

Study on the Distribution of Soil Surface Carbon Dioxide Concentration

Xueting Wang

Zhejiang A&F University, Hangzhou, Zhejiang, 311300

Abstract

In recent years, due to global warming, the increase in soil respiration rate has led to an increase in the trend of soil surface CO₂ concentration. The trend of soil surface CO₂ concentration has an important impact on global climate change, so it is particularly important to accurately analyze the trend of soil surface CO₂ concentration. The diffusion process of soil CO₂ is consistent with the Fick's law diffusion model. In this paper, the research on the distribution trend of soil surface CO₂ concentration is derived by the distribution of global soil respiration rate. The derivation of Fick's law and Kriging interpolation algorithm can accurately analyze the change trend of soil surface CO₂ concentration. Through formula derivation, this paper mainly found that the trend of soil surface CO₂ concentration showed time and spatial distribution, and temperature and atmospheric CO₂ concentration had a great influence on the trend of soil surface CO₂ concentration.

Keywords

soil surface; carbon dioxide; concentration; change trend;

土壤表层二氧化碳浓度分布情况研究

王雪婷

浙江农林大学, 中国·浙江 杭州 311300

摘要

近年来, 由于全球气候变暖, 土壤呼吸速率加快导致土壤表层 CO₂ 浓度变化趋势加快。土壤表层 CO₂ 浓度变化趋势对全球气候变化有着重要影响, 因此准确分析土壤表层 CO₂ 浓度变化趋势显得尤为重要。土壤中 CO₂ 的扩散过程符合 Fick 定律扩散模型。本文通过对全球土壤呼吸速率的分布情况推导分析土壤表层 CO₂ 浓度变化趋势的研究, 通过 Fick 定律及克里金插值算法的推导可以较为准确的分析土壤表层 CO₂ 浓度的变化趋势。通过公式推导及数据分析, 主要发现土壤表层 CO₂ 浓度变化趋势呈现时间、空间分布, 同时温度、大气 CO₂ 浓度对土壤表层 CO₂ 浓度变化趋势有着较大的影响。

关键词

土壤表层; 二氧化碳; 浓度; 变化趋势

1 引言

土壤是陆地生态系统中最大的碳库约占总量的 67%, 其碳储量约为 1394 Pg C (1Pg=10¹⁵g) [1,2]。土壤表面凋落物中所存储的 CO₂ 占生态系统碳的一大部分 [3]。据估计, 1990 至 2050 年间由于每年 0.03℃ 的全球气温上升增强土壤呼吸, 从土壤排放至大气的 CO₂ 含量将额外增加 60Pg C [4]。生态系统向大气扩散碳的重要途径是土壤呼吸, 且其排放过程中 CO₂ 最先与土壤表层接触。由于植物和微生物的呼吸过程促使土壤表层产生释放 CO₂, 这一过程的复杂性, 导致难以准确分析土壤表层 CO₂ 变化趋势规律。土壤呼吸中产生的 CO₂ 大约一半来自微生物和动植物的代谢活动, 以支持植物根系和相

关菌落的生长 [5-7]。土壤表面 CO₂ 浓度测量有助于评估不同环境条件下, 土壤呼吸和土壤 CO₂ 生产能力的可能性, 以便更好地了解碳循环 [8]。

土壤呼吸过程中, CO₂ 气体首先排放至土壤表层, 再将 CO₂ 排放至大气中。土壤表层 CO₂ 浓度将直接对土壤呼吸速率产生影响。然而, 在实际研究过程中, 大部分研究者都通过分析土壤表层或者不同土壤深度的碳通量对土壤呼吸进行分析, 对于土壤表层 CO₂ 浓度变化趋势的相关研究较少 [15-16]。

土壤表层 CO₂ 浓度变化趋势受时间、土壤类型和大气 CO₂ 浓度等因素影响。土壤呼吸速率呈现时间变化, 季节性时间变化对于土壤呼吸速率影响较大 [18-19]。土壤表层 CO₂ 浓度变化趋势与土壤呼吸速率相关, 因此土壤表层 CO₂ 浓度变

