

西安黄绵土碳释放规律研究

张晓龙¹ 赵景波^{2, 3} 马润花⁴

(1 中国海洋大学环境科学与工程学院 山东青岛 266003; 2 陕西师范大学旅游与环境学院 西安 710062; 3 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; 4 山东烟台师范学院地理系 山东烟台 264025)

摘 要 采用碱溶液吸收法。1999 年 9 月~2001 年 8 月 2 年的观测资料显示, 西安黄绵土 CO₂ 释放与人在其他地区的研究不同, 表现为白昼释放量低于夜间。西安土壤 CO₂ 释放量的日变化从当日清晨至次日晨, 呈现由高变低再变高的变化规律。土壤 CO₂ 释放量的变化趋势大体与温度的变化一致, 但在时间上有一定的滞后性。随着季节的变化, 西安黄绵土 CO₂ 释放量有明显的增减, 夏季日释放量最多, 秋季次之, 冬季最少。不同植被条件下, 土壤 CO₂ 释放量有差异。一般说来, 裸地有较高的释放量, 林地和草地释放量较低。裸露地表土壤 CO₂ 的释放量变化较大, 地表覆盖良好, CO₂ 释放较为稳定。

关键词 黄绵土; 土壤 CO₂; 释放量; 变化规律; 西安

中图分类号 X142; S152.6

全球气候变暖是近代全球环境变化的重要显示之一。目前, 普遍认为大气中以 CO₂ 为主的温室气体的增加是导致全球气候变暖的主要原因。在温室气体中, CO₂ 对气温的贡献率超过 60%, 今后 30 年中, 它的贡献率会随着其他温室气体的增加而下降, 但也会在 55% 以上^[1]。CO₂ 的增加主要是由于人类活动造成的, 特别是燃烧化石燃料。大气中 CO₂ 的浓度已由工业革命前的 280×10^{-6} 上升到现今的 368×10^{-6} ^[2]。IPCC 温室气体排放方案特别报告表明, 由碳循环模式预测 2100 年大气中 CO₂ 浓度可达 $540 \times 10^{-6} \sim 970 \times 10^{-6}$, 全球平均温度预计在 1990 ~ 2100 年间升高 1.4 ~ 5.8^[3]。由此将导致全球环境产生一系列变化^[4~7]。

研究发现, 大气中 CO₂ 的增量远低于人类活动排放到大气中的 CO₂ 量。目前, 由化石燃料燃烧释放的 CO₂ 若全部汇集到大气中, 将使大气 CO₂ 以每年 0.8% 的比率递增。实际上, 年增加速率约为 0.4%^[8]。这便出现一个很大的“漏失汇”, 它的大小约为 C 1.3 Pg/a^[9]。它的存在对正确预测未来气候变化提出了严重的挑战, 解决这一问题成为全球变化研究中的一个关键环节。陆地土壤是“漏失汇”的一个重要候选者。

陆地土壤是地球表面最大的 C 库^[10, 11] (C 约

地土壤中的 CO₂ 主要以土壤呼吸的方式向大气中排放。全球陆地年土壤呼吸释放的 CO₂ 总量约为 75 PgC^[12], 如此巨大的通量, 即使其有轻微的变化, 也会引起大气中 CO₂ 浓度的明显变化。因而, 土壤呼吸作为陆地土壤 C 库的主要输出途径和 CO₂ 的重要源汇, 对于它的精确、系统测定已成为目前全球变化研究中的关键问题之一^[13]。但由于陆地生态系统在全球范围内具有显著的时空差异性, 导致土壤呼吸也具有明显的时空差异。加之土壤呼吸作为一种生命活动过程, 本身具有复杂性, 又受多种因素的影响, 使得土壤呼吸的实际情形千差万别。所以, 对陆地土壤的 CO₂ 释放状况需要进行长期的定点观测研究。

本文是对西安地区不同条件下黄绵土 CO₂ 释放量及其变化规律进行研究的结果。

1 研究区概况

西安位于我国腹地陕西省关中平原的中部, 居于渭河南岸。西安的气候属暖温带大陆性季风气候, 季节变化明显, 总体上属温暖半湿润。西安地表组成物质主要是黄土, 土壤温度也具有空气温度的特点。温度在春季增加迅速, 秋季降温甚快, 夏季强烈吸热, 冬季大量散热, 地表温度变化快且幅度大。

西安地貌以渭河阶地组成的冲积平原和黄土台塬为主要特征。在黄土台塬的边坡和沟坡区以及渭河二级阶地上有大面积的黄土性黄绵土分布^[14]。黄绵土是在晚更新世黄土上发育的一种幼年土壤。它的特点是土层深厚,质地均一,颜色棕黄,疏松松绵,渗水透气,无明显的剖面 and 层次发育,钙质含量较多,有机质含量少。西安地区的天然植被主要分布于西安南部边缘的秦岭山区,而在平原和浅山地带甚至更高的范围,已基本没有天然植被,主要是栽培作物、人工植被及次生植被^[15]。

