

西安黄土塬区土壤碳释放规律研究

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, 陕西 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, 陕西 西安 710075; 4. 山东烟台师范学院地理系, 山东 烟台 264025)

摘要:采用现场观测方法,研究了西安黄土塬区土壤碳释放规律。结果表明,不同条件下土壤 CO₂ 释放量具有明显的日变化。土壤 CO₂ 释放量的变化与温度的变化趋势基本一致,但时间上有一定的滞后,释放量白昼低于夜间。温度是影响土壤 CO₂ 释放量变化最重要的因素。CO₂ 释放量对土质变化敏感:土质疏松,释放量大;致密的土壤,释放量小。土壤 CO₂ 释放量的大小可作为评价土质的一项重要指标。

关键词: 土壤 CO₂; 释放量; 黄土塬; 温度; 西安

中图分类号: S153 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672 – 2043(2004)02 – 0327 – 05

Change of CO₂ Emission from Soil in Loess Tableland Areas of Xi'an

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

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

Abstract: Through using alkali aqua absorption method, the amount of CO₂ emission from soil was observed round the clock in Bailu tableland and Shaoling tableland of xi'an, whose topsoil layer was usually composed of Malan loess. The results showed that there existed apparent diurnal courses of CO₂ emission amount in soil under different conditions. CO₂ emission amount tended to change similarly with the temperature, but had a retardation time. The amount of CO₂ emission in the daytime was less than that at night in loess tableland Soil of Xi'an. Temperature was the most important factor affecting CO₂ emission. The emission of CO₂ in the soil was sensitive to the texture and structure of soil and More CO₂ emitted from loose layers than solid ones, which suggested that the amount of CO₂ emission could be regarded as an important index of soil evaluation.

Keywords: CO₂ from soil; emission amount; loess tableland; temperature; Xi'an

由于人类活动,大气中 CO₂ 的浓度已由工业革命前的 280 cm³ · m⁻³ 上升到现今的 368 cm³ · m⁻³^[1]。由此导致的全球气候变暖,日益受到人们的关注。据 IPCC 温室气体排放方案特别报告中的排放方案,由碳循环模式预测 2100 年大气中 CO₂ 浓度可达 540 cm³ · m⁻³ ~ 970 cm³ · m⁻³,而全球平均表面温度预计

在 1990—2100 年间升高 1.4 °C ~ 5.8 °C^[2]。由此将导致全球环境产生一系列变化。人们发现,大气中 CO₂ 的增量远低于人类活动排放到大气中的 CO₂ 量,也就是说,存在一个很大的“漏失汇”^[3,4],它的出现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。多数人认为,“漏失汇”可能存在于陆地生物圈,特别是北半球陆地生态系统^[5~7]。其中,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碳库^[8,9](约 1 300 Pg C),也是地球大气 CO₂ 的重要来源之一。黄土是土壤

收稿日期: 2003 – 08 – 22

基金项目: 国际地质对比计划项目(IGCP448);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项目(SKLLQG0007);国家资源部岩动力开放研究实验室项目(9901)

作者简介: 张晓龙(1968—),男,在读博士。
E – mail: vx11730954@ yahoo. com. cn

碳库的重要组成部分^[10,11]。我国黄土分布广泛,土层深厚,在不同的区域形成了不同的土壤,它的研究在碳循环及全球环境变化中占有重要地位。但目前这方面的研究还较少,尤其是黄土地区土壤 CO₂ 释放量变化的观测研究几乎还是空白。本文对西安塬区不同条件下土壤 CO₂ 释放量及其变化规律的研究成果,是对我国这一研究领域的重要补充。

1 区域地理概况

西安位于我国腹地陕西省关中平原的中部,居于渭河南岸。西安地貌类型以平原为主,黄土台塬是其突出特点之一,主要分布于西安城区以东的临潼、蓝田和以南的长安境内,海拔处于 450 ~ 800 m 之间,成为高出渭河冲积平原的一个明显的地貌层面。台塬面上比较平坦,起伏较小,土层深厚^[12]。

