

# 草毡寒冻雏形土土壤 CO<sub>2</sub> 释放量 估测方法初探\*

曹广民 张金霞 赵新全 李英年 周兴民

(中国科学院西北高原生物研究所, 西宁 810001)

**摘 要** 应用 1998 年 5 月~ 1999 年 4 月草毡寒冻雏形土土壤 CO<sub>2</sub> 释放通量的实测资料, 通过对常用的三种土壤 CO<sub>2</sub> 释放量估测方法的比较分析, 提出了适合草毡寒冻雏形土土壤 CO<sub>2</sub> 日及年释放量的估测方法。土壤 CO<sub>2</sub> 日释放量的估测是以土壤 CO<sub>2</sub> 释放通量为因变量, 时间为驱动变量, 建立时间与土壤 CO<sub>2</sub> 释放通量的一元四次多项式, 通过对时间的求导积分, 得出土壤 CO<sub>2</sub> 日释放量。土壤 CO<sub>2</sub> 年释放量的估测是以测定日的土壤 CO<sub>2</sub> 日释放量为因变量, 以气候、土壤环境因子(降水、蒸发、日照、气温、土壤 0~ 30 cm 地温等) 为驱动变量, 建立土壤 CO<sub>2</sub> 的日释放量与气候、土壤环境因子之间的多元非线性经验公式, 应用气象站气候、土壤环境因子有关资料, 逐日计算出其土壤 CO<sub>2</sub> 的日释放量, 最后应用累积法, 可估测土壤 CO<sub>2</sub> 的年释放量。

**关键词** 草毡寒冻雏形土, 估测, 释放量

**中图分类号** X142

“大气温室气体浓度增加将会引起全球气候变暖”即为温室效应。关于大气温室气体未来到底会以多大的速度增加, 气候以多快的速度变暖, 大气温室气体浓度变化是否会在一定的时候使地球气候系统发生不可逆转的、超出自然系统自我调节能力范围而对人类生存系统造成毁灭性破坏等问题, 已引起全人类的普遍关注。

CO<sub>2</sub> 是大气温室气体主要成分之一, 其强烈的温室效应对气候变暖的贡献作用远超过其他气体, 大气中 CO<sub>2</sub> 浓度倍增引起全球气候变暖已成为人们关注的科学问题之一<sup>[1~4]</sup>。

陆地生态系统是大气温室气体重要地表生态源, 对大气温室气体浓度变化的作用不可忽视。进行土壤温室气体 CO<sub>2</sub> 释放量的估测是进行大气温室气体地表生态源研究的必经之路。本文采用 1998 年 5 月至 1999 年 4 月草毡寒冻雏形土土壤 CO<sub>2</sub> 释放的定点、定时测定结果, 就草毡寒冻雏形土土壤 CO<sub>2</sub> 时间尺度上释放量的估测方法作初步探讨。

\* 国家重点基础研究专项经费(G1998040800)、中国科学院研究项目(KZ95F-A1-204, KZ95F-A1-301; KZ95F-06, KZ95F-04, KSCX2-1-07), 国家基金项目(30070147), 中国科学院北海高寒草甸生态系统定位站基金项目资助

# 1 材料与方法

## 1.1 实验地点

实验设置于中国科学院海北高寒草甸生态系统定位站高草草甸综合实验观测场。植被为高草草甸,其主要优势建群种有矮嵩草(*Kobresia humilis*)、羊茅(*Festuca ovina*)、垂穗披碱草(*Elymus nulanus*)、线叶龙胆(*Gentiana farreri*)、矮火绒草(*Leontopodium nanum*)、早熟禾(*Poa sp.*)、麻花九(*Gentiana straminea*)、雪白萎陵菜(*Potentilla nivea*)、美丽风毛菊(*Saussurea superba*)、二柱头草(*Scipus distigmaticus*)、小嵩草(*Kobresia pygmaea*)、苔草(*Carex sp.*)。草毡表层发育良好,没有发生剥蚀脱落,土壤类型为草毡寒冻锥形土<sup>[5]</sup>,土壤有机质含量 70.0~200.0 g kg<sup>-1</sup>左右,土壤常年处于湿润水分状况。