2 观测方法与数据处理

2.1 观测方法及步骤

采用静态碱液吸收法。在测定土壤释放的 CO_2 时,把一定浓度的碱液置于土壤表面上的烧杯中,然后用一只圆桶将地面罩住。当 CO_2 从土壤表面释放时,它便被围集在圆桶内并被碱液吸收。在经过一定的吸收时间后,把盛有碱液的烧杯移出,用滴定法测定未反应的部分碱液,通过差减法,算出与碱结合的 CO_2 量。

具体步骤如下: 根据不同季节 CO_2 释放量的大小确定碱溶液用量与浓度。夏季温度高,土壤 CO_2 释放量大,碱溶液浓度高,用量多。春秋季节,温度低,土壤 CO_2 释放量少,碱溶液浓度低,用量少。温度更低时,相应降低 NaOH 溶液浓度,减少碱液使用量。选择地表平坦,土质均一,无粗大石块、砖块等不同植物覆盖的代表性土层作为观测点。根据不同季节土壤 CO_2 释放量大小确定碱液吸收时间,放置 2~3 只口径约 32cm,高约 30cm 的不透光圆桶作为收集桶。温度越低,释放量越小,吸收时间应越长。按确定好的量和浓度,用吸管吸取 NaOH 溶液置于烧杯中,将它放置在收集桶内,用于吸收土壤释放的 CO_2 。将收集桶边缘埋入土中约 2cm,周围用细土埋严、压实,防止外界空气进入。为防止太阳直射,桶上加盖薄木板或纸张等物。同时需在选定的观测点安置对照样,收集空气中的 CO_2 。每只收集桶每隔 2~3 h 取换一次吸收液。将吸收有 CO_2 的烧杯密封后带回实验室,加入过量 BaCl_2 ,使溶液中产生不溶性的碳酸盐沉淀(BaCO_3),并加入酚酞指示剂,溶液变为粉红色。用一定浓度的 HCl 滴定未反应的 NaOH ,至粉红色变为无色。记下所消耗的盐酸体积。在滴定时,盐酸要慢慢加入,以避免与 BaCO_3 沉淀接触而可能使

其溶解。

这种方法是用于研究由原位土壤释放 CO_2 速率的较早应用的方法之一,也是目前仍然较广泛使用的方法之一,它所需仪器也是各种方法中最简单的。此种方法适用于各种土壤,能够同时进行多重复测定,对于空间变异性很大的土壤呼吸而言是很大的优点。因此该方法仍然普遍使用。

2.2 观测数据的处理

用化学方程式 $\text{CO}_2 + 2\text{NaOH} = \text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{H}_2\text{O}$; $\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{BaCl}_2 = 2\text{NaCl} + \text{BaCO}_3$; $\text{NaOH} + \text{HCl} = \text{NaCl} + \text{H}_2\text{O}$ 算出消耗 HCl 所用的 NaOH 量,用差减法得到有多少 NaOH 与 CO_2 发生了反应,进而算出碱液吸收的 CO_2 的量。再减去收集桶中空气中的 CO_2 ,便得出观测时段内土壤中 CO_2 的释放量。用下列公式计算单位面积单位时间内土壤的 CO_2 释放量。

$$M_{\text{CO}_2}(\text{mg}) = 1/2(V_1 - V_2) \cdot N \cdot E / A / T$$

式中: V_1 为滴定收集空气中 CO_2 的 NaOH 溶液所消耗的盐酸体积 (ml), V_2 为滴定直接放置在地面上收集土壤中 CO_2 的 NaOH 溶液所消耗的盐酸体积 (ml), N 为盐酸的浓度 (mol/L), E 为 CO_2 的摩尔质量,取值为 44, A 为收集桶口的面积, T 为观测时间。据此建立数据库。

一般一次实验经一个昼夜每隔 1h 连续观测,得到 24 个观测值。

利用数据库数据绘制土壤 CO_2 释放量变化曲线图。

3 实验结果

观测点选在西安南郊长延堡附近。这里处于渭河二级阶地,地表土层以马兰黄土为主,发育着弱成壤性的黄绵土,土质疏松且较为均一。土层本身对 CO_2 释放量的差异影响较小,是观测土壤 CO_2 释放的理想场所。1999 年 9 月至 2001 年 8 月,对裸地、草地以及疏林地土壤 CO_2 的释放进行了多次 24h 的昼夜观测,部分成果已发表^[16,17]。

3.1 土壤 CO_2 释放量的昼夜变化

3.1.1 裸地观测结果 2 年里,我们对该区裸地进行了 20 多次连续 24h 的昼夜观测。现将观测结果介绍如下(图 1 和图 2)。图中显示,裸地 CO_2 释放量具有明显的昼夜变化。一般,从当日清晨至次日晨,释放量由高到低再变高。午时前后出现一个低