西安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。广泛覆盖于河流二级阶地以上各地貌单元表层的是发育于更新世晚期的马兰黄土。此地层颜色呈淡灰黄色,土质疏松,结构均一,大孔隙和垂直节理发育,含许多钙质结核,中间夹一层发育弱的古土壤。

在黄土台塬区广泛分布着瘠土类的褐瘠土与黑油土^[12,13]。瘠土是西安地区最重要的农业土壤之一,也是西安地区肥力最高的一种土壤。瘠土是经人类活动长期作用而形成的土壤,它是在黄土母质基础上,经人类长期广泛地施用土粪,形成了一层较厚的熟化层,这种土壤具有疏松、孔隙率大、容重小、粘粒较少、土壤结构良好等特点^[14]。

西安地区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。

2 观测方法与数据处理

2.1 观测方法及原理

采用静态碱液吸收法。在测定土壤释放的 CO₂ 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 CO₂ 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,就能算出与碱结合的 CO₂ 量。

这种方法是用于研究由原位土壤释放 CO₂ 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,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,能够同时进行多重测定,对于空间变异性很大的土壤呼吸而言这是很大的优点。

观测时首先要根据不同季节确定碱溶液用量与浓度。夏季温度最高,土壤 CO₂ 释放量最大,用 1 mol · L⁻¹ 的 NaOH 溶液 8 mL; 春秋季节,温度较低,土壤 CO₂ 释放量减少,考虑到试剂使用量与精度,用 0.6 mol · L⁻¹ 的 NaOH 溶液 8 mL; 温度更低时,相应降低 NaOH 溶液浓度,减少碱液使用量。观测时须选定合适的监测地点,安置收集桶。根据不同季节土壤 CO₂ 释放量大小确定碱液吸收时间。温度越低,释放量越小,吸收时间应越长。如果观测时间为 2 h, 在 1 个观测点放置 2 只收集桶; 如果观测时间为 3 h, 1 个观测点放置 3 只收集桶。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,安放在置于地面的三脚架上,并将收集桶埋入土中约 2 cm, 边缘用细土埋严、压实,防止外界空气进入,以用于吸收土壤释放的 CO₂。为防止太阳直射,桶上加盖薄木板或纸张等物。同时须安置对照样,在选定的观测点,将 1 只收集桶放置在玻璃板上,桶内玻璃板上放置 1 只盛有确定量和浓度的 NaOH 溶液的烧杯,用于收集空气中的 CO₂。为防止桶内外空气流动,桶的边缘需用凡士林密封。每只收集桶每隔 2 ~ 3 h 更换一次吸收液。将吸收有 CO₂ 的烧杯密封后带回实验室,加入过量 BaCl₂,使溶液中产生不溶性的碳酸盐沉淀(BaCO₃),并加入几滴酚酞指示剂,溶液变为粉红色。然后用一定浓度的 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 BaCO₃ 沉淀接触而可能使其溶解。

2.2 观测数据的处理

(1)建立数据库。利用滴定消耗的 HCl 体积,计算碱液吸收的 CO₂ 量。用化学反应方程式: CO₂ + 2NaOH = Na₂CO₃ + H₂O; Na₂CO₃ + BaCl₂ = 2NaCl + BaCO₃ ↓; NaOH + HCl = NaCl + H₂O, 算出消耗 HCl 所用的 NaOH 量,用差减法就可以得到有多少 NaOH 与 CO₂ 发生了反应,进而算出碱液吸收的 CO₂ 的量。再减去收集桶中空气中的 CO₂, 便得出观测时段内土壤中 CO₂ 的释放量。

计算单位面积单位时间内土壤 CO₂ 释放量。公式为:

$$MCO_2(\text{mg}) = 1/2(V_1 - V_2) \cdot N \cdot E / M / H$$

式中: V₁ 为滴定收集空气中 CO₂ 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, $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$; E 为 CO_2 的摩尔质量, 取值为 44; M 为收集桶口的面积; H 为观测时间。计算得到的数据即为观测时段中间时段 1 h 内 1 m^2 的面积上释放的 CO_2 量。如吸收液放置时间为 8: 00, 移出碱液烧杯时间为 11: 00, 计算得出的数据即为 9: 00 ~ 10: 00 之间 1 m^2 的面积上土壤 CO_2 释放量。

