

# 阿拉善流动沙漠区沙层 CO<sub>2</sub> 浓度与昼夜变化规律研究\*

赵景波<sup>1,2</sup> 邵天杰<sup>2</sup> 周 旗<sup>1</sup> 马延东<sup>2</sup> 邢 闪<sup>2</sup> 郁科科<sup>2</sup> 董治宝<sup>2</sup>

(1 宝鸡文理学院陕西省灾害监测与模拟重点实验室, 陕西宝鸡 721013)

(2 陕西师范大学旅游与环境学院, 西安 710062)

**摘要** 利用红外 CO<sub>2</sub> 监测仪, 对全球最高大的巴丹吉林诺尔图湖东大沙山、沙坡头流动沙丘和民勤流动沙丘进行了 19 个钻孔的 CO<sub>2</sub> 浓度昼夜观测。结果表明, 阿拉善流动沙漠区空气中 CO<sub>2</sub> 浓度较 1 m、2 m、3 m、4 m、5 m 沙层中 CO<sub>2</sub> 浓度均低, 表明在植物极稀少的流动沙漠区温暖季节会向空气中释放 CO<sub>2</sub>, 是大气 CO<sub>2</sub> 的来源区。沙层不仅白天向空气释放 CO<sub>2</sub>, 夜间也在释放 CO<sub>2</sub>。在极端干旱的阿拉善流动沙漠区沙层 2 m 深处 CO<sub>2</sub> 浓度一般较 1 m、3 m、4 m、5 m 的大, 但也有个别例外。流动沙漠区沙层 CO<sub>2</sub> 浓度的昼夜变化也具有明显的规律性, 各个深度沙层 CO<sub>2</sub> 浓度从早 8 时至次日 7 时均呈现由低到高再到低的变化规律。沙层 CO<sub>2</sub> 浓度与昼夜温度变化呈显著正相关关系。在极端干旱的阿拉善流动沙漠区水分含量较高的沙层 CO<sub>2</sub> 浓度明显高, 表明沙层含水量高低是决定沙层 CO<sub>2</sub> 浓度水平的主要因素。

**关键词** CO<sub>2</sub> 浓度; 昼夜变化规律; CO<sub>2</sub> 释放; 阿拉善; 沙漠区

中图分类号 S154

文献标识码

A

随着全球气温的不断上升, 人们对碳循环过程的研究越来越多<sup>[1-3]</sup>。CO<sub>2</sub> 是碳循环过程中的重要环节, 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<sup>[4-5]</sup>。人类活动释放的 CO<sub>2</sub> 除被海洋、植物吸收之外<sup>[6-7]</sup>, 还有岩溶作用过程的吸收<sup>[8-10]</sup>等。土壤释放的 CO<sub>2</sub> 约有 60% 是微生物分解有机质产生的<sup>[11]</sup>, 其余部分是植物根系的呼吸和动物的呼吸产生的<sup>[12]</sup>。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<sup>[13-14]</sup>, 这具有减少大气 CO<sub>2</sub> 浓度的良好作用。而大气 CO<sub>2</sub> 增加对农作物有施肥作用<sup>[15]</sup>, 能够增加作物产量, 同时, 也可能导致温室效应的发生。因此, 地表土层和沙层 CO<sub>2</sub> 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。虽然国内外对土壤 CO<sub>2</sub> 浓度和释放量进行了大量研究<sup>[16-17]</sup>, 但研究的主要是森林和草原地区, 对流动沙漠区不同深度 CO<sub>2</sub> 浓度的昼夜观测研究很少。本文根据诺尔图湖东大沙山、沙坡头流动沙丘和民勤流动沙丘三个观测区的昼夜 CO<sub>2</sub> 浓度观测数据, 分析了阿拉善流动沙漠区 CO<sub>2</sub> 浓度与昼夜变化规律及其影响因素, 初步探讨了沙漠区沙层 CO<sub>2</sub> 浓度对大气 CO<sub>2</sub> 的影响以及在全球碳循环中的作用。

## 1 研究区概况与研究方法

阿拉善盟(37°21'~42°47'N, 97°10'~106°52'E)地处内蒙古自治区最西端, 西与河西走廊相连, 东南隔贺兰山与宁夏回族自治区相望, 北与蒙古国交界(图1)。巴丹吉林、腾格里、乌兰布和三大沙漠横贯全境, 面积约 $7.8 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 海拔900~1 400 m。巴丹吉林沙漠以高陡著称, 绝大部分为复合沙山。相对高度从外缘的5~20 m, 向内逐渐增高到200~400 m, 最高达近500 m。腾格里沙漠、乌兰布和沙漠多为新月形流动、半流动沙丘链或格状沙丘链, 一般高10~200 m。阿拉善盟地处亚洲大陆腹地, 具有典型的大陆性气候。干旱少雨, 风大沙多, 冬寒夏热, 四季气候特征明显, 昼夜温差大。年均气温摄氏6°C~8.5°C, 降雨量从东南部的200 mm左右, 向西北部递减至40 mm以下; 而蒸发量则由东南部的2 400 mm向西北部

\*陕西省灾害监测与模拟重点实验室项目(09JS074)、教育部“长江学者”特聘教授项目(801813)资助  
作者简介: 赵景波(1953-), 山东滕州人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事环境科学与第四纪研究。

[zhaobjb@snnu.edu.cn](mailto:zhaobjb@snnu.edu.cn)