## 1.2 实验方法

气体收集采用静态箱式法,CO<sub>2</sub> 气体分析采用美国 CID 公司生产的 CF 301PS 便携式光合作用测定仪测定,具体操作方法已有详细报道<sup>[6]</sup>。

影响因子测定:在进行田间土壤 CO<sub>2</sub> 释放速率测定的同时,进行气温、地温(0cm、5cm、10cm、15cm、20cm、30cm)测定。1998 年 5 月至 1999 年 4 月测定地点每日降水、蒸发、气温、日照时数、不同土层地温采用海北站气象站数据进行校正处理。

## 1.3 统计分析

实验结果均采用 Micro office 数据统计分析软件进行。回归分析采用 Basic 数理统计软件包进行。

# 2 结果与讨论

大多数文献报道,土壤温室气体释放量的估测均采用有限测点上(时间或空间)土壤温室气体释放通量均值与时段或地域面积的乘积来计算土壤温室气体在该时段或该区域释放的数量<sup>[7-12]</sup>。它的优点是简单、方便、快捷,但缺乏科学性。也有学者采用定点、定时测定结果为因变量,时间及影响温室气体释放的土壤因子的时间序列为驱动变量,利用多元非线性经验公式进行模拟而获得<sup>[13,14]</sup>。

## 2.1 草毡寒冻锥形土土壤 CO<sub>2</sub> 日释放量的估测

土壤 CO<sub>2</sub> 日释放量的估测常见文献报道有 3 种方法:(1)采用多个定点定时(时间间隔相等)土壤 CO<sub>2</sub> 释放通量测定结果,计算其平均值,再乘以 24 小时得出土壤 CO<sub>2</sub> 日释放量。(2)采用多个定点定时测定结果,各乘以其所代表的时段再进行累加得出日释放量。(3)以测定日典型时间点测定值(多采用 9~10 或 15~16 时,或二者的平均值)乘以 24 小时得出日释放量。

以草毡寒冻锥形土 6 月 17 日不同测定时间点土壤 CO<sub>2</sub> 释放通量为基准,应用不同土壤 CO<sub>2</sub> 日释放量估测方法对其土壤 CO<sub>2</sub> 释放量作了估算(表 1,表 2)。其中,模拟积分法是作者试图推荐的一种新方法,其具体做法是:以定点、定时测定的土壤 CO<sub>2</sub> 释放通量结果为因变量,时间(小时)为驱动变量,建立时间与土壤 CO<sub>2</sub> 释放通量的一元四次多项式,通过对时间的求导积分,可较好的估测出草毡寒冻锥形土土壤 CO<sub>2</sub> 的日释放量。

由表 2 可见,应用较高频次的土壤 CO<sub>2</sub> 释放通量去估测其土壤 CO<sub>2</sub> 日释放量,无论是采用均值×24 小时或测值×时段累积法,还是对时间的模拟积分法,得出的日释放量之

间差异不大。随着测定频次的减少, 三种估测方法间变异增大。等时间间隔优于非等时间间隔估测结果。以测定日典型时间点测定值乘以 24 小时得出日释放量的方法与实际测定值差异极大, 在实际工作中不能应用。

表 1 土壤 CO<sub>2</sub> 释放通量测定时间点Table 1 Time for determination points of soil CO<sub>2</sub> emission

| 频 次<br>Frequency | 时 间 点<br>Time points  |
|------------------|---|
| A                | 从 10 时起至次日 10 时每小时一次, 日 25 次                                |
| B                | 从 10 时起至次日 10 时每 2 小时一次, 日 13 次                             |
| C                | 从 10 时起至次日 10 时每 4 小时一次, 日 7 次                              |
| D                | 10:00; 14:00; 16:00; 20:00; 24:00; 4:00; 8:00; 10:00, 日 8 次 |
| E                | 9:00, 15:00, 日 2 次  |
| F                | 10:00, 16:00, 日 2 次   |

