

青海湖北部土壤 CO₂ 浓度变化研究

赵景波^{1, 2}, 李岩¹, 曹军骥², 郁科科¹

(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)

摘要: 利用红外 CO₂ 监测仪对青海湖地区哈尔盖附近不同植被、不同深度条件下的土壤 CO₂ 浓度进行了多次昼夜观测。观测结果表明, 在年平均温度 1℃ 左右的高寒青海湖地区, 从早 8:00 到次日早 8:00 土壤 CO₂ 浓度具有从低到高再到低的昼夜变化规律, 这种变化特点与昼夜温度变化基本一致。在土壤夜间最低温度为 0℃ 和更高地区, 土壤 CO₂ 浓度的这种昼夜变化规律具有普遍性。该区白天 12 小时土壤 CO₂ 浓度略高于夜间 12 小时, 但比低海拔地区白天与夜间的浓度差异小。在土壤 1 m 深度范围内 CO₂ 浓度随深度增加而增加。土壤 CO₂ 浓度明显高于地面之上 100 cm 空气 CO₂ 浓度, 显示在温度较高季节土壤在向大气释放 CO₂。在高寒干旱草原粉砂土分布区, 只要土壤温度接近零度或零度以上, 土壤 CO₂ 浓度就会高于空气 CO₂ 浓度, 土壤 CO₂ 就会向空气中排放。高寒干旱区影响土壤 CO₂ 浓度的最主要的因素是温度, 该地 Q₁₀ 平均值为 2.81, 表明温度对青海湖草原土壤 CO₂ 浓度的影响比对低海拔草原 CO₂ 浓度的影响更大。

关键词: 青海湖地区; 土壤 CO₂ 浓度; 昼夜变化规律; 土壤 CO₂ 释放; 温度

中图分类号: Q14 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-9901(2011)01-0278-07

A study on change of soil CO₂ concentration in north Qinghai Lake

ZHAO Jing-bo^{1,2}, LI Yan¹, CAO Jun-ji², YU Ke-ke¹

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

Abstract: The CO₂ concentration at different vegetation and different depth of soil CO₂ concentration of day and night at Haergai town is observed by utilizing infrared CO₂ monitor. The results show that from 8:00 am to 8:00 am of the next day, the soil CO₂ concentration is from low to high then to low at the cold and alpine area whose average temperature is about 1 °C . The diurnal variation law of soil CO₂ concentration has universality at the area of minimum night temperature above 0 °C . The diurnal variation law of CO₂ concentration is consistent with the diurnal variation of temperature but lags for about 2 hours. The day soil CO₂ concentration was slightly higher than the night. The difference of CO₂ concentration between day and night is small at low altitude. The soil CO₂ concentrations increase with depth within 100 cm. The CO₂ concentration of soil was significantly higher than the air of 100 cm above ground, which shows that the soil released CO₂ into the atmosphere in high temperature seasons. The soil CO₂ concentration will release into air as long as the soil temperature close to 0°C or above 0°C at cold and arid grassland. The most important affecting factor of soil CO₂ concentration is temperature. The average value of Q₁₀ is 2.81, which shows that the temperature affects on grassland soil CO₂ concentration at high altitude greater than the low altitude.

Key words: Qinghai Lake; soil CO₂ concentration; law of diurnal variation; soil CO₂ release; temperature

在过去 20 多年间,人们对 CO₂ 浓度变化对全球气候变暖可能带来的影响给予了高度的关注,开展了很多研究。陆地生态系统中的土壤—植被亚系统一方面起着 CO₂ 源的功能,另一方面又是 CO₂ 重要的汇,其源汇平衡是人们研究的重要热点问题 (Vitousek et al, 1997; Schinder and Nadelhoffer, 1999; 高峰等, 2001; 李银鹏和季劲钧, 2001; 杨昕和王明星, 2001)。全球土壤是一个巨大的碳库,是大气 CO₂ 的重要来源 (Vitousek et al, 1997; 杨昕和王明星, 2001)。CO₂ 释放有增加农作物产量的作用 (刘绍辉和方精云, 1997),也是促进植被生长和岩溶作用的积极因素 (Prentice and Fung, 1990; 樊恒文和贾晓红, 2002),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。由于大气 CO₂ 是引起全球气候变化的重要温室气体 (蒋建军和倪绍祥, 1999),研究土壤呼吸、监测 CO₂ 浓度的变化,阐明其在自然界中浓度和排放量的变化,对于全面深入探讨全球变化及其影响具有十分重要的意义 (崔晓勇等, 2001)。过去虽然对土壤 CO₂ 浓度变化进行了许多研究,但对高寒的青海湖地区土壤 CO₂ 浓度研究很少。高寒环境对全球气候变化反应敏感,这类地区土壤 CO₂ 浓度与 CO₂ 释放的变化关系研究对全球气候变化研究有重要的参考价值。本文根据 2009 年 8 月份对草原植被和裸地不同深度土壤 CO₂ 浓度的多次昼夜观测,探讨青海湖北部土壤 CO₂ 浓度、昼夜变化规律及其影响因素。