化趋势与时间变化相关。土壤表层 CO₂ 浓度变化趋势在不同土壤类型中存在较大差异。不同土壤类型的生态群落不同, 导致土壤呼吸速率存在较大差异^[17]。土壤表层 CO₂ 浓度变化趋势受到土壤呼吸速率影响, 因此不同土壤类型对于土壤表层 CO₂ 浓度变化存在相应一定影响。土壤表层气体与大气产生气体交换, 大气中 CO₂ 的浓度不断上升将会导致土壤表层 CO₂ 浓度产生剧烈的变化。大气 CO₂ 浓度的日益上升^[11], 将会导致土壤表层 CO₂ 浓度日益上升。

土壤呼吸速率对于土壤温度^[9-10]、土壤肥力、土壤中动植物生长等因素有着明显的影响^[12-13]。土壤呼吸过程中所产生的部分 CO₂ 将会从土壤孔隙中排放至土壤表层^[14], 因此其细微变化将导致碳通量直接变化。同时, 土壤表层 CO₂ 浓度影响土壤植物生长、微生物呼吸、土壤环境, 因此对于其变化趋势的准确分析十分重要。

本文通过 Fick 定律进行土壤表层 CO₂ 浓度分析。通过本文, 研究者可以更好地了解全球范围内土壤表层 CO₂ 浓度趋势变化规律, 从而更好地评估土壤表层 CO₂ 变化趋势对于全球气候的影响。

2 方法及数据来源

2.1 土壤表层 CO₂ 浓度计算方法

Fick 于 1855 年提出了 Fick 定律, 即单位时间内, 通过垂直于扩散方向的单位截面积的扩散物质流量与该截面处扩散物质的浓度梯度成正比。土壤呼吸过程中 CO₂ 扩散规律符合 Fick 定律, 通过 Fick 定律可以准确描述土壤呼吸速率。Fick 第一定律如下:

$$J = -D \frac{dC}{dx} \quad (1)$$

式中, J 为物质的扩散通量 (μmol m⁻² s⁻¹), D 为扩散系数 (m² s⁻¹), C 为扩散物质 (即二氧化碳) 的体积浓度 (原子数 m⁻³ 或 kg m⁻³), dC/dx 为浓度梯度, “-”号表示扩散方向为浓度梯度的反方向, 即扩散由高浓度区向低浓度区扩散。

上式可以表达为:

$$J = -D \cdot \nabla C \quad (2)$$

式中, J 为碳通量 (μmol m⁻² s⁻¹), D 为扩散系数 (m² s⁻¹), ∇ 为梯度, C 为浓度差 (mol)。

其中, ∇C 的表达式为:

$$\nabla C = \frac{C_s - C_0}{x} \quad (3)$$

式中, C 为浓度差 (mol), C_s 为监测位置 s 的 CO₂ 浓度 (mg m⁻³), C₀ 为监测位置 0 的 CO₂ 浓度 (mg m⁻³), x 为两监测位置的高度差 (m)。本文中, 将式 (3) 中的 C_s 设为土壤表层 CO₂ 浓度 (mg m⁻³), C₀ 为大气 CO₂ 浓度 (mg m⁻³), x(m) 为监测位置土壤与土壤表层的高度差无限趋近于零。

根据 (2) 式和 (3) 式可以推导:

$$C_s = C_0 + \frac{J}{D} \cdot x \quad (4)$$

式中, C_s 为土壤表层 CO₂ 浓度 (mg m⁻³), J 为碳通量 (μmol m⁻² s⁻¹), C₀ 为大气 CO₂ 浓度 (mg m⁻³), x 为高度差 (m)。

假设, 同一区域, 两年之间的碳通量分别为 J₁ 和 J₂, 则可以根据式 (2) 化简整理得:

$$\frac{J_1}{J_2} = \frac{-D \cdot \nabla C_1}{-D \cdot \nabla C_2} = \frac{C_{s1} - C_{01}}{C_{s2} - C_{02}} \quad (5)$$

式中, C_{s1} 和 C_{s2} 分别为 J₁ 与 J₂ 时刻的土壤表层 CO₂ 浓度, C₀₁ 和 C₀₂ 分别为 J₁ 与 J₂ 时刻的大气 CO₂ 浓度。根据式 (5) 即可分析不同年份之间土壤表层 CO₂ 浓度的变化情况。

根据式 (4) (5), 可以推导出:

$$C_{s2} = (C_{s1} - C_{01}) \cdot \frac{J_1}{J_2} + C_{02} \quad (6)$$

式中, 两次监测碳通量分别为 J₁ 和 J₂ (μmol m⁻² s⁻¹), C_{s1} 和 C_{s2} (mg m⁻³) 分别为 J₁ 与 J₂ 时刻的土壤表层 CO₂ 浓度, C₀₁ 和 C₀₂ (mg m⁻³) 分别为 J₁ 与 J₂ 时刻的大气 CO₂ 浓度。