表 2 草毡寒冻锥形土土壤 CO<sub>2</sub> 日估测释放量(1998 年 6 月 17 日)Table 2 The estimated amount of daily CO<sub>2</sub> emission from Mat Cryo-sod soil (17th, June 1998)

| 频 次<br>Frequency | 估测释放量<br>Estimation values of CO <sub>2</sub> emission (g m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> ) |   |       |               | 标准差<br>Standard error | 变异系数<br>Variability (%) |
|------------------|---|---|-------|---------------|-----------------------|-------------------------|
|                  | 均值 × 24<br>Average × 24h  |   |       | 平均<br>Average |                       |                         |
|                  | 测值 × 时段<br>Determined value × time period   | 模拟积分 <sup>b)</sup><br>Simulation and integral | —     |               |                       |                         |
| A                | 10.46   | 10.46   | 10.44 | 10.45         | 0.01                  | 0.11                    |
| B                | 10.50   | 10.42   | 10.42 | 10.45         | 0.05                  | 0.44                    |
| C                | 10.58   | 10.45   | 10.41 | 10.48         | 0.09                  | 0.85                    |
| D                | 10.76   | 10.46   | 10.55 | 10.59         | 0.15                  | 1.45                    |
| E                | 11.46   | 11.46   | —     | 11.46         | —                     | 11.73 <sup>2)</sup>     |
| F                | 12.30   | 12.30   | —     | 12.30         | —                     | 18.76 <sup>2)</sup>     |

1) CO<sub>2</sub> 日释放量时间的一元四次多项式; 2) E、F 处理平均值与 A、B、C 和 D 四个频次三处理平均值的相对相差。

在实际工作中, 由于天气状况和各种客观条件的限制, 往往由于缺测或误测, 使得日测定频次较少或非等时段。采用模拟积分法, 可以减少时段划分不切实际或各测值所代表的时段权重不一致给日释放量估测带来的误差。草毡寒冻锥形土 CO<sub>2</sub> 释放量与时间(小时)之间的一元四次多项式拟合度在 1998 年~1999 年 17 个日次中均很好, 与均值 × 24 和测值 × 时段累积法相对相差大部分小于 3%。

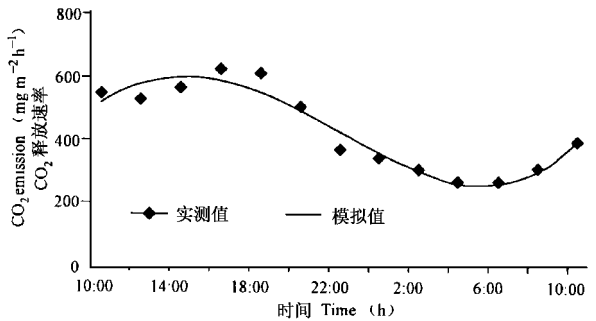
图 1 草毡寒冻锥形土 CO<sub>2</sub> 释放日变化过程的模拟

Fig. 1 The simulation of trends in CO<sub>2</sub> emission from Mat cryo-sod soil

1998年6月17日草毡寒冻锥形土土壤 CO<sub>2</sub> 释放通量实测值及拟合值之间经统计检验未达显著水准(图1)。

A、B、C、D 四种频次三种处理方法下,草毡寒冻锥形土6月17日土壤 CO<sub>2</sub> 日释放量为 10.49(±0.1) g m<sup>-2</sup>, 变异系数为 0.94%。而以 9:00 和 15:00 或 10:00 和 16:00 释放通量平均值,采用均值×24小时(或测值×时段)估测的土壤 CO<sub>2</sub> 日释放量分别为 11.46 和 12.3g m<sup>-2</sup>, 高于其土壤 CO<sub>2</sub> 日释放量类真值(10.49g m<sup>-2</sup>), 它们与类真值的相对相差分别为 11.73% 和 18.76%。