收稿日期: 2011-01-06; 收到修改稿日期: 2011-06-16

递增至4 200 mm，降水量多集中在7月~9月。

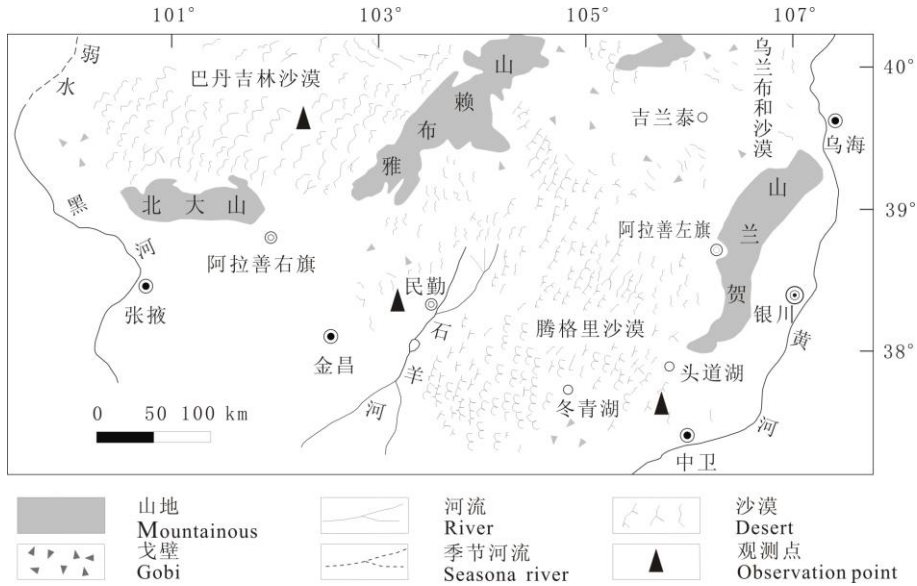


图1 阿拉善沙漠区地貌类型和观测点分布图

Fig. 1 Landforms of the Alxa Desert and spatial distribution of the observation sites

在巴丹吉林沙漠和腾格里沙漠选择3个观测区，即诺尔图湖东大沙山观测区、沙坡头观测区和民勤观测区。其中，诺尔图湖东大沙山观测区和沙坡头观测区均选择沙山(丘)的迎风坡中上部和中下部作为观测点，而民勤观测区的观测点位于新月形流动沙丘的迎风坡中部。诺尔图湖东大沙山海拔1 610 m，其坡脚最低处的海拔高度为1 186 m，高差为424 m，是该区高差最大的沙山。沙坡头观测区和民勤观测区的观测点位于独立的新月形流动沙丘迎风坡上。每个观测点布设3~5个不同深度的观测孔，分别观测1 m、2 m、3 m、4 m、5 m深度CO<sub>2</sub>浓度、空气CO<sub>2</sub>浓度、空气温度和深部沙层温度，各观测孔之间的距离为3 m。监测仪器为GXH-3010D型红外线CO<sub>2</sub>监测仪。用人力钻在选定观测点分别钻出1 m、2 m、3 m、4 m、5 m深度的钻孔，然后将红外线CO<sub>2</sub>监测仪的探头伸到钻孔底部，测量各深度处的CO<sub>2</sub>浓度。1 h记录一次观测结果。观测时间段内该地天气始终晴好。

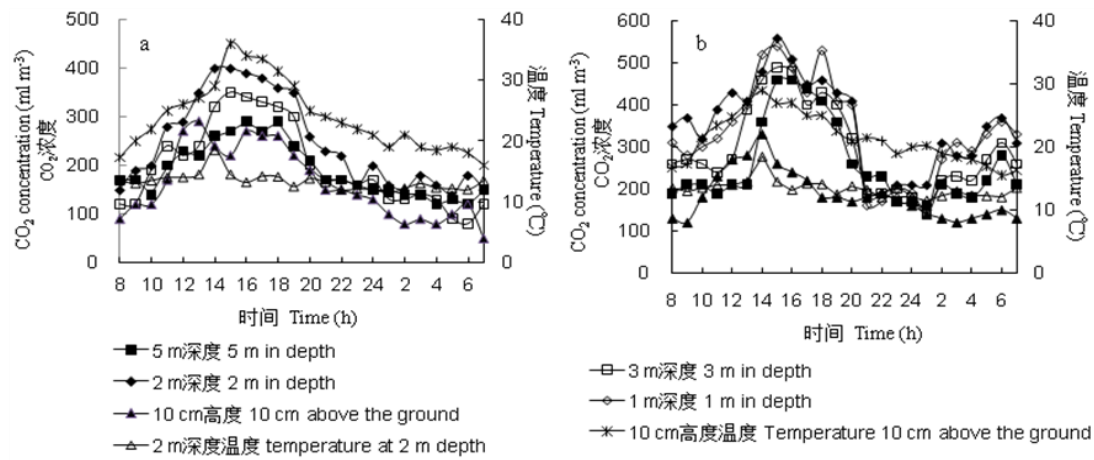
## 2 观测结果

### 2.1 诺尔图湖东大沙山迎风坡沙层CO<sub>2</sub>浓度

2009年5月8~9日对诺尔图湖东大沙山中下部观测点的2 m、3 m、5 m深度沙层和空气中的CO<sub>2</sub>浓度进行了昼夜观测(图2a)，观测结果的标准差介于55.72~93.74 ml m<sup>-3</sup>之间。该点位于宽阔大沙梁较平坦的顶部。观测数据显示，2 m深度处CO<sub>2</sub>浓度的24 h平均值最大，为250 ml m<sup>-3</sup>，变化范围为140~400 ml m<sup>-3</sup>，5 m深度处24 h CO<sub>2</sub>浓度平均值最小，只有190 ml m<sup>-3</sup>，变化范围为120~290 ml m<sup>-3</sup>，3 m深度的24 h CO<sub>2</sub>浓度平均值为200 ml m<sup>-3</sup>，介于5 m与2 m深度之间，变化范围为80~350 ml m<sup>-3</sup>。可见，巴丹吉林沙漠诺尔图湖东大沙山迎风坡中下部不同深度沙层CO<sub>2</sub>浓度在一昼夜内的变化有很大差异。虽然不同深度CO<sub>2</sub>浓度的高值段均出现在13时至18时段内，但是CO<sub>2</sub>浓度的最大值出现时间不同，10 cm高度的CO<sub>2</sub>浓度的最大值出现在13时，2 m深度处CO<sub>2</sub>浓度的最大值出现在14时，3 m和5 m深度相对较深，受气温等因素的影响较小，其CO<sub>2</sub>浓度的最大值出现时间要滞后1~2 h，分别出现在15时、16时。不同深度CO<sub>2</sub>浓度的低值段均出现在1时至7时段内，2 m、3 m、5 m深度处的最小值分别出现在5时、6时、6时，较10 cm高处CO<sub>2</sub>浓度的最小值要晚1~2 h左右。