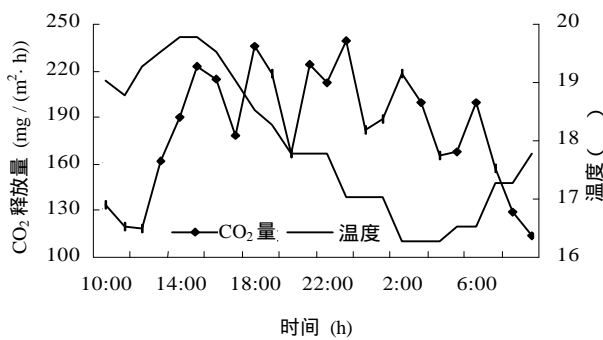
图1 2000年9月9~10日裸地土壤CO₂释放量变化

Fig. 1 Change in CO₂ emission from soil in bare land on September 9 ~ 10, 2000

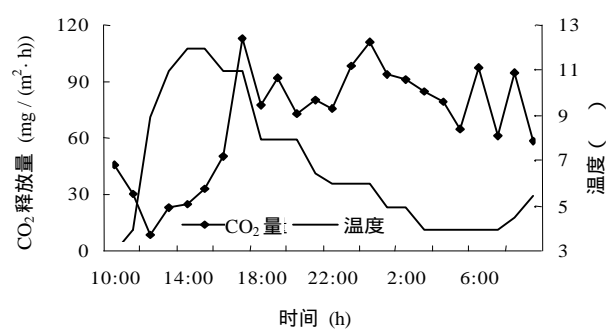
图2 2000年11月25~26日裸地土壤CO₂释放量变化

Fig. 2 Change in CO₂ emission from soil in bare land on November 25 ~ 26, 2000

值,之后释放量迅速增加,至晚 19:00~21:00,土壤 CO₂ 释放量达到最高值,波动维持高值至清晨,之后释放量会有明显减少。可以看出,升高与降低的过程都比较迅速,高值与低值维持期间也是波动变化的。实验结果显示,裸地土壤 CO₂ 释放量变化的情况较为复杂,表现出明显的不规则性,在一昼夜内的波动变化较大。

从图 1 和图 2 中可以看到,通常情况下,裸地 CO₂ 释放量的变化表现为夜间高于白昼。夜间 19:00~次日 6:00 的 12h 内,释放量一般占日释放总量 50%~70%,个别在 50%以下(表 1)。

表面看来,土壤 CO₂ 的释放量与气温有反相关的关系,但释放量的高值和低值并不与气温的低值和高值完全对应。如后文所述,这是土壤 CO₂ 释放

表 1 西安南郊裸地土壤 CO₂ 释放量 (mg/m²)Table 1 CO₂ emission from soil of barren land in the south suburbs of Xi'an

观测 时间	日释放 总量	白昼(7:00 ~ 18:00)		夜间(19:00 ~ 6:00)		每小时平 均释放量	每小时最 高释放量	每小时最 低释放量
		释放量	比例 (%)	释放量	比例 (%)			
1999 年								
9-18	4950.7	2080.2	42.0	2870.5	58.0	206.3	355.1	122.8
10-16	2088.9	682.5	32.7	1406.4	67.3	170.2	180.8	21.3
11-13	1039.0	411.8	39.6	627.3	60.4	43.3	96.7	2.9
11-20	948.2	401.9	42.4	546.2	57.6	39.5	67.2	5.8
11-27	490.8	264.5	53.9	226.3	46.1	20.5	37.6	1.0
2000 年								
3-18	1275.3	765.5	60.0	509.8	40.0	53.1	104.7	20.5
4-15	2150.5	1062.9	49.4	1087.6	50.6	89.6	172.4	9.2
9-9	4322.7	1932.9	44.7	2389.8	55.3	180.1	235.7	110.3
9-16	4663.1	1979.8	42.5	2683.2	57.5	194.3	261.2	36.5
10-22	2659.7	1107.9	41.7	1551.8	58.3	110.8	182.5	21.7
11-4	2574.1	882.6	34.3	1691.5	65.7	107.3	152.1	23.5
11-18	1852.6	950.6	51.3	902.0	48.7	77.2	110.7	28.9
11-25	1615.6	636.6	39.4	979.0	60.6	67.3	115.4	10.0
12-2	1445.6	702.5	48.6	743.1	51.4	60.2	114.8	9.7
2001 年								
2-24	804.5	471.9	58.7	332.5	41.3	33.5	75.5	3.9
3-10	1217.4	383.9	31.5	833.4	68.5	50.7	104.3	5.8
5-12	3246.8	1508.2	46.6	1738.6	53.4	135.3	243.0	43.7
6-9	5221.3	2514.9	48.2	2706.3	51.8	217.6	319.5	148.7