## 2.2 草毡寒冻锥形土土壤 CO<sub>2</sub> 年释放量的估测

土壤 CO<sub>2</sub> 年释放量的估测常见文献报道也有 3 种方法:(1)以不同时间测定的多个土壤 CO<sub>2</sub> 日释放量为基础,计算其平均值,再乘以 365 天得出 CO<sub>2</sub> 年释放量。(2)以不同时间测定的多个土壤 CO<sub>2</sub> 日释放量为基础,各乘以其所代表的时段再进行累加得出年释放量。(3)利用经验回归模式为传递函数,影响土壤 CO<sub>2</sub> 释放的因子的时间序列作为驱动变量,估算土壤 CO<sub>2</sub> 年释放量。

以 17 次土壤 CO<sub>2</sub> 日释放量测定结果为基础,用不同估测方法对草毡寒冻锥形土 1998 年 5 月 1 日至 1999 年 4 月 30 日的土壤 CO<sub>2</sub> 年释放量作了估测(表 3)。

表 3 草毡寒冻锥形土土壤 CO<sub>2</sub> 年释放量的估测结果

Table 3 The estimated amount of annual CO<sub>2</sub> emission from Mat Cryo-sod soil

| 项 目                     | 日均值×365天     | 实测值×时段                       | 回归累积       | 平均值      |
|-------------------------|--------------|------------------------------|------------|----------|
| Item                    | Average×365d | Determined value×time period | Simulation | Average  |
| 释放量(g m <sup>-2</sup> ) | 2 624.35     | 2 074.35                     | 2 347.08   | 2 348.59 |
| 相对相差 <sup>1)</sup> (%)  | 11.74        | 11.68                        | 0.06       |          |

1) 与平均值的相对相差。

由表 3 可见,采用日均值×365天和实测值×时段估测法,二者之间相对相差达 23.41%。这可能是由于各日释放量代表的时段权重不同,往往生长季日释放量较高且测定频度较大,而非生长季日释放量较小测定频度较小,因此,采用日均值×365天和实测值×时段估测法,二者之间差异较大。

土壤温室气体 CO<sub>2</sub> 的产生,是土壤微生物及植物根系在一系列环境因子影响下微生物对土壤有机物质分解和根系呼吸的产物,它是一个动态的、非累积性过程,受到土壤及环境因子的强烈影响。一个土壤 CO<sub>2</sub> 日释放量的测定结果只能代表该日土壤环境条件下的日释放量,非测定日由于气候土壤环境条件的变化较大,土壤 CO<sub>2</sub> 日释放量变化较大。因此采用日均值×365天和实测值×时段估测法所得到的土壤 CO<sub>2</sub> 年释放量理论上仍值得怀疑。

表 3 所列的回归累积法是以测定日的土壤 CO<sub>2</sub> 日释放量为因变量,数量化的影响温室气体释放的气候、土壤环境因子(降水、蒸发、日照、气温、土壤 0~30cm 地温等)为驱动变量,建立土壤 CO<sub>2</sub> 的日释放量与气候、土壤环境因子之间的多元非线性经验公式,以此经验公式,应用气象站有关气候、土壤环境因子有关资料,逐日计算出其土壤 CO<sub>2</sub> 的日释

放量,最后应用累积法,可估测出土壤 CO<sub>2</sub> 的年释放量。由于它考虑了每日不同气候、土壤环境因子对土壤温室气体 CO<sub>2</sub> 产生的影响。因此以这种方法估测的土壤 CO<sub>2</sub> 的年释放量较为科学。采用回归累积法所估测的草毡寒冻锥形土土壤 CO<sub>2</sub> 年释放量接近于上述两种方法的平均值 2349.35g m<sup>-2</sup>。