2009年5月9~10日对诺尔图湖东大沙山中上部观测点的1 m、2 m、3 m、5 m深度CO<sub>2</sub>

浓度、空气 CO<sub>2</sub> 浓度和空气温度进行观测，观测结果的标准差介于 58~115 ml m<sup>-3</sup> 之间。该点位于新月形沙丘围绕的洼地中。该观测点 CO<sub>2</sub> 浓度的昼夜变化规律与中下部观测点相似，但 CO<sub>2</sub> 浓度的 24 h 平均值均较中下部相同深度处高出 100 ml m<sup>-3</sup> 左右(图 2b)。



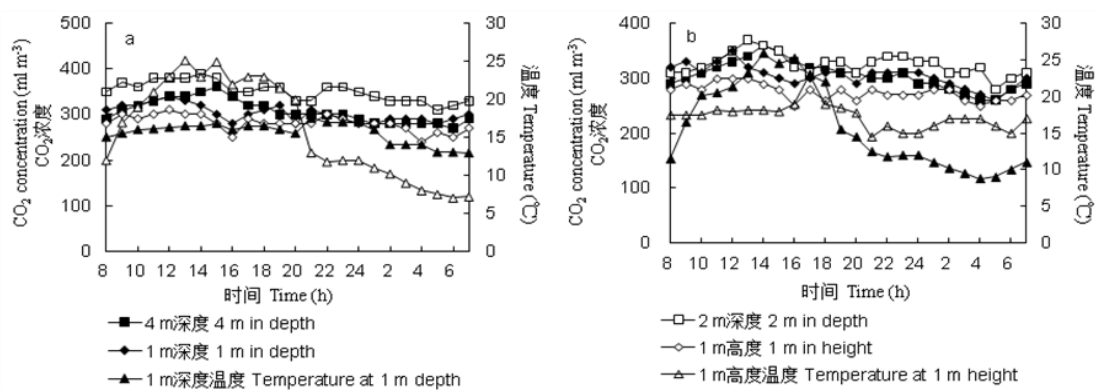
a,b 分别为诺尔图大沙山中下部和中上部不同深度处 CO<sub>2</sub> 浓度和温度变化情况 a,b is the variation situation of temperature and CO<sub>2</sub> concentration at different depth in the down and middle part and the top and middle part of Nuortu mage-dune, respectively

图2 巴丹吉林诺尔图湖东大沙山迎风坡观测点CO<sub>2</sub>浓度与温度变化

Fig. 2 Variation of CO<sub>2</sub> concentration and temperature at the windward slope of the Dashasan Sand Dune, east on the Nuortu Lake, Badain Jaran

## 2.2 沙坡头流动沙丘沙层CO<sub>2</sub>浓度

2010年5月25~26日对选定流动沙丘迎风坡中上部不同深度沙层 CO<sub>2</sub> 浓度进行了昼夜观测(图 3a)，观测结果的标准差介于 18~26 ml m<sup>-3</sup> 之间。观测结果表明，流动沙丘迎风坡中上部不同深度沙层 CO<sub>2</sub> 浓度在一昼夜内的变化有很大差异。其中，2 m 深度处 CO<sub>2</sub> 浓度的 24 h 平均值最大，为 350 ml m<sup>-3</sup>，变化范围为 310~390 ml m<sup>-3</sup>，1 m 深度处 24 h CO<sub>2</sub> 浓度平均值最小，只有 300 ml m<sup>-3</sup>，变化范围为 280~330 ml m<sup>-3</sup>；4 m 深度处的 24 h CO<sub>2</sub> 浓度平均



a,b 分别为沙坡头观测点迎风坡中下部和中上部不同深度处 CO<sub>2</sub> 浓度和温度变化情况 a,b is the variation situation of temperature and CO<sub>2</sub> concentration at different depth in the down and middle part and the top and middle part of the windward slope at Shapotou observation, respectively

图3 腾格里沙漠沙坡头观测点 CO<sub>2</sub> 浓度与温度变化

Fig. 3 Variation of CO<sub>2</sub> concentration and temperature at Shapotou observation site in the Tengger Desert