1 研究地区和研究方法

刚察县位于青海省海北藏族自治州境西部,青海湖北岸,位于祁连山系大通山脉中段。属高原大陆性气候,年均温 -0.6℃,年平均降水量为 330 mm。哈尔盖乡位于刚察县境东南部,地处湖滨平原。哈尔盖河流过境内注入青海湖。青藏铁路穿境,交通便利 (樊恒文和贾晓红, 2002)。我们在哈尔盖附近选取低草地和裸地观测不同深度处 CO₂ 浓度。

土壤 CO₂ 浓度观测利用的仪器是红外 CO₂ 监测仪。首先利用轻便人力钻打出监测土壤一定深度的钻孔,然后进行 24 小时监测,每小时记录 1 个观测数据。对 CO₂ 浓度观测结果用 EXCEL 软件进行分析处理。

2 观测结果

为了对土壤 CO₂ 的昼夜浓度变化规律及控制因素有一个清楚的认识,我们在青海湖周边的哈尔盖附近选取平坦且不易受人工干扰的裸地与草地,采用轻型人力钻打出不同深度的钻孔,在 2009 年 8 月期间分别对不同深度的土壤进行大气 CO₂ 的昼夜监测。每隔一个小时读取 1 个数据,以观测不同深度土壤 CO₂ 浓度的变化规律。如果土壤 CO₂ 浓度高于地面空气,反映土壤在向空气释放 CO₂。在测量 CO₂ 浓度的同时,也测定了土壤空气温度和地面之上 1 m 高度处空气中的 CO₂ 的浓度。现将观测结果介绍如下。

2.1 哈尔盖低草地不同深度 CO₂ 浓度观测结果

由昼夜 24 小时观测结果 (表 1 和图 1) 可知,哈尔盖附近低草地 50 cm 深度处 CO₂ 浓度变化范围是 0.037% ~ 0.075%,每小时平均浓度是 0.048%。在 22:15 - 10:15 CO₂ 浓度较低,一般为 0.027% ~ 0.047%。从 11:15 开始浓度有明显上升,到 13:15 升至 0.054%,随后有明显的波动变化,在 19:15 升至 0.075% 的最高值,随后明显下降。在一昼夜中的白天 12 小时 (8:15 - 19:15) CO₂ 每小时平均浓度稍高于夜间 12 小时 (20:15 - 次日 7:15),白天大约是夜间的 1.04 倍,相差很小。

低草地 25 cm 深度处 CO₂ 浓度变化范围是 0.032% ~ 0.088%,在 19:15 左右 CO₂ 浓度达到最高值,随后迅速下降。在 22:15 降为 0.032%。从 0:15 到 09:15 呈缓慢减小趋势,在 09:15 降为 0.027%。随后有明显的回升,到 13:15 升为 0.047%,之后变化平缓,稍有波动。白天 12 小时 (8:15 - 19:15)

表 1 哈尔盖低草地不同深度 CO₂ 浓度对比
Table 1 Soil CO₂ concentrations' contract in different depth in low grass land at Haergai

深度或高度 (cm)	小时平均浓度 (%)	小时最高浓度 (%)	小时最低浓度 (%)	20:15 - 次日 7:15	8:15 - 19:15
				小时平均浓度 (%)	小时平均浓度 (%)
50	0.048	0.075	0.037	0.047	0.049
25	0.042	0.088	0.032	0.038	0.044
地上 100	0.020	0.027	0.014	0.019	0.020