草毡寒冻锥形土各测定日(17次)土壤 CO<sub>2</sub> 释放量实测值及模拟值的季节变化(图 2)经统计检验未达显著水准。

应用上述模拟回归方程,利用海北站 1998 年 5 月至 1999 年 4 月各日气候、土壤环境因子,对各日土壤 CO<sub>2</sub> 释放量进行了估测(图 3)。

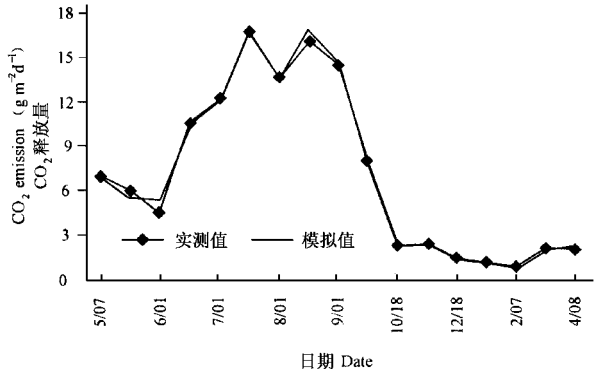


图 2 草毡寒冻锥形土土壤 CO<sub>2</sub> 日释放量的模拟

Fig. 2 Simulation of daily CO<sub>2</sub> emission from Mat cryo-sod soil

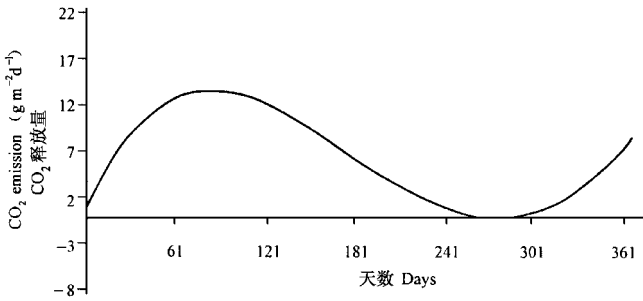


图 3 草毡寒冻锥形土土壤 CO<sub>2</sub> 日释放量的模拟

Fig. 3 Simulation of daily CO<sub>2</sub> emission from Mat cryo-sod soil

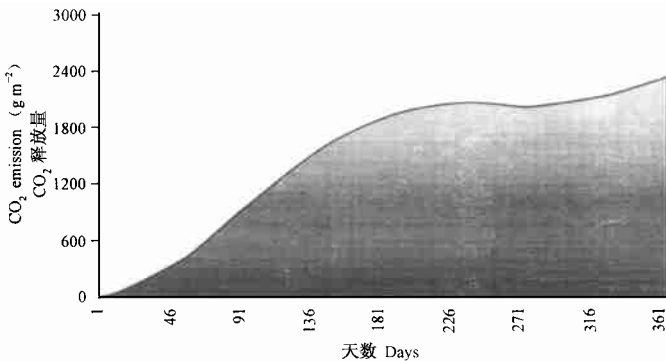


图 4 草毡寒冻锥形土土壤 CO<sub>2</sub> 累积释放量

Fig. 4 Accumulated amount of CO<sub>2</sub> emission from Mat cryo-sod soil

草毡寒冻锥形土 1998 年 5 月至 1999 年 4 月土壤 CO<sub>2</sub> 累积释放量变化趋势(图 4),其前期约 0~155 天,土壤 CO<sub>2</sub> 累积释放量上升极快,这是由于此时正值牧草生长期,土壤微

生物及根系呼吸新陈代谢作用较强所致; 随后进入非生长季, 土壤呼吸降低,  $\text{CO}_2$  累积释放量上升极缓, 在 211 天左右, 有一个小低谷, 表明此时土壤冻结, 大气中  $\text{CO}_2$  被土壤固定。