量的变化滞后于气温的变化造成的。在一个昼夜的变化中,温度对土壤 CO_2 释放量的变化具有重要的影响。 CO_2 释放量与温度都显示出明显的变化,但释放量的变化比温度变化有一定时间的滞后。在这种昼夜变化中,土壤 CO_2 释放量的变化具有明显的波动性,波动频率明显高于气温的变化。

此外,冬季温度很低时,土壤也有 CO_2 释放,但由于土壤结冻,实验无法反映土壤 CO_2 的释放量变化。因此,前人在进行此类实验时,通常只对生长季节的土壤 CO_2 释放量进行监测。我们通过 1 月份的实验可以知道,在表土未结冻时,虽然夜间的温度明显低于白昼,但 CO_2 释放量还是夜间高于白昼。

3.1.2 草地观测结果 草地土壤 CO_2 释放量的昼夜变化与裸地相似(图3和图4),但变化表现得规则,波动较裸地小。在一个昼夜中,土壤 CO_2 的释放量依然呈现由高到低又变高的波动变化。约在午时 11:00 ~ 13:00 释放量达到低谷,午后迅速增

加,至夜间 21:00 ~ 23:00 达到高值,维持约 6h 左右,凌晨 6:00 左右开始明显减少。可以看出,升高与降低的过程也比较迅速,但高值与低值维持期间波动较裸地小。

由图3和图4中还可以明显看出,夜间土壤 CO_2 的释放量明显高于白昼。观测资料显示,白昼 7:00 ~ 18:00 之间 CO_2 释放量占昼夜释放总量的 18.0 % ~ 48.7 %,大多为 40 % 左右。夜间 19:00 ~ 次日 6:00, CO_2 释放量一般占 60 % 左右,最高可达 81.9 %,最低为 51.3%。在一昼夜中,土壤 CO_2 最高释放量可高达 $500 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 以上,最低释放量会低于 $1 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。最高释放量比最低释放量至少大 3 倍,甚至高达 10 倍、100 余倍。

3.1.3 林地观测结果 由观测结果(图5和图6)得知,林地土壤 CO_2 的释放量与草地、裸地比较,基本规律是一致的,但林地 CO_2 释放量的变化滞后于气温的时间较长一些,波动变化与裸地类似。一般在 9:00 ~ 15:00 释放量较低,20:00 至次日 6:00 释