一般 1 次实验每隔 1 h 连续观测一个昼夜, 得到 24 个观测值。

(2) 绘制土壤 CO_2 释放量变化曲线图。利用数据库数据, 绘制土壤 CO_2 释放量随着时间的变化规律图。绘图时, 将时间点设为释放量时段的中点, 如释放量时段为 9: 00 ~ 10: 00, 曲线图中的时间点即为 9: 30。从图中可直观地了解土壤 CO_2 的变化状况。

3 观测结果

3.1 西安白鹿塬土壤 CO_2 释放规律

观测点选在西安东郊, 处于白鹿塬中部的狄寨镇。这里地势平坦开阔, 表层土壤主要为黑油土, 农作物为小麦与玉米轮作, 观测点的土层为马兰黄土。2001 年 5 月和 9 月对该地进行了昼夜观测。

3.1.1 草地土壤 CO_2 释放量变化

从观测结果得知, 草地土壤 CO_2 释放量具有明显的昼夜变化, 6: 00 ~ 18: 00 土壤的 CO_2 释放量较低, 一般在 11: 00 ~ 13: 00 出现 1 d 的最低值, 其值约为 $53.3 \sim 56.8 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。21: 00 左右出现 1 d 的最高值, 约为 $203.2 \sim 220.5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。最高值约为最低值的 4 倍左右, 全天变化波动不大。图中显示, CO_2 释放量的变化与温度的变化趋势基本一致, 但在时间上相对于温度的变化有一定的滞后, 滞后时间约 6 h, 见图 1。

从释放量的昼夜分布来看, 白昼低于夜间。白昼的释放量约占日释放总量的 40%, 夜间约占 60%。表

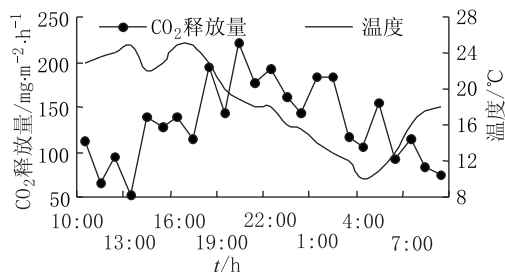


图 1 西安白鹿塬 2001 年 5 月 5 日草地土壤 CO_2 释放量变化

Figure 1 Changes of CO_2 emission amount from grassland soil in

Bailu tableland of Xi'an (5 May 2001)

面看, 释放量与温度有反相关关系, 实际上这是释放量的变化滞后于温度造成的。

3.1.2 裸地土壤 CO_2 释放量变化

观测点与草地邻近, 土层呈灰褐色, 结构均一, 土质坚硬, 较为密实。观测结果表明, 这种土层, CO_2 释放量是很小的。一般日释放总量不到 $700 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$, 仅相当于同期草地释放量的 20% 左右。可见, 土质对土壤 CO_2 释放量的影响是很显著的。裸地土壤 CO_2 释放量的昼夜变化仍很明显, 规律与草地类似, 但释放量的变化滞后于温度的时间比草地短 1 h 左右。白昼释放量低于夜间, 白昼释放量约占日释放总量的 20%。观测中一天的最高释放量为 $77.5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 最低释放量仅为 $1.7 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 变化波动相当大, 见图 2。

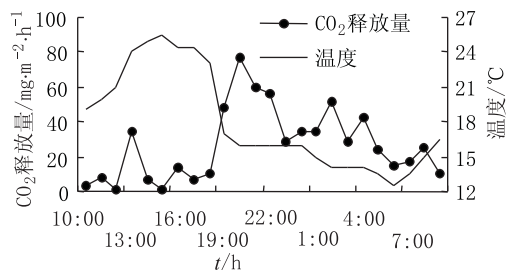


图 2 西安白鹿塬 2001 年 5 月 6 日裸地土壤 CO_2 释放量变化

Figure 2 Changes of CO_2 emission amount from bare land soil in

Bailu tableland of Xi'an (6 May 2001)