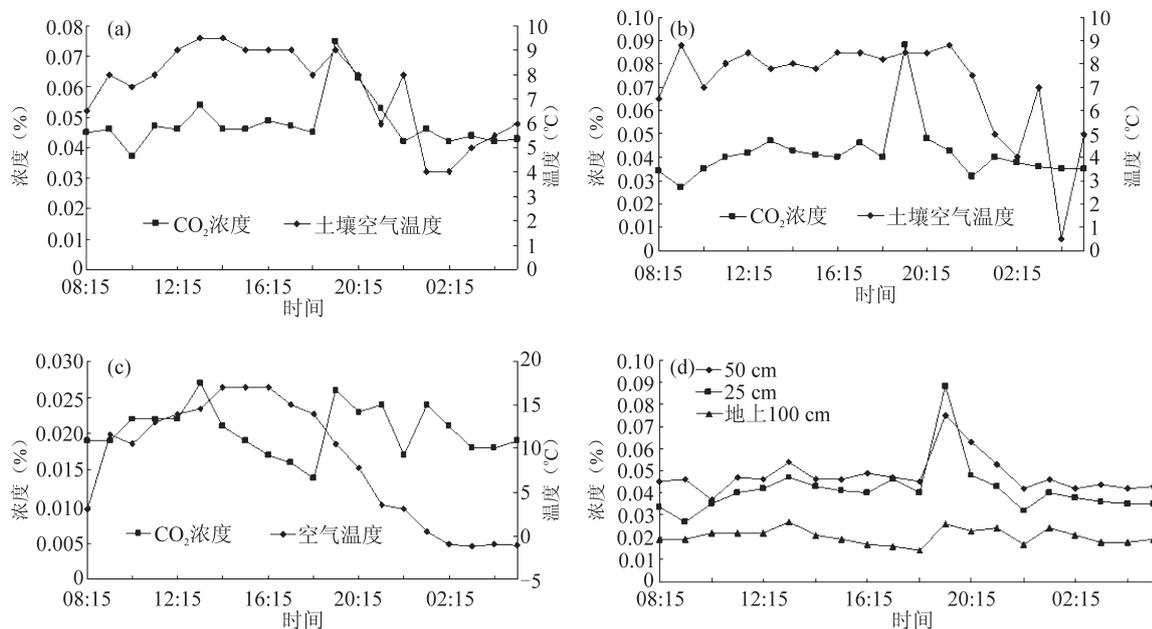


图1 哈尔盖乡低草地不同深度 CO₂ 浓度的昼夜变化

Fig.1 Soil CO₂ concentrations' diurnal variation in different depths in low grass land at Haergai

(a) 为 50 cm 深度; (b) 为 25 cm 深度; (c) 为地上 100 cm; (d) 为不同深度对比

CO₂ 的平均浓度稍高于夜间 12 小时 (20:15 - 次日 7:15), 白天大约是夜间的 1.16 倍。

低草地地面之上 100 cm 高度空气 CO₂ 的浓度变化范围是 0.014% ~ 0.027%, 在 19:15 - 22:15 CO₂ 浓度由 0.026% 迅速下降至 0.017%, 之后在 00:15 迅速回升至 0.024%。然后呈小幅度波动变化。在 13:15 达到最大值, 然后迅速下降。在 18:15 降为 0.014%。白天 12 小时 (8:15 - 19:15) CO₂ 平均浓度稍高于夜间 12 小时 (20:15 - 次日 7:15), 白天大约是夜间的 1.05 倍。

地上 100 cm 空气 CO₂ 浓度明显低于土壤 50 cm 深处和 25 cm 深处。土壤 50 cm 深处 CO₂ 每小时平均浓度是地上 100 cm 空气中的 2.4 倍, 土壤 25 cm 深度处的 CO₂ 每小时平均浓度是地上 100 cm 空气中的 2.1 倍。

2.2 哈尔盖裸地不同深度 CO₂ 浓度的观测结果

由昼夜 24 小时观测结果 (表 2 和图 2) 可知, 裸地土壤 60 cm 深处 CO₂ 浓度的变化范围是 0.021% ~ 0.096%, 每小时平均浓度为 0.055%。在 08:15 - 13:15, CO₂ 浓度由 0.033% 持续上升至 0.083%。在 14:15 - 17:15 CO₂ 浓度变化较小, 为 0.074% ~ 0.082%。在 18:15 - 22:15 波动较大, 为 0.042% ~ 0.096%。22:15 - 07:15 CO₂ 浓度变化较小, 为 0.038% ~ 0.045%, 处于相对低值。白天时段

(8:15 - 19:15) 的平均每小时浓度高于夜间时段 (20:15 - 次日 7:15), 大约是夜间的 1.31 倍。CO₂ 浓度最高值为 0.096%, 出现时间在 19:15, 与土壤空气温度高值出现时间一致。

裸地土壤 30 cm 深处 CO₂ 浓度变化范围是 0.002% ~ 0.064%, 每小时平均浓度为 0.027%。在 08:15 - 18:15, CO₂ 浓度变化较小, 范围是 0.020% ~ 0.027%。在 18:15 - 21:15, CO₂ 浓度变化较大, 范围是 0.020% ~ 0.064%。在 22:15 - 次日 07:15, CO₂ 浓度变化较小, 范围是 0.021% ~ 0.029%。白天 12 小时 (8:15 - 19:15) 的平均小时浓度高于夜间 12 小时 (20:15 - 次日 7:15), 白天大约是夜间的 1.07 倍, 相差较小。