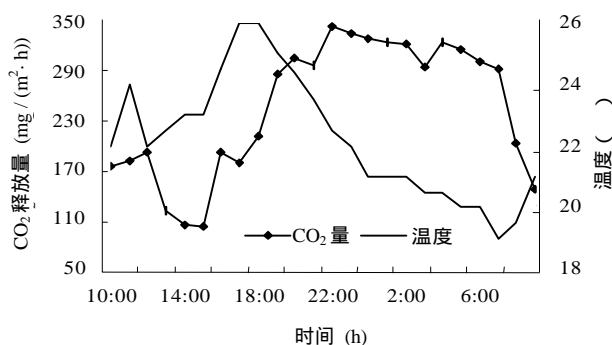


图3 2000年8月8~9日草地土壤 CO_2 释放量变化

Fig. 3 Change in CO_2 emission from soil in grassland on August 8~9, 2000

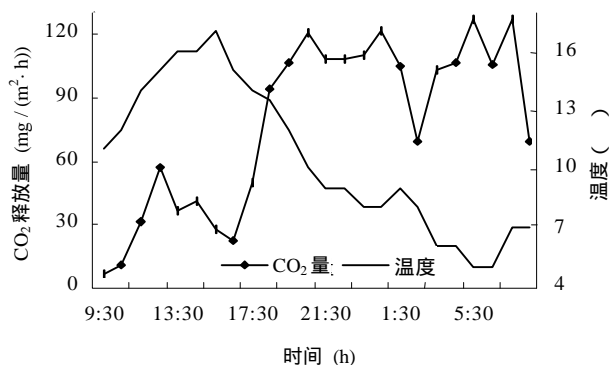


图5 2001年3月17~18日林地土壤 CO_2 释放量变化

Fig. 5 Change in CO_2 emission from soil in forestland on March 17~18, 2001

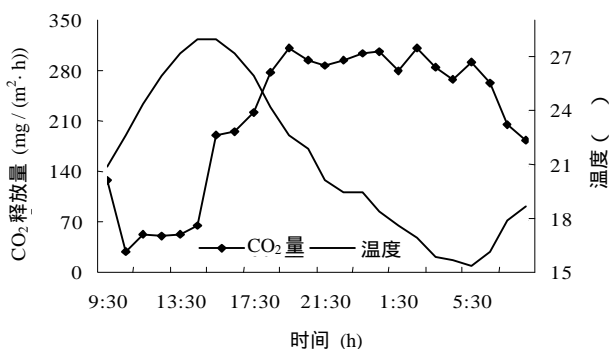


图4 2000年9月16~17日草地土壤 CO_2 释放量变化

Fig. 4 Change in CO_2 emission from soil in grassland on September 16~17, 2000

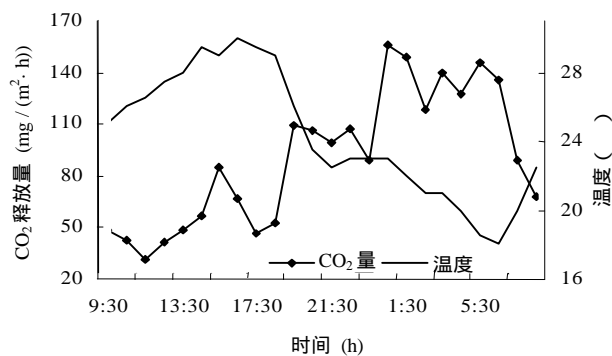


图6 2001年6月2~3日林地土壤 CO_2 释放量变化

Fig. 6 Change in CO_2 emission from soil in forestland on June 2~3, 2001

放量较高。午后释放量迅速升高后达到高值,维持高值阶段内的释放量仍有较大波动,往往会形成一部分高值中的低值区。这种情形在草地、裸地的释放量昼夜变化中也是存在的。

从昼夜土壤 CO_2 释放量的分布情况来看,林地也表现为夜间高于白昼。夜间土壤 CO_2 释放量一般占日释放量总量的 50% ~ 70%,最高可达 81.0%。

选择的实验地是阔叶疏林地,间有丛生小灌木。观测点布设在林间较为平坦的空地上,地面相对比较裸露,基本无枯枝落叶,与裸地状况类似。因而从土壤 CO_2 释放量的波动变化来看,与裸地接近。不同的是林地的郁闭度高,热量变化比较缓和,同时树木根系及土壤生物群落的状况有别于裸地。此外,林间通风条件比之裸地差,所以林地也表现出自己的释放特征。

3.2 土壤 CO_2 释放量的季节变化

通过 2000 ~ 2001 年的实验观测得知,土壤 CO_2 释放量随着季节的变化而发生明显的变化。夏季是土壤 CO_2 释放量最高的季节,特别是 7 月份,最低释放量在冬春季。以裸地为例(图 7),土壤 CO_2 释放量变化几乎与气温变化同步,但不完全一致。在春季气温迅速回升的时期,土壤 CO_2 释放量并不是同时迅速增加,变化要缓慢一些。这主要是因为土壤 CO_2 释放量相对于气温有一定的滞后。

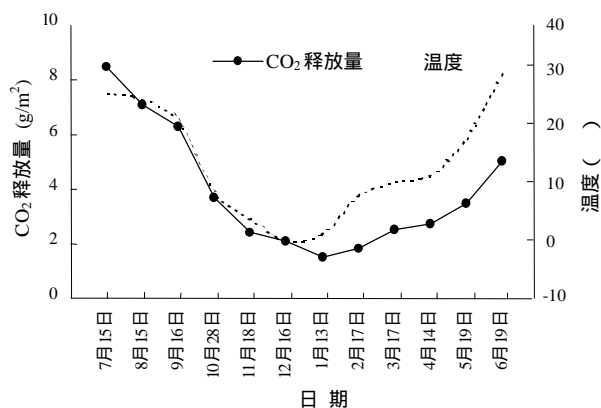


图 7 2000~2001 年裸地土壤 CO_2 释放量变化

Fig. 7 Change in CO_2 emission from soil in bare land in the period from 2000 to 2001

实验结果表明,不同季节裸地土壤 CO_2 释放量相对于气温滞后的时间有一些变化。在温度较低时,日变化中释放量滞后于温度的时间较短。随着温度逐渐升高,滞后的时间变长。春季时,释放量高值比温度的高值滞后约 3 h,在温度较高的夏秋季节,

滞后约 5 ~ 6h。日释放最大量在 7 月份,可达 8359.60 $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。最低值在冬季,日释放量不足 500 mg/m^2 。

在温度较高的夏秋季节,裸地土壤 CO_2 每小时最大释放量比最低释放量一般大 2 ~ 10 倍。在温度较低的冬春季节,最大释放量比最低释放量一般大 10 倍以上,甚至达 100 倍以上。也就是说,温度越低,土壤 CO_2 释放量的变化波动就越大,而在温度对生物的生命活动比较适宜的季节,土壤 CO_2 释放量的波动变化相对较小,释放比较稳定。在春季日释放总量与温度的关系有较明显的滞后,在其他季节基本同步。