2.2 Kriging 方法

Kriging 插值是研究空间插值的工具, 通过半方差描述空间分布模式及空间相关性, 并且可以通过多种参数定量说明属性的空间变异程度及预测未知点的属性。

半变函数的计算公式为:

$$r(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_1^{n(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (7)$$

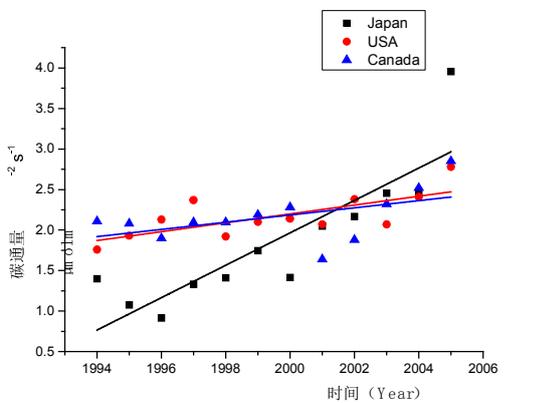
式中, r(h) 为变异函数, N(h) 为距离 h 点的数目, Z(x_i) 是对应第 i 个点的属性值。文中, 空间插值图像采用 Surfer 软件的 Kriging 最优内插值算法, 绘制土壤呼吸速率空间分布图。

2.3 数据来源及可靠性

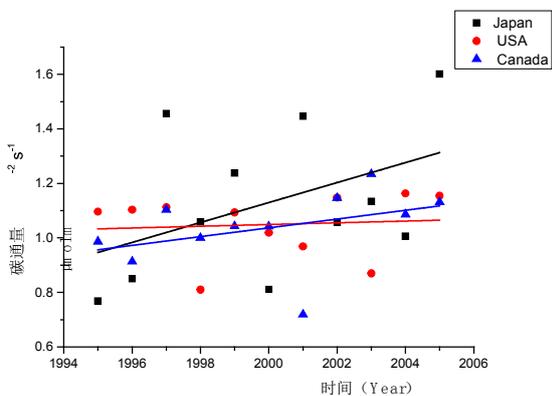
本文中分析全球土壤呼吸数据库 (Bond-Lamberty&Thomsom, 2014) [20] 中中国区域内的相关数据。该文章全球土壤呼吸数据库, 包含 6000 多条从历史相关论文中数字化的 R_s 记录。同时, 本文收集土壤呼吸相关论文中的环境变量及中国国家气象信息中心, 中国地面国际交换站气候资料日值数据集 (V3.0), 采用其中温度数据, 分析土壤表层 CO_2 浓度趋势变化情况。大气 CO_2 浓度数据, 采用浙江省杭州市临安区西北部天目山传感器相关监测数据进行分析。

3 结果与分析

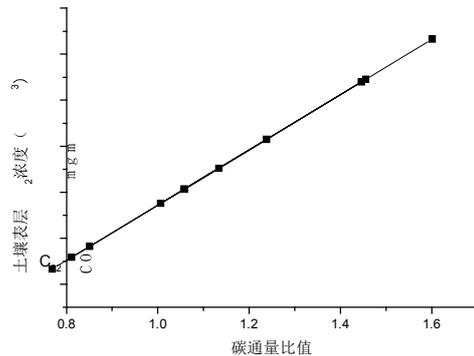
通过分析推导第二部分中, 设式 (6) C_{s2} 为 y , J_1/J_2 为 x , $C_{s1}-C_{o1}$ 为 k 值 (土壤表层 CO_2 浓度值远远大于大气 CO_2 浓度, k 值为正数), C_{o2} 为常数 a , 则式 (6) 可以用 $y=kx+b$ 表示。由图 1 (a) 可知, 全球部分区域森林土壤呼吸速率呈现加快趋势; 由图 1 (b) 可知, 土壤呼吸速率两年之间的比值变化情况即碳通量比值情况; 式 (6) 分析推导出图 1 (c) 土壤表层 CO_2 浓度变化趋势与土壤呼吸比值变化规律曲线图。



a: 全球部分森林 1994-2005 碳通量变化情况



b: 全球部分区域森林 1994-2005 年碳通量比值变化情况



c: Japan 森林地区土壤表层 CO_2 浓度与两年之间碳通量比值关系图, 则式 (6) 可用 $y=kx+b$ 表示, 式中 y (后一年土壤表层 CO_2 浓度) 与 x (土壤呼吸比值) 关系图