裸地地面之上 100 cm 空气 CO₂ 浓度变化范围是 0.014% ~ 0.026%, 平均小时浓度为 0.021%。在 08:15 - 13:15, CO₂ 浓度由 0.019% 持续上升至 0.026%。在 18:15 下降为 0.014%, 随后在 19:15 快速上升为 0.026%。在 20:15 - 次日 07:15 CO₂ 浓度变化较小, 范围是 0.018% ~ 0.023%。白天 12 小时 (8:15 - 19:15) 的平均小时浓度高于夜间 12 小时 (20:15 - 次日 7:15), 白天大约是夜间的 1.05 倍, 相差不大。

裸地 CO₂ 浓度与深度具有明显的相关性, 在 60 cm 深度范围内 CO₂ 浓度随着深度的增加而增加。其中 60 cm 深处 CO₂ 每小时平均浓度是 30 cm 深

表 2 哈尔盖裸地不同深度 CO₂ 浓度对比
Table 2 Soil CO₂ concentrations' comparison in different depths in barren land at Haergai

深度或高度 (cm)	小时平均浓度 (%)	小时最高浓度 (%)	小时最低浓度 (%)	20:15 - 次日 7:15 小时平均浓度 (%)	8:15 - 19:15 小时平均浓度 (%)
60	0.055	0.096	0.021	0.048	0.063
30	0.027	0.064	0.002	0.026	0.028
地上 100	0.021	0.026	0.014	0.020	0.021

度处的 2.0 倍, 是地面之上 100 cm 高度处空气 CO₂ 浓度的 2.6 倍。

3 讨论

3.1 青海湖土壤 CO₂ 浓度昼夜变化规律

低海拔地区的研究表明, 从早 8:00 到次日 8:00 土壤 CO₂ 浓度变化具有从低到高再到低的变化规律 (陈四清和崔晓勇, 1999; Zheng et al, 1999; 李艳华和赵景波, 2006; 周正朝和上官周平, 2009)。海拔 3000 多米的高寒青海湖地区土壤 CO₂ 浓度昼夜变化规律如何, 还没有研究成果发表, 其他高寒区土壤 CO₂ 浓度昼夜变化规律的研究也很少见。对青海湖土壤 CO₂ 浓度的观测表明, 在年平均气温 1℃左右的青海湖高寒干旱区, 从早 8:00 到次日 8:00 土壤 CO₂ 浓度仍具有从低到高再到低的变化规

律 (图 1, 图 2)。在青海湖哈尔盖土壤夜间温度接近 0℃时, 土壤 CO₂ 浓度仍高于地面 1 m 高度处的空气 CO₂ 浓度, 这表明即使在高寒地区或寒冷地区, 只要土壤最低温度在夜间能够达到 0℃或更高, 土壤 CO₂ 浓度在一昼夜内就存在从当日早晨到次日早晨呈现由低到高再到低的变化规律。

影响土壤 CO₂ 浓度因素较多, 包括温度、湿度、有机质和土质等 (李凌浩等, 2000; Matamala and William, 2000; Qi and Xu, 2001; Astrid and Buchmann, 2005; 张春林等, 2008), 但影响土壤 CO₂ 浓度昼夜变化的主要因素是温度。在短暂的 24 小时内, 除土壤温度变化显著之外, 其他因素变化很小甚至无变化。因此, 土壤 CO₂ 浓度在一昼夜内的变化与温度具有明显的相关性 (图 1, 图 2), 温度是 CO₂ 浓度昼夜变化规律的决定因素。土壤