草地与林地土壤 CO_2 释放量的季节变化规律与裸地类似,但高值滞后于气温的时间较裸地更长一些,波动变化较裸地小。

总体而言,土壤 CO_2 释放量的季节变化随温度变化,日释放总量与每小时最高释放量基本随温度的升降而有规律的升降。

4 讨论

由观测结果可知,土壤 CO_2 在一个昼夜中的变化是随着温度变化而变化的,但与温度变化并不同步。释放量的高值和低值基本对应于温度的低值与高值。温度虽不是影响土壤 CO_2 释放量变化的惟一因素,但无疑是其中最重要的因素。土壤 CO_2 释放量的变化主要是土壤中的生物活动造成的,温度是影响生物活动最重要的因素。土壤 CO_2 释放相对于温度变化有一个过程,使得释放量变化在时间上相对于温度变化有一定的滞后。不同季节温度影响土壤层的深度有一定差异,土壤 CO_2 释放量滞后于温度的时间也就有所不同。由于土壤生物的生命活动随着温度等外界环境因素的变化而有一定的规律变化,因而土壤 CO_2 释放量在一个昼夜中也相应的发生着变化。

随着季节改变,土壤 CO_2 释放量也有明显变化。释放量与温度的关系表现得更为突出。通过指数拟合,可得到土壤 CO_2 释放量 (M) 与气温 (t) 之间的关系式(表 2),相关系数 R^2 均在 0.74 以上。可见,

表 2 土壤 CO_2 释放量与气温之间的关系

Table 2 Soil CO_2 emission in relation to air temperature

类 型	关系式	R^2
裸 地	$M = 1.6021e^{0.0497t}$	0.7967
草 地	$M = 1.5935e^{0.0494t}$	0.7409
林 地	$M = 1.4414e^{0.0516t}$	0.7742

土壤 CO_2 释放量与温度的相关性是非常显著的。因此,随着全球变暖,土壤释放的 CO_2 量会随之增加,全球 C 循环也会变得更加复杂。

土壤呼吸过程复杂,释放量的变化表现出不规则性。实验中释放量出现单峰型的情形很少,多数情况下,日变化进程表现为多小峰型。一般说来,在 11:00 ~ 14:00 出现一天中的最低释放量,之后,释放量会比较迅速的上升,至晚 19:00 ~ 23:00 出现全天的最高释放量,在凌晨 5:00 ~ 7:00 释放量明显下降之前,释放量有明显的波动,其间还可能形成较为明显的低值区。在整个变化过程中,多呈现出较为突然的波动,而少逐渐的变化。这显然与温度逐渐变化的特征不同,显示了生命活动的复杂性,说明土壤 CO_2 释放量的变化不单只受温度的影响,是多种因素作用的复杂生命过程。

在释放量的时段分布上,一般情况下白昼明显低于夜晚,这主要是释放量滞后于温度造成的。在观测时期内,白昼释放量占日释放总量的比例平均为裸地 44.09%、草地 34.24%、林地 39.34%。9:00 ~ 15:00 是一天中释放量最低的时段,20:00 ~ 次日 4:00 为一天中释放量最高的时段,两者之间为过渡时段。由于地表覆被及土壤生物群落的差异,不同的生态系统土壤 CO_2 的释放量是有差异的。在温度适宜的情况下,裸地土壤 CO_2 释放量较多,但表现的波动性较大。

观测结果显示,不同植被条件下土壤 CO_2 释放量的变化有所不同。植被不仅影响土壤有机质含量、pH 值、温度、湿度等因素,对下垫面的辐射平衡也有一定的影响。植被覆盖度较低的下垫面,生长季节里土壤温度高,土壤表层温度的日振幅和季节变化也大。而植被覆盖度高的地面,植物生长季土壤温度较低,土壤表层温度的日振幅和季节变化较小。实验中发现,裸地 CO_2 释放的日变化较草地和林地的波动要大。在外界环境因素影响下,裸地 CO_2 释放量的反应较为迅速,日振幅较大,滞后于温度的时间较短。因为裸地没有植被覆盖,当地面受热后,土壤 CO_2 有迅速的释放。随着气温不断升高,土壤 CO_2 释放量便迅速增加。在夏季高温时,裸地 CO_2 释放量有时会较低,这与强光直接作用于地面,高温对生物活动的抑制有关。

多数情况下,裸地的 CO_2 释放量较多。这告诉我们,保护植被,进行生态建设,对减缓 CO_2 的排放,减缓大气 CO_2 含量的增加,对全球环境的变化

是有重要意义的。

实验中对不同的生态系统分别进行了观测,各种环境条件下的结果虽有一定的差异,但基本规律是一致的。已发表的其他地区的结果大多与此不同。如李凌浩等人对温带草原土壤呼吸的研究^[18],刘绍辉等人对温带森林进行的观测^[19],张金霞等人对高寒土壤 CO_2 释放量变化的研究^[20,21],得到的结果均为土壤 CO_2 释放量的变化直接随着温度而变化,白天的释放量明显高于夜间。通过我们两年的实验研究表明,白天的释放量明显低于夜间。至少在西安地区,完全能够确定这种新规律是存在的。