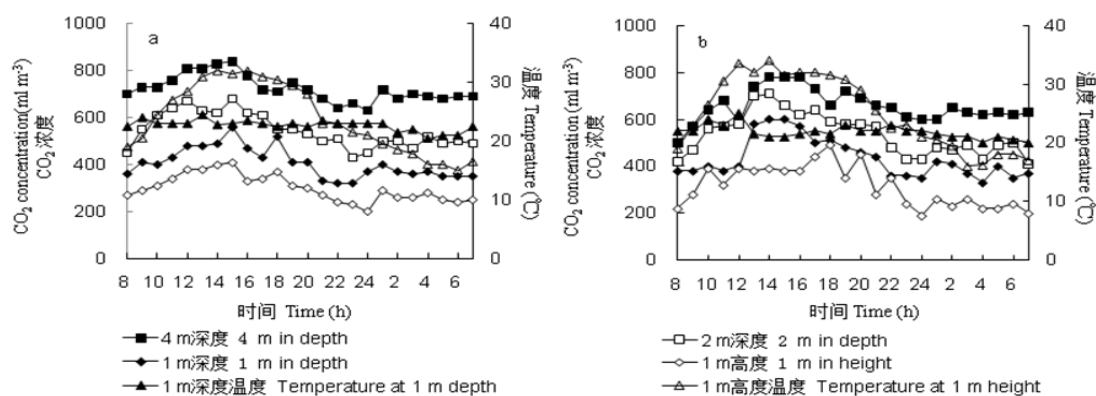
值为  $310 \text{ ml m}^{-3}$ , 介于 2 m 与 1 m 深度之间, 变化范围为  $270\sim 360 \text{ ml m}^{-3}$ 。虽然不同深度  $\text{CO}_2$  浓度的高值段均出现在 10 时至 18 时段内, 但是  $\text{CO}_2$  浓度的最大值出现时间不同, 1m 高处  $\text{CO}_2$  浓度的最大值出现在 12 时, 1 m 深度处由于受气温等因素的影响较大,  $\text{CO}_2$  浓度的最大值也出现在 12 时, 2 m 和 4 m 深度相对较深, 受气温等因素的影响较小, 其  $\text{CO}_2$  浓度的最大值出现时间要滞后 2~3 h 左右, 分别出现在 14 时和 15 时。不同深度  $\text{CO}_2$  浓度的低值段均出现在 1 时至 7 时段内, 1 m、2 m、4 m 最小值分别出现在 5 时、5 时和 6 时, 较 1 m 高处  $\text{CO}_2$  浓度的最小值要晚 1~2 h 左右。

2010 年 5 月 26~27 日对流动沙丘迎风坡中下部不同深度的  $\text{CO}_2$  浓度进行了昼夜观测(图 3b), 观测结果的标准差介于  $15\sim 26 \text{ ml m}^{-3}$  之间。通过对观测结果分析可知, 中下部不同深度的  $\text{CO}_2$  浓度昼夜变化规律与中上部相同; 除 2 m 深度处 24 h  $\text{CO}_2$  浓度的平均值略小于中上部外, 其他深度处与中上部相同深度处的 24 h  $\text{CO}_2$  浓度的平均值一样。

### 2.3 民勤流动沙丘沙层 $\text{CO}_2$ 浓度

2009 年 7 月 13~14 日对民勤流动沙丘 A 不同深度的  $\text{CO}_2$  浓度进行了间隔为 1 h 的连续昼夜观测(图 4a), 观测结果的标准差介于  $57.2\sim 73.1 \text{ ml m}^{-3}$  之间。由观测结果可知, 流动沙丘 A 4 m 深度 24 h  $\text{CO}_2$  浓度最大, 平均值为  $720 \text{ ml m}^{-3}$ , 变化范围为  $630\sim 840 \text{ ml m}^{-3}$ ; 1 m 深处的 24 h  $\text{CO}_2$  浓度的平均值最小, 只有  $410 \text{ ml m}^{-3}$ , 变化范围为  $320\sim 560 \text{ ml m}^{-3}$ ; 2 m 深处的 24 h  $\text{CO}_2$  浓度的平均值介于 2 m 深处和 1 m 深处之间, 为  $540 \text{ ml m}^{-3}$ , 变化范围为  $430\sim 670 \text{ ml m}^{-3}$ 。与诺尔图湖东大沙山观测区和沙坡头观测区相似, 流动沙丘 A 4 m 和 2 m 深度  $\text{CO}_2$  浓度的低值段出现时间较 1 m 深度处要晚些。不同深度  $\text{CO}_2$  浓度的高值段均出现在光照强烈、温度较高的白天。1 m、2 m 和 4 m 深处  $\text{CO}_2$  浓度最大值均出现在午后的 15 时。

2009 年 7 月 14~15 日对流动沙丘 B 不同深度的  $\text{CO}_2$  浓度进行间隔为 1 h 的连续昼夜观测(图 4b), 观测结果的标准差介于  $70.4\sim 89.8 \text{ ml m}^{-3}$  之间。通过对观测结果分析可知, 该处的  $\text{CO}_2$  浓度总体较流动沙丘 A 要小。与流动沙丘(A)最大的不同在于流动沙丘 B 1 m、2 m 和 4 m 深处的  $\text{CO}_2$  浓度的最大值出现较早, 分别出现在午后的 13 时、13 时、14 时。



a,b 分别为民勤观测点流动沙丘 A 和流动沙丘 B 不同深度处  $\text{CO}_2$  浓度和温度变化情况 a,b is the variation situation of temperature and  $\text{CO}_2$  concentration at different depth in the moving dune A and moving dune B at Minqin observation, respectively

图4 腾格里沙漠民勤观测点  $\text{CO}_2$  浓度与温度变化

Fig.4 Variation of  $\text{CO}_2$  concentration and temperature at Minqin observation site in the Tengger Desert

## 3 讨论

### 3.1 流动沙漠区沙层CO<sub>2</sub>的释放及扩散系数

大气中 CO<sub>2</sub> 含量的多少对全球气候变化具有重要影响作用，因此，对作为碳循环中重要环节的 CO<sub>2</sub> 的研究也越来越多。过去的研究发现人类活动产生的一部分 CO<sub>2</sub> 去向不明，目前已知道在全球水循环过程中<sup>[18]</sup>、岩溶作用过程中<sup>[8-10]</sup>和岩石风化过程中<sup>[8]</sup>均可能吸收了一部分 CO<sub>2</sub>。所以查明一个地区是 CO<sub>2</sub> 的源还是汇的地区很有意义。虽然沙漠区植被稀少、微生物活动很弱，但是沙漠在全球范围内分布广泛，查明沙漠区是 CO<sub>2</sub> 吸收区还是释放区对研究全球气候变化和揭示沙漠在全球碳循环过程中的作用有重要科学意义。根据对阿拉善流动沙漠区沙层 CO<sub>2</sub> 浓度的观测结果分析发现，1 m、2 m、3 m、4 m、5 m 深度沙层中的 CO<sub>2</sub> 浓度均高于地面空气中的 CO<sub>2</sub>。地表 10 cm 高度空气中 CO<sub>2</sub> 还存在明显昼夜变化规律，这种变化规律与不同深度沙层 CO<sub>2</sub> 浓度变化一致，显然这是沙层 CO<sub>2</sub> 释放决定的变化，表明沙层在较快地向地面释放 CO<sub>2</sub>。沙层不仅白天向空气释放 CO<sub>2</sub>，夜间也在释放 CO<sub>2</sub>。沙漠区植物稀少，观测点一般是裸露的沙地，植物的光合作用很弱，吸收的 CO<sub>2</sub> 很少，这指示该区是 CO<sub>2</sub> 的释放区。