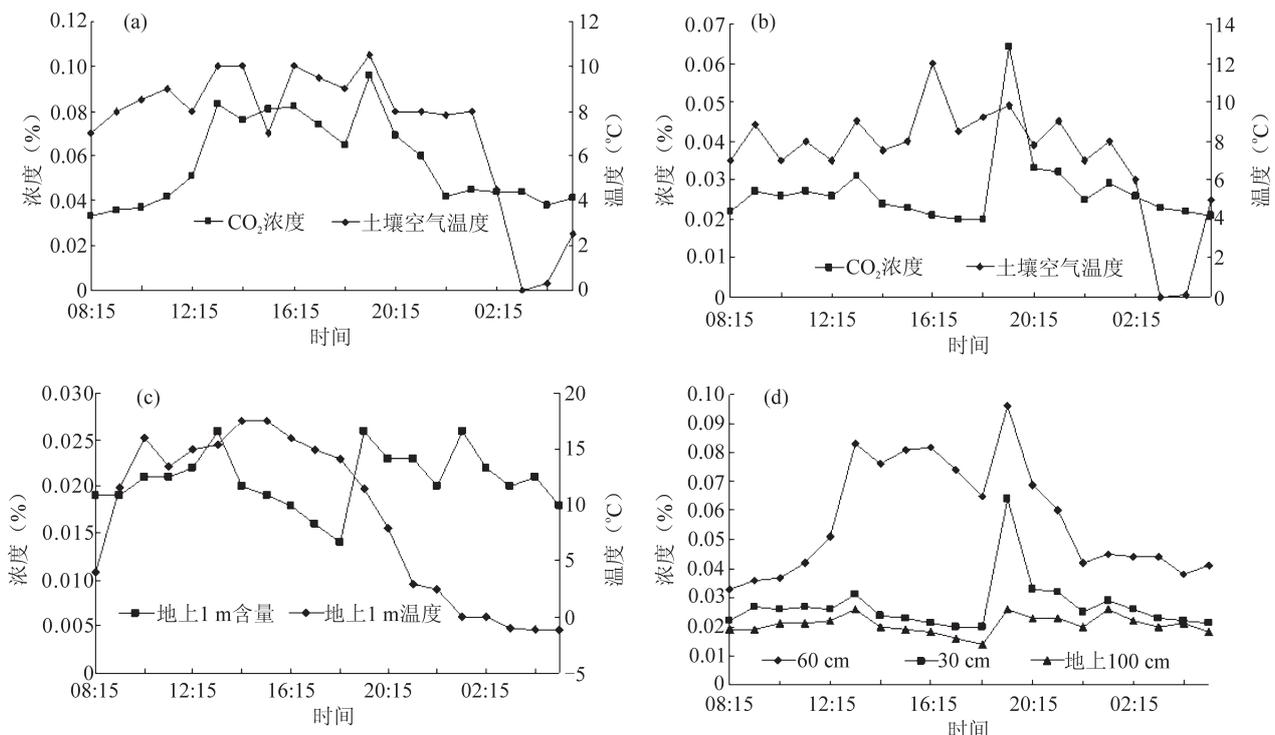


图 2 哈尔盖裸地不同深度 CO₂ 浓度的昼夜变化

Fig.2 Soil CO₂ concentrations' diurnal variation in different depths in barren land at Haergai

(a) 为 60 cm 深度; (b) 为 30 cm 深度; (c) 为地上 100 cm; (d) 为不同深度对比

中 CO_2 浓度与温度的变化在时间上并不完全一致, CO_2 浓度的变化曲线比温度曲线更加平缓。由 CO_2 浓度变化曲线可以看出, 单峰型的情况较少, 在大多数情况下, 昼夜变化呈现为多个小高峰, 这与该区温度变化大有关。

3.2 青海湖附近白天与夜间土壤 CO_2 浓度差异

哈尔盖低草地 CO_2 浓度在 50 cm 深度处白天每小时平均浓度是夜间的 1.04 倍, 25 cm 深度处白天每小时平均浓度是夜间的 1.16 倍, 地上 100 cm 高度处空气白天每小时平均浓度是夜间的 1.05 倍。裸地 50 cm 深度处白天每小时平均浓度是夜间的 1.31 倍, 30 cm 深度处白天每小时平均浓度是夜间的 1.07 倍, 地上 100 cm 高度处空气白天每小时平均浓度是夜间的 1.05 倍。从以上分析可以看出, 青海湖地区白天 CO_2 浓度要高于夜间的浓度, 但相差不大。

前人对低海拔温带草原地区土壤 CO_2 浓度的研究结果也表明白天土壤 CO_2 浓度高于夜间浓度(陈四清和崔晓勇, 1999; 李艳华和赵景波, 2006; Zheng et al, 1999; 周正朝和上官周平, 2009)。但是由于青海湖地区高寒的自然地理条件, 该区土壤 CO_2 浓度比其他温暖地区明显低。根据张春林等

(2008) 的研究结果, 西安市长安区附近的草地土壤 CO_2 浓度一般在 0.7% 以上, 是哈尔盖土壤 CO_2 浓度的 3 倍多。青海湖附近草地土壤 CO_2 浓度明显低的现象与该区特殊的高寒气候导致的植物和微生物呼吸作用弱和空气稀薄有关。