测定土壤 CO_2 释放量的碱液吸收法,使用已有近一个世纪。这种方法简便易行,但由于其自身的缺陷,方法本身会带来测量结果上的误差。首先,使用收集桶会在局部改变近地面的微气象条件。其次,作为一种手工操作方法,实验过程中必然会存在一定的误差,有些误差是难以估算的。在数据处理时,也会有误差产生。但仔细谨慎地应用这一方法也可以较为准确地得到土壤 CO_2 释放量的相对速率。

5 结 论

通过 1999 ~ 2001 年的实验研究,可得出以下结论。

(1) 西安黄绵土 CO_2 释放量具有明显昼夜变化:从当日清晨至次日晨,释放量呈现由高到低再到高的变化规律。土壤 CO_2 释放量的变化趋势大体与温度的变化一致,但在时间上有一定的滞后。

(2) 土壤 CO_2 释放量的时段分布上,白昼明显低于夜间。不同的生态系统昼、夜分别占日释放总量的比例有一定差异,在观测时期内白昼所占比例由高到低的顺序一般为:裸地>林地>草地,比例分别约为 44.1%、39.3%、34.2%。

(3) 观测时期内西安地区黄绵土 CO_2 释放量的平均值裸地为 20.5 ~ 348.3 $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,草地为 40.0 ~ 337.6 $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,林地为 41.4 ~ 343.3 $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。

(4) 随着季节的变化,西安土壤 CO_2 释放量有明显的增减,夏季日释放量最多,秋季次之,冬季最少。从具体月份看,一般 7 月份日释放量最高,可达到 8 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 以上,8 月次之,冬季 3 个月释放量最少,最少时不足 0.5 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。

(5) 温度是影响西安土壤 CO_2 释放量最重要的因素。从季节变化看,温度对土壤 CO_2 释放的作用更加明显。通过统计分析,释放量的变化与温度呈

显著的正相关关系。随着全球变暖,土壤 CO₂ 释放量将会增加。

(6) 不同植被条件下,土壤 CO₂ 释放量存在明显差异。一般说来,裸地释放量较高,林地和草地释放量较低。因此,保护植被,加强生态建设是减缓大气 CO₂ 增加的有效措施。

参考文献

- 1 欧阳自远. 我们只有一个地球. 见: 共同走向科学—百名院士科技系列报告集(下), 北京: 新华出版社, 1997
- 2 李银鹏, 季劲钧. 全球陆地生态系统与大气之间碳交换的模拟研究. 地理学报, 2001, 56 (4): 379 ~ 389
- 3 高峰, 孙成权, 曲建升编译. 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. 地球科学进展, 2001, 16 (3): 442 ~ 445
- 4 Jones TH, Thompson JH, Lawton TM, Bardgett RD, Blackburn TM. Impacts of rising atmospheric carbon dioxide on model terrestrial ecosystem. Science, 1998, 280: 441 ~ 443
- 5 曹志洪. 施肥与大气环境质量—论施肥对环境的影响. 土壤, 2003, 35 (4): 265 ~ 270
- 6 Xu Qiufang, Xu Jianming. Changes in soil carbon pool induced by substitution of plantation for native forest. Pedosphere, 2003, 13 (3): 271 ~ 278
- 7 Li Fusheng, Kang Shaozhong. Effects of atmospheric CO₂ enrichment, applied nitrogen and soil moisture on dry matter accumulation and nitrogen uptake in spring wheat. Pedosphere, 2002, 12 (3): 207 ~ 218
- 8 David W Schinder. The mysterious missing sink, Nature, 1999, 398, 105 ~ 107
- 9 杨昕, 王明星. 陆地碳循环研究中若干问题的评述. 地球科学进展, 2001, 16 (3): 427 ~ 435
- 10 Jenkinson DS, Adams DE, Wild A. Model estimates of CO₂ emissions from soil in response to global warming. Nature, 1991, 351: 304 ~ 306
- 11 Post WM, Emanuel WR, Zinke PJ, Stangenberger AG. Soil carbon pool and world life zone. Nature, 1982, 298: 156 ~ 158
- 12 韩兴国, 李凌浩, 黄建辉编著. 生物地球化学概论. 北京: 高等教育出版社, 施普林格出版社, 1999
- 13 Marie-Madeleine Coûteaux, Thomas Bolger, Interactions between atmospheric CO₂ enrichment and soil fauna, Plant and Soil, 2000, 224, 123 ~ 134
- 14 西安市计划委员会编. 西安国土资源. 西安: 陕西人民出版社, 1987
- 15 陕西师范大学地理系编. 西安市地理志. 西安: 陕西人民出版社, 1988
- 16 张晓龙, 赵景波. 西安吴家坟秋季土壤的碳释放规律研究. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2002, 30 (1): 115 ~ 120
- 17 赵景波, 张晓龙, 岳应利, 黄春长, 王丽霞, 孙贵贞. 西安南郊春季土壤碳释放研究. 干旱区地理, 2002, 25 (3): 208 ~ 213
- 18 李凌浩, 陈佐忠. 草地群落的土壤呼吸. 生态学杂志, 1998, 17 (4): 45 ~ 51
- 19 刘绍辉, 方精云, 清田信. 北京山地温带森林的土壤呼吸. 植物生态学报, 1998, 22 (2): 119 ~ 126
- 20 张金霞, 曹广民, 周党卫, 赵新全, 周兴民. 退化草地暗沃寒冻雏形土 CO₂ 释放的日变化和季节动态. 土壤学报, 2001, 38 (1): 32 ~ 40
- 21 曹广民, 张金霞, 赵新全, 李英年, 周兴民. 草毡寒冻雏形土土壤 CO₂ 释放量估测方法初探. 土壤学报, 2002, 39 (2): 261 ~ 267