3.1.3 农田土壤 CO_2 释放量变化

观测地农田作物为玉米。从观测结果可知, 白鹿塬上玉米地土壤 CO_2 释放量也有明显的昼夜变化。在 1 d 中 8: 00 ~ 14: 00 释放量较低, 正午 12: 00 左右出现最低值, 为 $26.6 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。低值维持的时间很短, 14: 00 之后释放量即迅速增加, 16: 00 左右达到最高, 释放量为 $154.3 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。最高值约为最低值的 5.8 倍, 全天的总体波动幅度不大。从 16: 00 开始, 释放量呈波动减小, 在凌晨 1: 00 又出现了 1 个高值时段, 维持约 6 h, 之后释放量又有了明显下降。在这 1 个昼夜中, 土壤 CO_2 释放总量为 $2146.3 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$, 白天 12 h 的释放量为 $985.5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$, 占总释放量的 45.9%, 夜间 12 h 的释放量为 $1160.8 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$, 占 54.1%。释放量的变化比温度变化滞后约 3 h, 见图 3。图 3 清楚地显示出, 不同时间点上有着频繁的波动。

在 2 个收集桶所处的位置上, 一高一低的变化说明了农田土壤土层在空间上的明显差异。这种特征在几组农田土壤 CO_2 释放量的观测中都有反映。

3.2 西安少陵塬土壤 CO_2 释放量变化

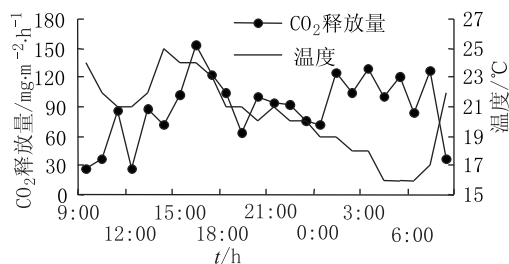


图3 西安白鹿塬 2001 年 9 月 14 日农田土壤 CO_2 释放量变化
Figure 3 Changes of CO_2 emission amount from farmland soil in Bailu tableland of xi'an (14 Sept. 2001)

2001 年 9 月, 对西安少陵塬上的农田土壤 CO_2 的释放进行了观测。观测点位于西安南郊长安县, 塬上土层为马兰黄土, 土地利用率高, 耕作历史久, 已基本垦为农田。观测时的作物为玉米, 植株高约 160 cm, 植株间距约 30 ~ 40 cm, 地表土粒大小不均。同步观测温度为距地面 100 cm 左右高处作物冠层内的温度。观测结果如下, 见图 4。

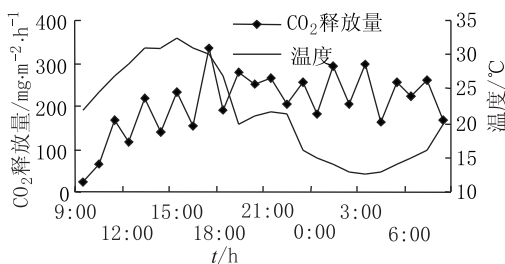


图4 少陵塬 2001 年 9 月 8 日农田土壤 CO_2 释放量变化
Figure 4 Changes of CO_2 emission amount from farmland soil in Shaoling tableland (8 Sept. 2001)

少陵塬土壤 CO_2 的释放量随温度变化很明显, 释放量的高值与低值相对于气温的高低略有滞后, 释放量的变化仍为白昼低于夜晚。白昼 7:00 ~ 18:00 的释放量占日释放总量的 41.9% ~ 49.2%, 夜间 12 h 占 50.8% ~ 58.1%。观测年 9 月份, 天气状况以阴雨为主, 气温变化很不规则, 这会导致土壤热量、水分收支变化趋于复杂。由于有作物冠层的影响, 在作物冠层内形成了一个有别于农田以外环境的微环境。地表的温度和水分状况应与外界有一定差异。田间温度的高值约出现在 15:00 ~ 16:00, 土壤 CO_2 释放量的高值约出现在 17:00 ~ 19:00, 之后, 基本在较高释放量下波动变化至次日 6:00 左右, 6:00 之后有较为明显的下降。全天总体的波动幅度不大, 最高释放量为 332.0 ~ 342.3 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 一般最高值约为最低值的 3 倍多。