3.3 青海湖土壤与空气 CO_2 浓度差异

通过表 1 和表 2 的数据我们可以看出, 哈尔盖附近低草地土壤 CO_2 浓度明显高于地上 100 cm 处空气 CO_2 浓度。其中 50 cm 深处土壤 CO_2 平均小时浓度是地上 100 cm 空气中 CO_2 浓度的 2.4 倍, 25 cm 深处土壤 CO_2 平均小时浓度是地上 100 cm 空气中的 2.1 倍。哈尔盖附近裸地 60 cm 深处土壤 CO_2 平均小时浓度是地上 100 cm 高度处空气 CO_2 浓度的 2.6 倍, 30 cm 深处土壤 CO_2 平均小时浓度是地上 100 cm 大气中 CO_2 浓度的 1.3 倍。土壤不同深度 CO_2 浓度不同, 这是由土壤不同深度环境不同造成的。以往的研究表明, 土壤剖面中部 1 m 左右深处 CO_2 浓度最高, 向上部和向更深处浓度降低。这是由于土壤中部湿度较上部大, 有机质含量较下部多造成的。另外土壤上部 CO_2 释放较土壤中下部快, 也是土壤上部 CO_2 浓度较低的原因。青海湖哈尔盖附近土壤 CO_2 在深度上的变化与其他地区相

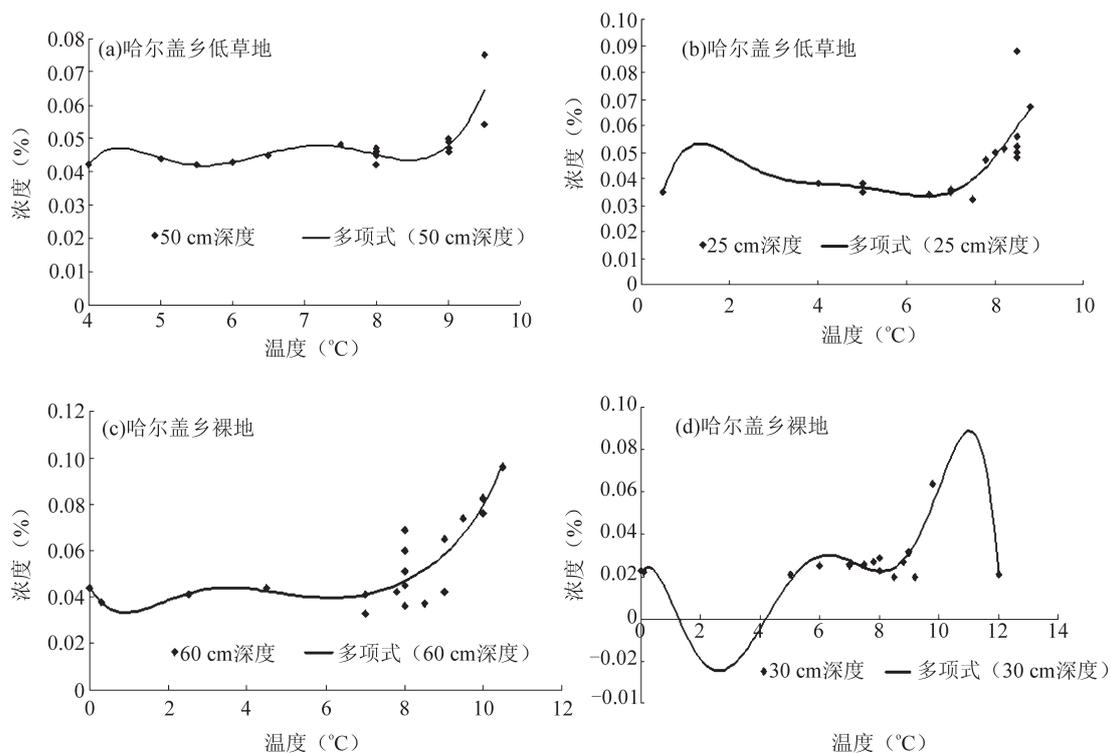


图3 哈尔盖温度与 CO_2 浓度的回归分析模型

Fig.3 Temperature and CO_2 concentration in the regression analysis model

(a) 为低草地 50 cm 深度; (b) 为低草地 25 cm 深度; (c) 为裸地 60 cm 深度; (d) 为裸地 30 cm 深度

表 3 哈尔盖土壤 CO₂ 浓度与土壤空气温度的关系及模拟方程
Table 3 Correlation between soil CO₂ concentration and temperature and model equations