Fick 定律中的扩散系数  $D$  代表单位浓度梯度下的扩散通量，它表达了某组分在介质中扩散的快慢，是物质的一种传递性质。为了进一步表达 CO<sub>2</sub> 扩散的快慢，对不同深度处沙层 CO<sub>2</sub> 的扩散系数进行了计算，结果如表 1。

表1 阿拉善流动沙漠区不同深度处沙层CO<sub>2</sub>的扩散系数

Table 1 Diffusion coefficient of CO<sub>2</sub> at different depths in the Alxa Desert area

观测位置 Observing location	深度 Depth (m)	扩散系数 Diffusion coefficient (10 <sup>-5</sup> m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> )	观测位置 Observing location	深度 Depth (m)	扩散系数 Diffusion coefficient (10 <sup>-5</sup> m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> )
沙坡头沙丘中上部 Top and middle of Shapotou Dune	1	1.52	沙坡头沙丘中下部 Down and middle of Shapotou Dune	1	1.52
民勤流动沙丘 A Minqin Moving Dune A	2	1.45	民勤流动沙丘 B Minqin Moving Dune B	2	1.45
诺尔图湖东 大沙山中上部 Top and middle of Dashashan Dune,	4	1.44	诺尔图湖东 大沙山中下部 Down and middle of Dashashan Dune,	4	1.43
东到 Nuoertu East to Nuoertu	1	1.59	东到 Nuoertu East to Nuoertu	1	1.58
	2	1.51		2	1.50
	4	1.50		4	1.49
	1	1.57		1	缺失数据 missing data
	2	1.50		2	1.50
	3	1.49		3	1.49
	5	1.48		5	1.49

### 3.2 沙层CO<sub>2</sub>浓度在深度上的变化和释放潜力

根据观测数据分析发现，诺尔图湖东大沙山和沙坡头观测区沙层的 CO<sub>2</sub> 浓度平均值均是 2 m 深度处最大，1 m 高度处沙层的 CO<sub>2</sub> 浓度平均值最小(图 5)。民勤沙区各深度沙层的 CO<sub>2</sub> 浓度平均值普遍较大，其 4 m 深度处的 CO<sub>2</sub> 浓度平均值是所有观测孔中最大的一个，为 720 ml m<sup>-3</sup>。这是由于沙丘沙层中 CO<sub>2</sub> 主要是微生物分解有机质产生的。在地下 2~4 m 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，所以沙丘之下 2~4 m 左右深处 CO<sub>2</sub> 含量较高。1 m 深度沙层中含水量较低，微生物数量少，其活动产生的 CO<sub>2</sub> 也较少。虽然 5 m 深度范围内不同深处沙层 CO<sub>2</sub> 浓度存在差别，但差别不是很大(图 5)，高低浓度差异一般在 30% 之内，而且较空气中的 CO<sub>2</sub> 浓度都明显高(图 5)，这指示沙层 5 m 深度范围内释放潜力较大。

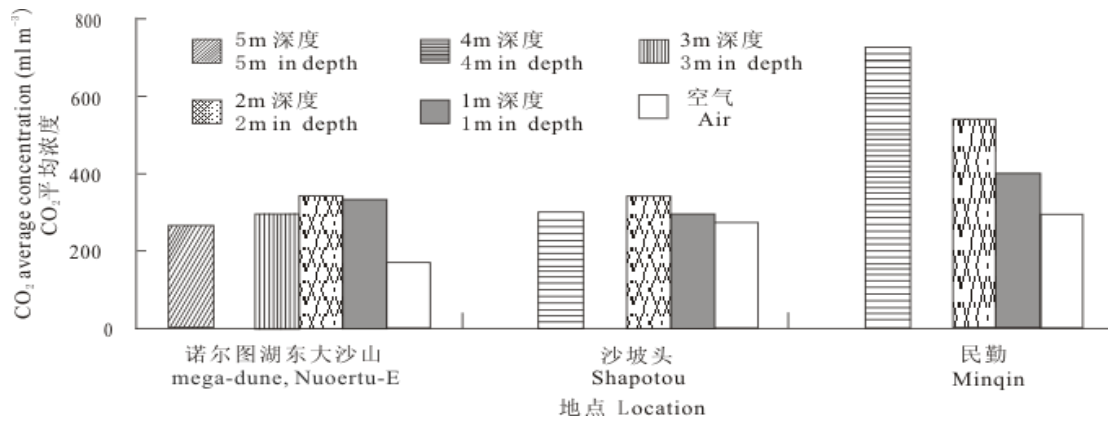


图5 不同深度沙丘昼夜 CO<sub>2</sub> 浓度平均值

Fig. 5 Mean CO<sub>2</sub> concentration of sand layers at different depth in the day and night