图中显示, 此处土壤 CO_2 的释放量变化波动频率

高, 呈锯齿状。图中数据点一大一小的规律变化非常明显, 这其中有一定的人为操作误差, 但主要原因是农田土层在空间上有较大的差异, 导致了土壤 CO_2 释放量的不同。

4 讨论

土壤 CO_2 释放在一个昼夜中具有明显的变化, 变化趋势与温度基本一致, 但与温度并不同步。表现为释放量的高值和低值基本对应于温度的低值与高值。表面上释放量与温度似乎具有反相关关系, 实际上释放量基本随着温度而变化。温度是影响土壤 CO_2 释放量变化最重要的因素。温度不仅影响植物地上部分的生理活动, 还直接影响土壤生物的生命活动, 在一定程度上, 温度的升高能使土壤有机质更易于分解。当温度过高或过低时, 呼吸作用都会受到抑制, 反而使土壤 CO_2 释放量减少。因而温度对土壤 CO_2 释放的影响最大。但由于土壤 CO_2 释放相对于温度变化有一个过程, 加之黄土地层土层深厚, 土壤 CO_2 来源较一般土层深, 使得释放量变化在时间上相对于温度变化有一定的滞后。由于生物生命活动的复杂性, 土壤 CO_2 释放量的波动较大, 变化复杂, 表现为明显的锯齿状波动变化。

土层本身的性质对土壤 CO_2 的释放有重要影响。试验中发现, 土壤 CO_2 释放量在空间上的差异极大, 即使相距很近的观测点释放量也会有较大差异。排除人为因素的影响, 土质的疏松与坚实、空隙度的高低、土层结构均一与否、颗粒与土块分布是否均匀、局部范围内是否有杂物及含水量是否有差异等情况都会影响土壤 CO_2 的释放。从白鹿塬裸地土壤 CO_2 释放量的情形看, 由于该处裸地土层坚实, 释放量仅相当于同期草地的 1/5, 说明土层性质对释放量有非常显著的影响。2001 年 9 月 8 日少陵塬玉米地的 CO_2 释放量变化中, 2 只收集桶所在的位置虽然距离很近, 但释放量的差异是很明显的, 呈现出一高一低的变化。如果仅将其中 1 只收集桶所测的结果作图, 便得到波动小的土壤 CO_2 释放量的变化曲线, 见图 5。它在一天里的变化规律是很清楚的, 但明显的一高一低的波动没有了, 随着时间的变化也较为稳定。这说明图 4 中的波动变化的确主要是由于土层性质在局部的差异造成的。由于耕作的影响, 对土层的人为扰动强烈, 土层的颗粒并不均匀, 地表散布着大大小小的土块, 地面也不平整。在大致清理地面后, 使其较为平整, 但不能排除土层中的差异影响。加之农田施肥、

灌水都会造成土层性状的差异。虽然 1 组观测点所放置的 2 只收集桶距离很近,但仍有差异。而且,由于所测面积的局限,土层稍有差异,便会表现出较大的变化。图中数据点一大一小的规律变化非常明显地表现出了土层的局部差异对土壤 CO_2 释放量的影响。

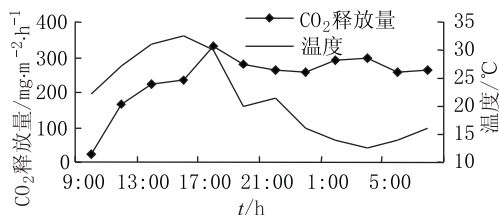


图 5 少陵塬 2001 年 9 月 8 日农田土壤 CO_2 释放量变化

Figure 5 Changes of CO_2 emission amount from farmland soil in Shaoling tableland (8 Sept. 2001)

其他观测点的试验结果也表明,土壤 CO_2 释放的空间差异性明显存在。由于土壤 CO_2 的释放过程是一个复杂的生物学过程,受到多种因素的影响,使得土壤 CO_2 的释放一方面具有某种规律性,另一方面又表现出不规则的变化。这其中有已研究取得的认识,也有人们至今未认识的奥秘。