图 1 1995-2004 年全球部分区域土壤呼吸速率情况和土壤表层 CO_2 变化趋势

图 1 结合式 (6) 可知, 1995-2004 年全球部分森林区域土壤表层 CO_2 浓度变化趋势与土壤呼吸速率比值呈现正比例。即若土壤呼吸速率比值逐渐上升, 土壤表层 CO_2 浓度变化趋势加快; 反之, 若土壤呼吸速率比值逐渐下降, 土壤表层 CO_2 浓度变化趋势减慢。

3.1 土壤表层 CO_2 浓度变化趋势与时间变化相关

土壤呼吸速率随着季节性改变有着明显的改变, 呈现一定规律的季节性时间分布。其中, 夏季土壤呼吸速率最快, 冬季和春季较弱。图 2, 全球部分国家土壤呼吸速率在四季分布情况。

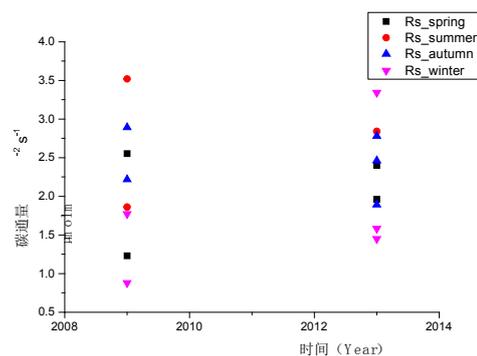


图 2 中国四季碳通量变化情况

由图 2 可知, 中国部分地区处于春季、夏季、秋季及冬季土壤呼吸速率的变化情况。从图中可以明显看出由于季节性时间变动, 土壤呼吸速率波动较大, 呈现季节性时间分布。根据葡萄牙四季碳通量数据, 结合式 (6) 进行分析, 得到图 3 葡萄牙四季碳通量比值与土壤表层 CO_2 浓度趋势变化。

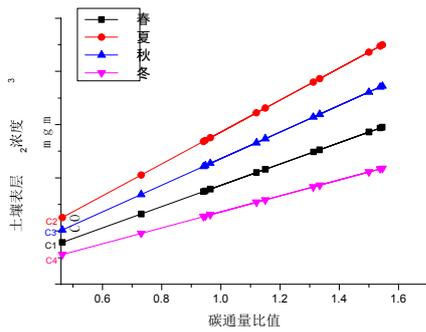


图3 葡萄牙四季通量比值与土壤表层 CO₂ 浓度趋势变化图

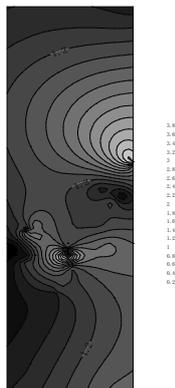
由图3可知,葡萄牙春季、夏季、秋季、冬季四季的碳通量比值与土壤表层 CO₂ 浓度变化趋势相关,且随着季节性时间的改变而产生变化。因此土壤表层 CO₂ 浓度变化趋势随着季节性时间呈现一定规律。

3.2 不同土壤类型土壤表层 CO₂ 浓度变化趋势存在差异

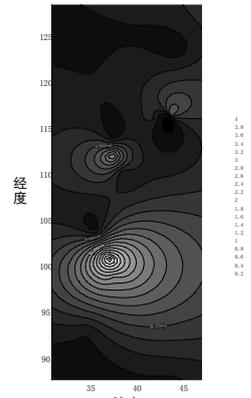
土壤呼吸速率在不同的土壤类型中,存在明显的差异。由于土壤表层 CO₂ 浓度变化趋势与碳通量比值相关,因此,在不同土壤类型中,土壤表层 CO₂ 浓度变化趋势的分布可能存在明显差异。下图4-6主要体现中国部分区域土壤呼吸速率分布情况,通过公式分析推导土壤表层 CO₂ 浓度变化趋势。



a: 森林碳通量空间分布情况



b: 农田碳通量空间分布情况



c: 草地碳通量空间分布情况

图4 中国部分区域碳通量空间插值图

由图4可知,中国不同经纬度位置下,三种土壤类型下的土壤呼吸速率有着明显的差异。由图(a)(b)(c)可知森林、农田、草地这三种不同类型的土壤环境下,土壤呼吸速率分布情况存在较大的差异。图5,显示的是美国、中国区域内三种不同土壤类型的土壤呼吸速率情况。