### 3.3 沙层昼夜温度变化与 CO<sub>2</sub> 浓度变化规律与释放规律

国内外学者对于温湿地区的森林<sup>[16]</sup>、草地<sup>[17]</sup>及农田<sup>[19]</sup>进行了较多的研究, 得出这些地区土层 CO<sub>2</sub> 存在明显的变化规律和白天浓度与释放量高于夜间等重要的认识。在西安附近的研究表明, 半湿润地区草地 CO<sub>2</sub> 浓度为 7 500 ml m<sup>-3</sup> 左右, 在 4 m 深度范围内的差异较小<sup>[20]</sup>。阿拉善流动沙漠区环境恶劣, 流动沙丘沙层 CO<sub>2</sub> 是否具有规律的变化是未查明的问题。阿拉善流动沙漠区上述 6 个观测点 19 个钻孔沙层 CO<sub>2</sub> 浓度变化在 80~840 ml m<sup>-3</sup> 之间, 与西安附近草地 1~4 m CO<sub>2</sub> 浓度相比, 流动沙漠区 1~5 m 沙层 CO<sub>2</sub> 浓度较西安地区显著低, 这是极端干旱的荒漠气候决定的。

阿拉善流动沙漠区上述 6 个观测点 19 个钻孔不同深度沙层 CO<sub>2</sub> 浓度从早 8 时至次日 7 时均呈现由低变高再变低的规律(图 2, 图 3, 图 4), 与一昼夜中为空气温度的变化规律一致, 表明这种变化规律在极端干旱的流动沙漠区具有普遍性。因为地表土层 CO<sub>2</sub> 主要来自微生物的活动<sup>[11]</sup>, 而阿拉善流动沙漠区植物稀少, 植物根系呼吸产生的 CO<sub>2</sub> 很少, 该区沙层微生物活动决定了 CO<sub>2</sub> 的浓度, 所以沙层 CO<sub>2</sub> 浓度变化也指示了微生物活动规律的变化。在 24h 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沙层 CO<sub>2</sub> 浓度变化的最主要因素。

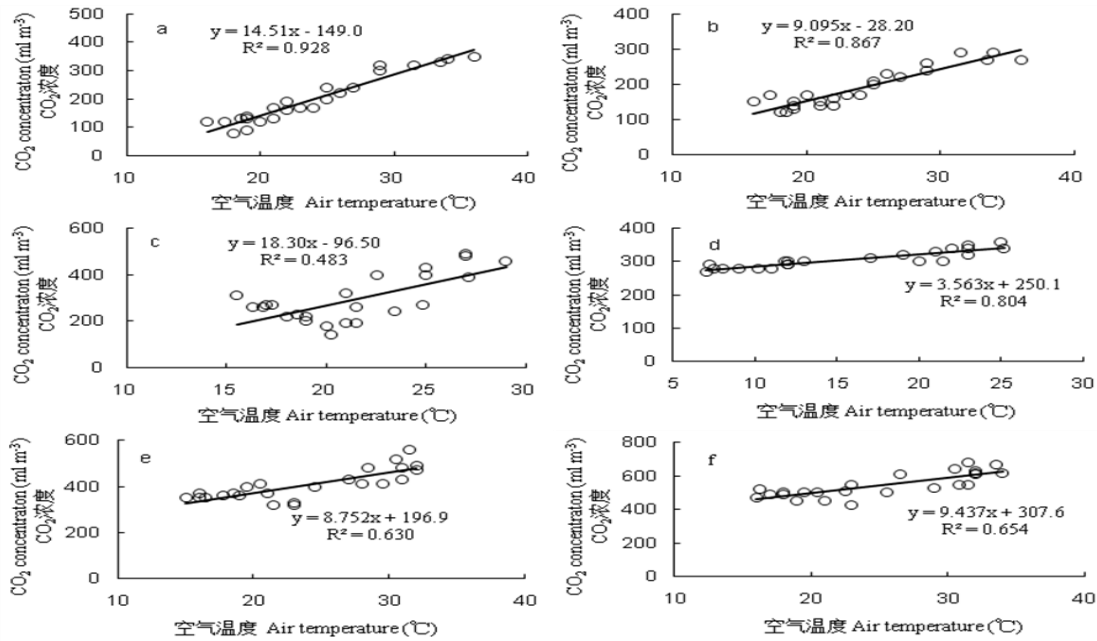
### 3.4 流动沙漠区沙层 CO<sub>2</sub> 浓度与温度的相关性

观测结果表明, 沙层 CO<sub>2</sub> 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, 6 个观测点的 CO<sub>2</sub> 浓度与空气温度均具有较好的正相关关系(图 6)。这表明在极端干燥的沙漠区, 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 CO<sub>2</sub> 浓度和 CO<sub>2</sub> 释放的最主要的因素。

### 3.5 流动沙漠区水分对沙层 CO<sub>2</sub> 浓度的影响

在相同的观测时段, 不同深度 CO<sub>2</sub> 浓度存在很大差异。这主要是不同深度处沙层中的水分含量不同造成的。由于沙丘沙层中 CO<sub>2</sub> 主要是由微生物分解有机质产生, 微生物的活动环境对沙层 CO<sub>2</sub> 浓度的高低起到决定性的影响。在温度适宜和结构疏松多孔的沙层中, 对微生物活动起到影响作用的主要是沙层含水量。为证实沙层水分对 CO<sub>2</sub> 浓度的影响, 对 5 m 深度范围的沙层含水量进行了采样测定, 采样间距为 10 cm, 利用烘干称重法进行含水量测定。结果表明, 诺尔图湖东大沙山中下部沙层含水量明显高于中上部(表 2), 与该观测点沙层 CO<sub>2</sub> 浓度的变化趋势相吻合(图 2); 沙坡头观测点 2 m 深度处沙层平均含水量最高, 4 m 深度处次之, 1 m 深度处最低(表 2), 与其各深度沙层 CO<sub>2</sub> 浓度的大小一致(图 3)。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 CO<sub>2</sub> 浓度高低的主要因素。