地点	植被	深度 (cm)	回归方程	R ²
哈尔盖乡	低草地	50	$y = 0.0001x^6 - 0.0051x^5 + 0.0835x^4 - 0.7144x^3 + 3.39x^2 - 8.4486x + 8.6704$	0.7543
		25	$y = -2E-05x^6 + 0.0005x^5 - 0.0055x^4 + 0.0319x^3 - 0.095x^2 + 0.128x - 0.0089$	0.6802
	裸地	60	$y = -3E-06x^6 + 0.0001x^5 - 0.0015x^4 + 0.0081x^3 - 0.0183x^2 + 0.0123x + 0.0406$	0.7837
		30	$y = -1E-05x^6 + 0.0004x^5 - 0.0047x^4 + 0.026x^3 - 0.0576x^2 + 0.0237x + 0.0216$	0.6902

注: y 为土壤 CO₂ 浓度, x 为对应的土壤空气温度。

近, 1 m 深处土壤 CO₂ 浓度大于 0.5 m 之上的土壤 CO₂ 浓度。观测结果表明, 哈尔盖 0.5 ~ 1.0 m 深度范围土壤 CO₂ 浓度比地上 1 m 高度处空气 CO₂ 浓度高 2 倍多, 这种明显的差异表明青海湖地区在温度较高的季节土壤在向大气排放 CO₂。

观测结果显示, 青海湖附近空气 CO₂ 浓度变化范围是 0.014% ~ 0.027%, 平均为 0.020%, 我国大部分地区全年的 CO₂ 浓度一般为 0.038% 左右, 而全球大气中 CO₂ 浓度近几年为 0.035% 左右。由此可见, 在我们观测的季节, 青海湖附近空气 CO₂ 浓度比我国大部分地区明显偏低。

3.4 温度与土壤 CO₂ 浓度的关系

温度不仅影响植物地上部分的生理活动, 还直接影响土壤微生物的生长繁殖、根系的呼吸等活动。土壤生物活动, 特别是土壤微生物活动, 对土壤 CO₂ 释放具有非常重要的作用。

利用青海湖地区不同深度土壤温度和对应的土壤 CO₂ 浓度观测数据, 通过 EXCEL 软件做出散点图 (图 3), 并进行回归分析、二项式拟合, 得出空气土壤温度与 CO₂ 浓度的关系 (图 3)。

根据拟合结果可知, 所有实验观测点不同植被、不同深度的土壤 CO₂ 昼夜浓度与空气温度都具有较好的正相关关系 (图 3)。这表明在高寒的环境下, 空气温度是影响土壤 CO₂ 浓度和 CO₂ 释放的最主要因素。温度升高, 微生物活动加强, 加速了土壤中有机质的分解和 CO₂ 的产生, 同时土壤中生物的呼吸作用也会加强, 这些都促使了土壤 CO₂ 浓度的增大。不同深度、不同植被的土壤 CO₂ 浓度和空气温度的模拟模型见表 3。

为深入分析青海湖地区温度对土壤 CO₂ 浓度的影响, 我们用 Q₁₀ 值来分析该区土壤 CO₂ 浓度对温度变化的敏感情况。Q₁₀ 是指温度每升高 10℃, 土

壤 CO₂ 浓度的变化比率。有人对全球范围的 Q₁₀ 值进行了测算, 得到 Q₁₀=1.57。对不同的生物群落, Q₁₀ 值不尽相同, 但高纬度的 Q₁₀ 要比低纬度的高。随着纬度的增加, 土壤呼吸速率呈线性减少趋势。在温度较低的地区 Q₁₀ 值略大于 2, 在温度较高的地区 Q₁₀ 值变小。这一结果符合生物的生理特性。在较高温度地区土壤微生物的活性并不会因温度的升高而持续升高, 在温度超过微生物活动最适宜温度时, 微生物的活动反而减弱。在较低温度地区, 温度限制了土壤微生物的活动, 在温度升高时微生物活动增强, 对温度的升高反映敏感。我们利用实测数据计算得出青海湖地区哈尔盖乡低草地 50 cm 深度、25 cm 深度、裸地 60 cm 深度、30 cm 深度的 Q₁₀ 值分别为 3.98、2.29、2.18、2.78, 平均为 2.81, 明显高于全球平均水平。说明在青海湖地区高寒环境下, 土壤 CO₂ 浓度对土壤温度的变化更加敏感。温度的升高会导致更多的 CO₂ 向空气中释放。

4 结论

综上所述, 可以得到以下结论:

(1) 在高寒干旱的青海湖地区土壤 CO₂ 浓度从 8:00 到次日 8:00 具有由低到高再到低的变化规律, 这种变化主要是昼夜温度变化控制的。在夜间土壤最低温度为 0℃ 和更高的高寒区, 这种土壤 CO₂ 浓度昼夜变化规律具有普遍性。

(2) 由于青海湖地区高寒的自然条件, 该地区空气中 CO₂ 浓度和草地土壤 CO₂ 浓度均明显低于低海拔地区 CO₂ 浓度。

(3) 青海湖附近地区白天土壤 CO₂ 浓度略高于夜间, 但是相差不大, 比温暖的低海拔地区差异小, 这是该区高寒的气候条件决定的。

(4) 青海湖地区土壤 CO₂ 的变化与温度呈正相关关系。该地区 Q₁₀ 平均值为 2.83, 表明温度对

青海湖草原土壤 CO₂ 浓度的影响比低海拔草原 CO₂ 浓度影响更大。

(5) 青海湖附近地区土壤 CO₂ 浓度明显高于地面之上 1 m 高处空气 CO₂ 浓度, 表明在较温暖的季节, 该区土壤在向空气中释放 CO₂。在土壤最低温度为 0℃ 或高于 0℃ 的地区, 土壤 CO₂ 浓度就会高于地面空气 CO₂ 浓度, 土壤就会向大气排放 CO₂。

参考文献

- 陈四清, 崔晓勇. 1999. 内蒙古锡林河流域大针茅草原土壤呼吸和凋落物分解的 CO₂ 排放速率研究 [J]. *植物学报*, 41(6): 245-250.
- 崔晓勇, 陈佐忠, 陈四清. 2001. 草地土壤呼吸研究进展 [J]. *生态学报*, 21(2): 315-324.
- 樊恒文, 贾晓红. 2002. 干旱区土地退化与荒漠化对土壤碳循环的影响 [J]. *中国沙漠*, 22(6): 525-533.
- 高峰, 孙成权, 曲建升编译. 2001. 全球气候变化研究的新认识—IPCC 第三次气候评价报告第一工作组报告概要 [J]. *地球科学进展*, 16(3): 442-445.
- 蒋建军, 倪绍祥. 1999. 青海省刚察县草场退化及持续发展对策研究 [J]. *南京师大学报 (自然科学版)*, 22(3): 115-119.
- 李凌浩, 王其兵, 白永飞, 等. 2000. 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*, 24(6): 680-686.
- 李艳华, 赵景波. 2006. 西安南郊不同人工植被下土壤 CO₂ 浓度研究 [J]. *中国沙漠*, 26(6): 910-914.
- 李银鹏, 季劲钧. 2001. 全球陆地生态系统与大气之间碳交换的模拟研究 [J]. *地理学报*, 56(4): 379-389.
- 刘绍辉, 方精云. 1997. 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*, 17(5): 469-476.
- 杨昕, 王明星. 2001. 陆地碳循环研究中若干问题的评述 [J]. *地球科学进展*, 16(3): 427-435.
- 张春林, 赵景波, 杨晓东. 2008. 草地不同深度土壤 CO₂ 浓度变化特征研究 [J]. *陕西师范大学学报 (自然科学版)*, 36(6): 89-95.
- 周正朝, 上官周平. 2009. 黄土高原人工刺槐林土壤呼吸及其与土壤因子的关系 [J]. *生态环境学报*, 18(1): 280-285.
- Astrid R B S, Buchmann N. 2005. Spatial and temporal variations in soil respiration in relation to stand structure and soil parameters in an unmanaged beech forest [J]. *Tree Physiology*, 25: 1427-1436.
- Matamala R, William S H. 2000. Effects of elevated atmospheric CO₂ on fine root production and activity in an intact temperate forest ecosystem [J]. *Global Change Biology*, 6(8): 967-979.
- Prentice K C, Fung I Y. 1990. The sensitivity of terrestrial carbon storage to climate change [J]. *Nature*, 346: 48-50.
- Qi Y, Xu M. 2001. Separating the effects of moisture and temperature on soil CO₂ efflux in a coniferous forest in the Sierra Nevada mountains [J]. *Plant and Soil*, 237: 15-23.
- Schinder D W, Nadelhoffer. 1999. The mysterious missing sink [J]. *Nature*, 398:105-107.
- Vitousek P M, Mooney H A, Lubchenco J, et al. 1997. Human domination of Earth's ecosystems [J]. *Science*, 277: 494-499.
- Zheng L P, Li T Y, Wan G J, et al. 1999. The seasonal and daily CO₂ concentration variance in karst meadow soil profile with depth in Central Guizhou, China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 44(2): 93-94.