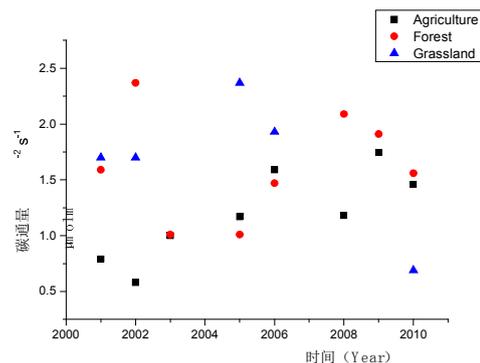


图5 中国区域三种不同土壤类型土壤呼吸速率

由图5两图可知,中国区域不同土壤类型(森林、草地及农田)条件下,土壤呼吸速率分布情况存在较大差异。结合式(6)分析中国三种不同土壤类型,土壤表层 CO₂ 浓度变化趋势与碳通量比值情况如下

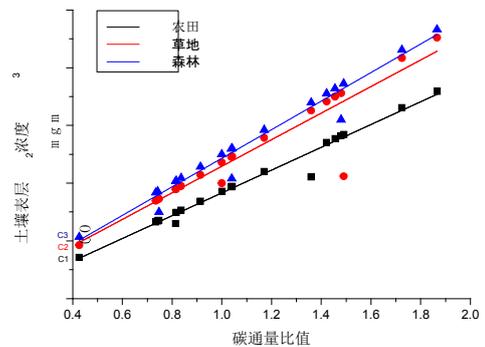


图6 中国区域内三种不同类型土壤环境碳通量比值与土壤表层 CO₂ 浓度变化

由图6可知,农田、草地及森林三种土壤类型的土壤表层CO₂浓度变化趋势与碳通量比值呈现比例关系。随着碳通量比值改变,土壤表层CO₂浓度随之改变。农田、草地、森林三种土壤类型的土壤表层CO₂浓度存在一定差异,其中森林土壤表层CO₂浓度最大。

3.3 大气CO₂浓度影响土壤表层CO₂浓度变化趋势

在过去200年中,由于全球气候变暖大气CO₂浓度不断上升,同时浓度上升趋势不断加快^[21]。大气直接与土壤表层接触,并与土壤进行气体交换,该过程中土壤表层CO₂直接与大气接触,因此,大气CO₂浓度会直接影响土壤表层CO₂浓度变化趋势情况。

天目山传感器实测数据显示,大气CO₂浓度及时在短时间内不同位置也存在较大差异变化。下图为天目山传感器监测3个不同位置的环境大气CO₂浓度短期变化情况。

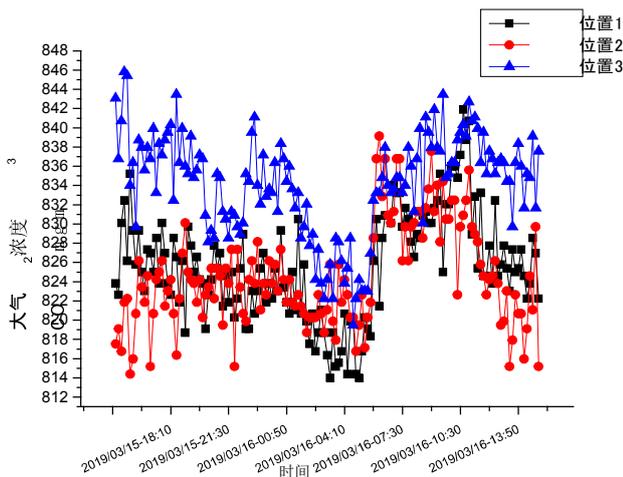


图7 天目山传感器监测环境大气CO₂浓度数据

由图7可知,天目山附近2019年3月15-16日,三个不同位置的环境大气CO₂浓度在一天之内的变化情况。同时,通过对本文第二部分中,根据Fick定律进行推导可得

$$J = D \cdot \frac{C_s - C_0}{x} \quad (8)$$

式中, C_s 为土壤表层CO₂浓度(mg m⁻³), J 为碳通量(μmol m⁻² s⁻¹), C₀ 为大气CO₂浓度(mg m⁻³), x 为高度差(m)。式(8)结合第二部分中式(4),可以得出C_s土壤表层CO₂浓度的变化受到C₀大气CO₂浓度变化的影响。