a、b分别是诺尔图湖东大沙山迎风坡中下部3 m深处和5 m深处CO<sub>2</sub>拟合曲线；c、d分别是诺尔图湖东大沙山迎风坡中上部3 m深处和沙坡头流动沙丘迎风坡中上部4 m深处CO<sub>2</sub>拟合曲线；e、f 分别是民勤沙漠区流动沙丘迎风坡中部1 m深处和2 m深处CO<sub>2</sub>拟合曲线 Note: a and b is the fitting curve of CO<sub>2</sub> concentration, respectively, in the sand layer 3 m and 5 m in depth in the down and middle of windward slope, Dashashan Dune, east to the Nuertu Lake; c and d is the fitting curve of CO<sub>2</sub> concentration in the sand layer 4 m in depth at the top and in the middle of windward slope of Shapotou Dune and 3 m in depth on the top and in the middle of windward slope of the Dashashan Dune, east to the Nuertu Lake; e and f is the fitting curve of CO<sub>2</sub> concentration in sand layers 2m and 1m in depth in the middle of windward slope, in the Minqin Moving Dune area

图6 阿拉善沙漠6个观测点空气温度与不同深度沙丘CO<sub>2</sub>浓度的线性拟合

Fig. 6 The linear correlation between temperature and CO<sub>2</sub> concentration at various depths of sand dunes in the Alxa Desert

表2 阿拉善沙漠区2010年5月沙层含水量

Table 2 Moisture contents of sand layers at the Alxa Desert area in May 2010 (%)

	0~1 m 含水量范围	0~1 m 平均含水量	1~2m 含水量范围	1~2m 平均含水量	3~4 m 含水量范围	3~4 m 平均含水量	4~5 m 平均含水量
采样位置	Range of moisture content in sand layer	Mean moisture content in sand layer	Range of moisture content in sand layer	Mean moisture content in sand layer	Range of moisture content in sand layer	Mean moisture content in sand layer	Mean moisture content in sand layer
Location	(0~1 m)	(0~1 m)	(1~2 m)	(1~2 m)	(3~4 m)	(3~4 m)	(4~5 m)
a	0.01~2.25	1.03	1.40~1.85	1.64	1.65~2.25	2.01	1.83
b	0.06~2.55	1.48	2.75~3.25	2.96	2.05~2.40	2.18	1.96
c	0.79~3.08	1.35	0.25~10.65	1.95	0.42~2.36	1.45	—
d	1.90~3.55	2.24	2.46~3.88	3.07	1.34~3.94	2.28	—

注：a, b, c, d 分别代表诺尔图中上部、诺尔图中下部、沙坡头中上部、沙坡头中下部 Note: a, b, c, d

respectively is top and middle of Nuoertu, down and middle of Nuoertu, top and middle of Shapotou, down and middle of Shapotou

## 4 结论

1) 阿拉善流动沙漠区空气中 CO<sub>2</sub> 浓度较 1 m、2 m、3 m、4 m、5 m 沙层中 CO<sub>2</sub> 浓度均低, 表明流动沙漠区在温暖季节会向空气中释放 CO<sub>2</sub>, 是大气 CO<sub>2</sub> 的来源区。沙层不仅白天向空气释放 CO<sub>2</sub>, 夜间也在释放 CO<sub>2</sub>。从沙层 5 m 深处 CO<sub>2</sub> 浓度较空气中高分析, 沙层 CO<sub>2</sub> 释放潜力较大。

2) 在极端干旱的阿拉善流动沙漠区, 5 m 深度范围内不同深处沙层 CO<sub>2</sub> 浓度存在一定差异, 2 m 深处的 CO<sub>2</sub> 浓度最大, 3 m、4 m 次之, 1 m 和 5 m 处最小。

3) 在极端干旱的阿拉善流动沙漠区沙层 CO<sub>2</sub> 浓度的昼夜变化具有明显的规律性, 沙层各个深度 CO<sub>2</sub> 浓度从早 8 时至次日 7 时均呈现由低到高再到低的变化规律。沙层 CO<sub>2</sub> 浓度与昼夜温度变化呈显著正相关关系。

4) 极端干旱的阿拉善流动沙漠区水分含量较高的沙层 CO<sub>2</sub> 浓度明显高, 表明沙层含水量高低是决定沙层 CO<sub>2</sub> 浓度水平的主要因素。

## 参考文献

- [1] Petra T, Elisabeth H S, Dennis S O, et al. Holistic, adaptive management of the terrestrial carbon cycle at local and regional scales. *Global Environmental Change*, 2008, 18(1): 128-141
- [2] Tian D L, Peng Y Y, Yan W D, et al. Effects of thinning and litter fall removal on fine root production and soil organic carbon content in masson pine plantations. *Pedosphere*, 2010, 20(4): 486-493
- [3] 潘根兴, 李恋卿, 郑聚锋, 等. 土壤碳循环研究及中国稻田土壤固碳研究的进展与问题. *土壤学报*, 2008, 45(5): 901-915. Pan G X, Li L Q, Zheng J F, et al. Perspectives on cycling and sequestration of organic carbon in paddy soils of China (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 901-915
- [4] Luca C, Manuel C, Marco C, et al. Thermodynamic analysis of different two-stage transcritical carbon dioxide cycles. *International Journal of Refrigeration*, 2009, 32(5): 1 058-1 067
- [5] Martin P, Johannes H. Life cycle assessment of carbon dioxide capture and storage from lignite power plants. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2009, 3(1): 49-66
- [6] Schulze E D, Lloyd J, Kelliher F M, et al. Productivity of forest in the Eurosiberia boreal region and their potential to act as a carbon sink-a synthesis. *Global Change Biology*, 1999, 5: 703-722
- [7] Pacala S W, Hurtt G C, Baker D, et al. Consistent land and atmosphere-based U. S. carbon sink estimates. *Science*, 2001, 292: 2 316-2 319
- [8] 赵景波, 袁道先, 席临平. 西安灞河流域现代岩溶作用与 CO<sub>2</sub> 吸收量. *第四纪研究*, 2000, 20(4): 367-373. Zhao J B, Yuan D X, Xi L P. Research on the modern Karst processes and absorbed amount of CO<sub>2</sub> in Bahe River catchment of Xi'an (In Chinese). *Quaternary Sciences*, 2000, 20(4): 367-373
- [9] 袁道先. 现代岩溶学与全球变化研究. *地学前缘*, 1997, 4(1/2): 17-41. Yuan D X. Modern Karstology and global change study (In Chinese). *Earth Science Frontiers*, 1997, 4(1/2): 17 - 41
- [10] 袁道先, 章程. 岩溶动力学的理论探索与实践. *地球学报*, 2008, 29(3): 355-365. Yuan D X, Zhang C. Karst dynamics theory in China and its practice (In Chinese). *Acta Geoscientica Sinica*, 2008, 29(3): 355-365
- [11] 麦克拉伦 A D, 波得森 G H, 斯库金斯 D, 等. 土壤生物化学. 北京: 农业出版社, 1984: 490-492. McLaren A D, Anderson G H, Popescu Hopkins D, et al. *Soil biochemistry (Chinese edition)*. Beijing: Agriculture Press, 1984: 490-492
- [12] 申建波, 张福锁, 毛达如. 根际微生态系统中的碳循环. *植物营养与肥料学报*, 2001, 7(2): 232-240.