虽然同类土壤 CO_2 释放量空间差异较大,但与不同性质土壤 CO_2 释放量相比差异还是较小的,所以土壤 CO_2 释放量差异可作为评价土质优劣的重要指标。近来,已有人将其作为评价土壤质量的一项生物学指标^[15]。

植被是生态系统的重要组成部分。不同的地表覆盖会形成不同的小环境,从而影响土壤有机质含量、pH 值、温度、湿度等,土壤呼吸也会随之发生变化。试验中发现,一般裸露地面土壤 CO_2 释放的日变化较有植被覆盖的地面波动要大。

测定土壤 CO_2 释放量的碱液吸收法,使用已有近 1 个世纪。这种方法简便易行,虽然仔细谨慎地应用这一方法可以较为准确地得到土壤 CO_2 释放量的相对速率,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。被收集桶罩住的范围内的温度、湿度、光照、气压、通风状况必会发生变化,这些必会影响到土壤微生物的生命活动,影响其对有机物的分解。其次,作为一种手工操作方法,试验过程中必然会存在一定的误差,但有些误差是难以估算的。

5 结论

(1) 西安黄土塬区土壤 CO_2 释放量具有明显的昼

夜变化表现为白昼的释放量明显低于夜间。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) 在观测时期内西安土壤 CO_2 释放量的平均值塬上塬土区草地为 $132.6 \sim 123.5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 玉米地为 $89.4 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 坚实的黑油土裸地仅有 $26.0 \sim 28.5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

(3) 影响西安地区土壤 CO_2 释放量的因素中,温度是最重要的,这主要是因为温度是影响生物活动最重要的因素。

(4) 土壤 CO_2 对土质、土壤结构差异反应敏感,较为疏松的土层 CO_2 释放量明显大于密实土层。通过布设一定数量的观测点,可据 CO_2 释放量的差异评价土质的优劣。

(5) 植被状况影响土壤 CO_2 释放过程,覆盖良好的地面释放量变化较为缓和,裸露地面变化较为剧烈。

参考文献:

- [1] 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[J]. 地理学报, 2001, 56(4): 379 - 389.
- [2] 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[J]. 地球科学进展, 2001, 16(3): 442 - 445.
- [3] David W Schinder, Nadelhoffer, et al. The mysterious missing sink [J]. *Nature*, 1999, 398: 105.
- [4] 杨 昕,王明星. 陆地碳循环研究中若干问题的评述[J]. 地球科学进展, 2001, 16(3): 427 - 435.
- [5] 方精云,朴世龙,赵淑清. CO_2 失汇与北半球中高纬度陆地生态系统的碳汇[J]. 植物生态学报, 2001, 25(5): 594 - 602.
- [6] Fan S, Gloor M, Mahlman J, et al. A large terrestrial carbon sink in North America implied by Atmospheric and oceanic carbon dioxide data and models[J]. *Science*, 1998, 282: 442 - 446.
- [7] Marie - Madeleine Coûteaux, Thomas Bolger. Interactions between atmospheric CO_2 enrichment and soil fauna[J]. *Plant and Soil*, 2000, 224: 123 - 134.
- [8] Jenkinson D S, Adams D E, Wild A. Model estimates of CO_2 emissions from soil in response to global warming[J]. *Nature*, 1991, 351: 304 - 306.
- [9] Post W M, Emanuel W R, Zinke P J, et al. Soil carbon pool and world life zone[J]. *Nature*, 1982, 298: 156 - 158.
- [10] 刘东生. 黄土与环境[M]. 北京:科学出版社, 1985.
- [11] 秦小光. 气候变化对黄土碳库效应影响的敏感性研究[J]. 第四纪研究, 2001, 21(2): 153 - 161.
- [12] 陕西省计划委员会. 陕西国土资源[M]. 西安:陕西人民出版社, 1986.
- [13] 西安市计划委员会. 西安国土资源[M]. 西安:陕西人民出版社, 1987.
- [14] 陕西师范大学地理系. 西安市地理志[M]. 西安:陕西人民出版社, 1988.
- [15] 任天志,Stefano, Grego. 持续农业中的土壤生物指标研究[J]. 中国农业科学研究, 2000, 33(1).