### 参 考 文 献

1. Houghton J H, Meira L G, Bruce J. Climate Change 1994. Great Britain: Cambridge University Press, 1995
2. Ouyang Y, Boersma L. Dynamic oxygen and carbon dioxide exchange between soil and atmosphere: I. Model development. Soil Sci. Soc. Am. J., 1992, 56: 1695~ 1702
3. Ouyang Y, Boersma L. Dynamic oxygen and carbon dioxide exchange between soil and atmosphere: III. Model simulation. Soil Sci. Soc. Am. J., 1992, 56: 1702~ 1710
4. Wilfred Post M, Tsung-Hung Peng, William Emanuel R. The global carbon cycle. American Scientist, 1990, 178: 310~ 326
5. 中国科学院南京土壤所, 中国土壤系统分类课题协作组主编. 中国土壤系统分类. 北京: 中国农业出版社, 1995. 121~ 136
6. 张金霞, 曹广民, 周党卫. 草毡寒冻锥形土  $\text{CO}_2$  释放特征. 生态学报, 2001, 21(4): 544~ 549
7. Dennis Ojima S, Wiliam Parton, David Schimel S. Modeling the effects of climatic and  $\text{CO}_2$  changes on grassland storage of soil C. Water, Air, and Soil Pollution, 1993, 70: 643~ 657
8. David Tumer P, Jack Winjum K, Tatyana Kolchugina P 著. 罗天祥译. 国家级地面碳收支的生物与人类因素剖析. Ambio(中文版), 1997, 26(4): 216~ 222
9. Neil Sampson R, Michael Apps, Sandra Brown. Workshop summary statement: Terrestrial biospheric carbon fluxes quantification of sinks and sources of  $\text{CO}_2$ . Water, Air and Soil Pollution, 1993, 70: 3~ 15
10. Olga Krankina N, Mark Hamon E, Jack Winjum K. 李立高译. 俄罗斯森林土壤中碳的贮藏和固定. Ambio(中文版), 1996, 25(4): 284~ 288
11. Pieter Tans P, Peter Bakwin S 著. 郑斯中译. 气候变化与二氧化碳永恒. Ambio(中文版), 1995, 24(6): 375~ 376
12. Roger Sedjo A. The carbon cycle and global forest ecosystem. Water, Air, and Soil Pollution, 1993, 70: 295~ 307
13. Be tram Ostendorf. Modeling the influence of hydrological processes on spatial and temporal patterns of  $\text{CO}_2$  from an arctic tundra catchment. Arctic and Alpine Research, 1996, 28(3): 318~ 327
14. Jukka Laine, Jouko Silvola, Kimmo Tolonen 著. 钱云译. 北方沼泽地水位下降对全球气候变暖的影响. Ambio(中文版), 1996, 25(3): 179~ 184

## METHODS OF ESTIMATING CO<sub>2</sub> EMISSION FROM MAT CRYO-SOD SOIL

Cao Guang-min Zhang Jir-xia Zhao Xir-quan Li Ying-nian Zhou Xing-min

(Northwest Plateau Institute of Biology, The Chinese Academy of Sciences, Xi'ning 810001)

### Summary

Analysis of three different methods of estimating CO<sub>2</sub> emission was carried out by comparing the data obtained from field determination of soil CO<sub>2</sub> emission from Mat Cryo-sod soil in 1998~ 1999. Based on the results of the analysis a suitable method of estimating CO<sub>2</sub> emission from Mat Cryo-sod soil was developed.

The equation for estimation of diel CO<sub>2</sub> emission is a monadic biquadratic multinomial with instantaneous CO<sub>2</sub> emission flux as dependent variable and time as drive variable. And by deriving the integral to time, the values of the diel CO<sub>2</sub> emission can be obtained. For estimation of annual emission, a multi-nonlinear experiential formula was established with diel CO<sub>2</sub> emission as dependent variable and environment factors as drive variable (such as precipitation, evaporation, sunshine, air temperature, soil temperature, etc.). Diel CO<sub>2</sub> emission was calculated using related data from the meteorological station every day, and then the annual accumulated CO<sub>2</sub> emission was obtained.

**Key words** Mat Cryo-sod soil, Estimation, Emission amount