- Shen J B, Zhang F S, Mao D R. Carbon cycling in rhizosphere micro-ecological system (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2001, 7(2): 232-240
- [13] Williams M A, Rice C W, Owensby C E. Carbon dynamics and microbial activity in tall grass prairie exposed to elevated CO<sub>2</sub> for 8 years. *Plant and Soil*, 2000, 227(1/2): 127-137
- [14] 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. *Oecologia*, 2002, 131(2): 236-244
- [15] 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. *生态学报*, 1997, 17(5): 469-476. Liu S H, Fang J Y. Effect factors of soil respiration and the temperature's effects on the soil respiration in the global scale (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 1997, 17(5): 469-476
- [16] Nabuurs G J, Thürig E, Heidema N, et al. Hotspots of the European forests carbon cycle. *Forest Ecology and Management*, 2008, 256(3):194-200
- [17] 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. *Global Change Biology*, 2002, 8:599-615
- [18] 刘再华, Dreybrod W, 王海静. 一种由全球水循环产生的可能重要的CO<sub>2</sub>汇. *科学通报*, 2007, 52(20): 2 418-2 422. Liu Z H, Dreybrod W, Wang H J. A possible important CO<sub>2</sub> sinks that caused by the global water cycle (In Chinese). *Chinese Science Bulletin*, 2007, 52(20): 2 418-2 422
- [19] 胡健, 杨连新, 周娟, 等. 开放式空气CO<sub>2</sub>浓度增高(FACE)对水稻灌浆动态的影响. *中国农业科学*, 2007, 40(11): 2 443-2 451 Hu J, Yang L X, Zhou J, et al. Effect of free-air CO<sub>2</sub> enrichment (FACE) on grain filling dynamics of rice (In Chinese). *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(11): 2 443-2 451
- [20] 张春林, 赵景波, 杨晓东. 草地不同深度土壤CO<sub>2</sub>浓度变化特征研究. *陕西师范大学学报:自然科学版*, 2008, 36(6): 90-95. Zhang C L, Zhao J B, Yang X D. Research on soil carbon dioxide density in different depths of the grassland (In Chinese). *Journal of Shaanxi Normal University: Natural Science Edition*, 2008, 36(6): 90-95

## CO<sub>2</sub> concentration and its diurnal variation in sand layer of mobile sand dunes of Alxa Desert

Zhao Jingbo<sup>1,2</sup> Shao Tianjie<sup>2</sup> Zhou Qi<sup>1</sup> Ma Yandong<sup>2</sup> Xing Shan<sup>2</sup> Yu Keke<sup>2</sup> Dong Zhibao<sup>2</sup>

(1 Key Laboratory of Disaster Monitoring and Mechanism Simulating of Shaanxi Province, Baoji College of Arts and Science, Baoji, Shaanxi, 721013, China)

(2 College of Tourism and Environment Science, Shaanxi Normal University, Xi'an, 710062 China)

**Abstract** In order to explore CO<sub>2</sub> concentration in the sand layer of the mobile sand dunes of the Alxa Desert, and its influence atmospheric CO<sub>2</sub> and its role in the global carbon cycling, the research team utilized infrared CO<sub>2</sub> monitor to observe diurnal variation of CO<sub>2</sub> concentrations in the 19 holes drilled in mobile sand dunes of the desert. Results show that the CO<sub>2</sub> concentration in the air was lower than that in the sands 1 m, 2 m, 3 m, 4 m or 5 m deep, which indicates that the mobile sand dunes with rare plants release CO<sub>2</sub> into the atmosphere both at night and in the daytime during the warm season, acting as CO<sub>2</sub> sources. In the sand layer 5 m deep in the profile, the CO<sub>2</sub> concentration is markedly higher than that in the air, suggesting that the potential of CO<sub>2</sub> release is very big. In the extremely arid part of the Alxa Desert, CO<sub>2</sub> concentration is usually higher in the sand layer 2 m deep than in the layers 1 m, 3 m, 4 m or 5 m deep, but with some individual exceptions. Diurnal variation of CO<sub>2</sub> concentration in the area follows a specific law in all the layers, showing a curve of saddle shape from 08:00 am to 07:00 am the next day, and a significant positive relationship with the temperature in the profile. In that region, the sand layer higher in moisture content is significantly higher in CO<sub>2</sub> concentration, which indicates that moisture content in the sand layers is the major factor determining CO<sub>2</sub> concentration in the layer.

**Key words** CO<sub>2</sub> concentration; Law of diurnal variation; CO<sub>2</sub> release; Alxa; Desert area