本文数据监测位置植被类型为常绿阔叶林,其土壤CO₂年均释放率为2.23 μmol m⁻² s⁻¹^[22]。设土壤呼吸速率分别为2、

2.5、3 μmol m⁻² s⁻¹,分别计算三个不同位置的土壤表层CO₂浓度与大气CO₂浓度变化情况,如下图8所示。

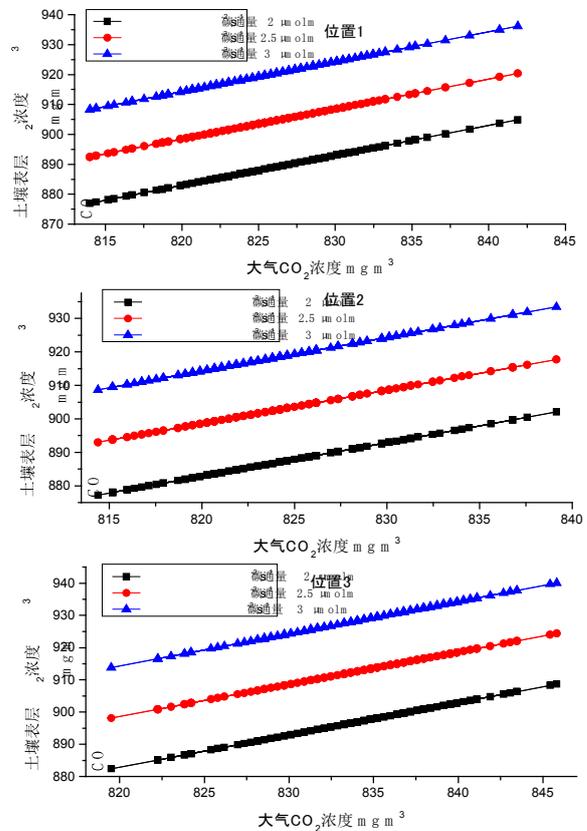


图8 三个位置大气CO₂浓度与土壤表层CO₂浓度关系

由图8可知,大气CO₂浓度直接影响土壤表层CO₂浓度变化趋势,且大气CO₂浓度上升土壤表层CO₂浓度也将随之上升,反之,大气CO₂浓度下降土壤表层CO₂浓度也将下降。由图7、8并结合式(8)发现土壤表层CO₂浓度变化趋势与大气CO₂浓度变化密切相关。

4 讨论

由于受到大气湍流和监测设备的影响,土壤表层CO₂浓度变化趋势的监测较为困难。目前,监测土壤表层CO₂浓度一般是通过二氧化碳传感器进行监测,由于传感器精度及监测位置的限制,监测数据往往不够准确。本文通过对Fick定律的推导,并应用克里金插值算法分析,较为准确地分析土壤表层CO₂浓度趋势变化情况。

本文通过分析发现土壤呼吸速率与土壤表层CO₂浓度呈现正比关系,即土壤呼吸速率上升土壤表层CO₂浓度也会随之上升。同时,土壤表层CO₂浓度变化趋势与时间、土壤类型温度、大气CO₂浓度密切相关。本文中主要分析土壤表层

CO₂ 浓度变化趋势情况,对于土壤表层 CO₂ 浓度的详细变化情况,未来还可以进行进一步的探索研究。

5 结语

本文以全球碳通量数据和温度数据为研究对象,推导 Fick 第一定律并结合克里金空间插值法对土壤表层 CO₂ 浓度的变化情况进行分析,得出以下结论:

(1) 土壤表层 CO₂ 浓度变化趋势呈现时间性分布,夏季土壤表层 CO₂ 浓度较大,春季和冬季相对较小。

(2) 农田、森林及草地三种土壤类型环境下,土壤表层 CO₂ 浓度变化趋势存在较大差异,其中森林土壤表层 CO₂ 浓度 > 草地土壤表层 CO₂ 浓度 > 农田土壤表层 CO₂ 浓度。