CHANGE IN CO₂ EMISSION FROM LOESS SOIL IN XI' AN AREA

ZHANG Xiao-long¹ ZHAO Jing-bo^{2,3} MA Run-hua⁴

(1 College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266003; 2 Geographical Department of Shaanxi Normal University, Xi' an 710062; 3 State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, CAS, Xi' an 710075; 4 Geographical Department of Yantai Normal College of Shandong, Yantai, Shandong 264025)

Abstract The alkali solution absorption method was used in this study. The observation, which lasted 2 years from September 1999 to August 2001, found CO₂ emission different from what other scholars observed in other areas,

(下转第 411 页)

- Fe and Al as aids in differentiating various classes of soil. *Soil Science*, 1966, 46: 13 ~ 22
- 13 Koptsik G, Mukhina I. Effects of acid deposition on acidity and exchangeable cations in Podzols of the Kola Peninsula. *Water, Air and Soil Pollution*, 1995, 85: 1209 ~ 1214
- 14 Matzner E, Prezel J. Acid deposition in the German Solling area: effects on soil solution chemistry and Al mobilization. *Water, Air and Soil Pollution*, 1992, 61: 221 ~ 234
- 15 Berggren D, Mulder J. The role of organic matter in controlling Aluminium solubility in acidic mineral soil horizons. *Geochem. Acta*, 1995, 59: 4167 ~ 4180
- 16 Merino A, Alvarez E, Garcia-Rodeja E. Response of some soils of Galicia (NW Spain) to H₂SO₄ acidification. *Water, Air and Soil Pollution*, 1994, 74, 89 ~ 101
- 17 Liao B, Larssen T, Seip HM. Response of five Chinese forest soils to acidic input: batch experiment. *Geoderma*, 1998, 86: 295 ~ 316
- 18 Higashi T, De Coninck F, Gelaude F. Characterization of some spodic horizons of campine (Belgium) with dithionite-citrate, pyrophosphate and sodium hydroxide-tetraborate. *Geoderma*, 1981, 25, 131 ~ 142

DISTRIBUTION OF Al(Fe)-POOLS IN TWO SMALL CATCHMENTS IN HUNAN

XUE Nan-dong^{1,2} LIAO Bo-han¹

(1 College of Resources and Environment, Hunan Agricultural University, Changsha 410128;

2 Research Center for Eco-Environmental Sciences, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085)

Abstract Soil Al(Fe)-pools and basic properties of the forest soils gathered from five profiles (consisting of four horizons) in two catchments (SZY and LKS) in Hunan were determined. Al- and Fe-pools were higher in SZY than in LKS and generally higher in the top soils than in the subsoils. They, except Fe_{ox}, were positively correlated to the content of soil organic matter in the two catchments. Acid deposition may affect transformation and leaching of soil Al and Fe through formation of soluble organo-metal complexes. Significant positive correlations were observed between various forms of Al and their corresponding forms of Fe in the soils. Moreover, acid deposition also increased leaching of toxic Al and possibly availability of nutrient Fe.

Key words Small catchment, Al (Fe)-pools, Acid deposition, Hunan

(上接第 404 页)

that is to say the volume of CO₂ emitted in the daytime was lower than at nighttime. The research showed that change in CO₂ emission from Loess soil in Xi'an tended to keep pace with the change in temperature, but lag a bit in time. CO₂ emission from Loess soil in Xi'an varied with the season, being the highest in summer, moderate in autumn, and the lowest in winter. The volume of CO₂ released per day was found to be the highest in July, over 8 g/(m²·d), the second highest in August, and the lowest in December, January and February, less than 0.5 g/(m²·d). Statistic analysis showed the emission was in extremely obvious positive correlation with temperature. CO₂ emission also varied with the vegetation. Generally speaking, CO₂ emission is high on the bare ground, but low on the woodland and grassland. The experiment showed that vegetation played an important role in slowing down the release of soil carbon and protecting the environment. The protection of vegetation and enhancement of the ecosystem is one of the effective measures to curb CO₂ in the atmosphere. Therefore, restoration and construction of forests, and enlargement of Carbon sinks on the continent is an important aspect in the environment construction from now on.

Key words Loess soil, CO₂ from soil, Emission, Change law, Xi'an