 CO₂ 通量研究 [J]. *湿地科学*, 2003, **1** (2): 111-115.
- [25] 张金鑫, 曹广民, 周党卫, 等. 退化草地暗沃寒冻锥形土 CO₂ 释放的日变化和季节动态. *土壤学报*, 2001, **38** (1): 32-40.
- [26] 王一博, 王根绪, 程玉菲, 等. 青藏高原典型寒冻土壤对高寒生态系统变化的响应 [J]. *冰川冻土*, 2006, **28** (5): 633-642.
- [27] Li J, Yu Q, Sun X M, *et al.* Carbon dioxide exchange and the mechanism of environmental control in a farmland ecosystem in North China Plain [J]. *Science in China (Series D): Earth Sciences*, 2006, **29** (2): 226-240.
- [28] 胡健, 杨连新, 周娟, 等. 开放式空气 CO₂ 浓度增高 (FACE) 对水稻灌浆动态的影响 [J]. *中国农业科学*, 2007, **40** (11): 2443-2451.
- [29] 袁道先. 碳循环与全球岩溶 [J]. *第四纪研究*, 1993, **12** (1): 1-6.
- [30] Zheng L P, Li T Y, Wan G J, *et al.* The seasonal and daily CO₂ concentration variance in karst meadow soil profile with depth in Central Guizhou, China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1999, **44** (2): 93-94.
- [31] 苏培玺, 赵爱芬, 张立新, 等. 沙漠及绿洲不同覆被下大气 CO₂ 浓度的梯度变化 [J]. *中国沙漠*, 2002, **22** (4): 378-382.
- [32] 刘绍辉, 方精云. 土壤呼吸的影响因素及全球尺度下温度的影响 [J]. *生态学报*, 1997, **17** (5): 469-476.