(3) 土壤表层 CO₂ 浓度变化趋势与大气 CO₂ 浓度密切相关。大气 CO₂ 浓度上升将会导致土壤表层 CO₂ 浓度上升,且由于土壤表层直接与大气产生气体交换,大气 CO₂ 浓度的变化对于土壤表层 CO₂ 浓度影响较大。

参考文献

- [1] Jenkinson D S, Adam s D E, Wild A. Model estimates of CO₂ emissions from soil in response to global warming[J]. *Nature*,1991,351:304–306.
- [2] Sandor M. Soil respiration: concept and measurement methods[J]. *Proenvironment Promediu*,2010,3(5):54–57.
- [3] Ryan M G, Law B E. Interpreting, measuring, and modeling soil respiration[J]. *Biogeochemistry*(Dordrecht),2005,73(1):3–27.
- [4] Xu M, Qi Y. Soil–surface CO₂ efflux and its spatial and temporal variations in a young ponderosa pine plantation in northern California[J]. *Global Change Biology*,2010,7(6):667–677.
- [5] Hanson P J, Edwards N T, Garten C T, et al. Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: A review of methods and observations[J]. *Biogeochemistry*(Dordrecht),2000,48(1):115–146.
- [6] HöGberg P, Nordgren A, Buchmann N, et al. Large–scale forest girdling shows that current photosynthesis drives soil respiration[J]. *Nature*(London),2001,411(6839):789–792.
- [7] Ryan M G, Law B E. Interpreting, measuring, and modeling soil respiration[J]. *Biogeochemistry*(Dordrecht),2005,73(1):3–27.
- [8] Quijano L, Jorge Álvaro–Fuentes, Iván Lizaga, et al. Land use and rainfall effect on soil CO₂ fluxes in a Mediterranean agroforestry system[C]. EGU. EGU General Assembly Conference Abstracts, 2017.
- [9] Taylor J L A. On the Temperature Dependence of Soil Respiration[J]. *Functional Ecology*,1994,8(3):315–323.
- [10] 李凌浩,唐芳,阎志丹, et al. 温带草原 11 个植物群落夏秋土壤呼吸对气温变化的响应 [J]. *植物生态学报*,2015,27(4).
- [11] Ofipcc W G I. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. [J]. *Contribution of Working*,2013,43(22):866–871.
- [12] Hursh A, Ballantyne A, Cooper L, et al. The sensitivity of soil respiration to soil temperature, moisture, and carbon supply at the global scale[J]. *Glob Chang Biol*,2017,23(5):2090–2103.
- [13] Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate[J]. *Tellus Series B–chemical&Physical Meteorology*,1992,44(2):81–99.
- [14] Jan F, Bujalsky Luděk. Flow of CO₂ from soil may not correspond with CO₂ concentration in soil[J]. *Scientific Reports*,2018,8(1):10099.
- [15] Tang J, Baldocchi D D, Qi Y, et al. Assessing soil CO₂ efflux using continuous measurements of CO₂ profiles in soils with small solid–state sensors[J]. *Agricultural&Forest Meteorology*,2003,118(3):207–220.
- [16] 王超,黄群斌,杨智杰, et al. 杉木人工林不同深度土壤 CO₂ 通量 [J]. *生态学报*,2011,31(19):5711–5719.
- [17] Adachi M, Yukiko Sakata Bekku, Wan Rashidah, et al. Differences in soil respiration between different tropical ecosystems[J]. *Applied Soil Ecology*,2006,34(2):258–265.
- [18] Suseela V, Dukes, Jeffrey S. The responses of soil and rhizosphere respiration to simulated climatic changes vary by season[J]. *Ecology*,2013,94(2):403.
- [19] Brooks P D, Mcknight D, Elder K. Carbon limitation of soil respiration under winter snowpacks: potential feedbacks between growing season and winter carbon fluxes[J]. *Global Change Biology*,2010,11(2):231–238.
- [20] Bond–Lamberty B, Thomson A. A global database of soil respiration data[J]. *Biogeosciences*,2010,7(6):1915–1926.
- [21] By E. Climate Change 2001: Synthesis Report[J]. *Climate Change Synthesis Report*,2001,27(5520):408.
- [22] 刘源月,江洪,邱忠平, et al. 亚热带典型森林生态系统土壤呼吸 [J]. *西南交通大学学报*,2009,44(4):590–594.