

# 青藏高原农田生态系统碳平衡\*

刘允芬 欧阳华 张宪洲 钟华平 罗天祥

(中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

**摘要** 为探讨青藏高原农田生态系统碳平衡规律及其影响因子, 并揭示其对全球含碳温室气体源、汇变化的贡献与响应, 1998~1999 连续 2 年在拉萨农业生态站农田用静态箱法和生物量取样法开展土壤-植被界面  $\text{CO}_2$  吸收与排放的试验研究。农作物生长季, 以冬小麦为例, 生长前期(从播种到拔节)土壤碳排放量高于植被碳固定, 生长后期(灌浆到成熟)则是植被碳固定高于土壤碳排放量, 从全年来看, 土壤碳排放量略高于植被碳固定。

**关键词** 青藏高原, 农田生态系统, 土壤碳排放, 植被碳固定, 碳平衡

中图分类号 S181

全球变化已成为人类最关心的问题, 它的核心是气候变化, 含碳温室气体浓度增加所加剧的地球温室效应是气候变化的主要原因之一。对于百年以下的时间尺度, 陆地生物圈对碳循环有意义的是生长着的植物和土壤, 即通过形成生物量和存贮更多的土壤碳来对大气  $\text{CO}_2$  浓度的增加作出响应, 从而平衡全球碳预算<sup>[1, 2]</sup>。土壤呼吸作为碳的主要输出途径和  $\text{CO}_2$  的重要源(汇), 对于它进行精确、系统的测定已成为全球变化研究中的关键问题之一。青藏高原具有独特的自然条件和人文特征, 尽管农业生态系统面积很小, 在整个高原面仅占不到 1%, 为全国最低; 但人均拥有耕地面积 0.13~0.2  $\text{hm}^2$ , 远高于华中、华东和东南沿海地区。在整个生态系统, 农业生态系统中人类活动最频繁、对自然环境影响最明显, 因而青藏高原在三极中属于人类活动对自然生态系统影响相对剧烈的地区, 研究高原生态系统含碳温室气体的动态变化及其源(汇)效应对全球的贡献与响应, 探讨高原农业生态系统碳平衡规律有重要的现实意义和理论价值。本文主要探讨高原农业生态系统  $\text{CO}_2$  平衡的时空分布特征。

## 1 试验和方法

### 1.1 研究地区环境特点

试验地设置于中国科学院拉萨农业生态站(29°41' N, 91°20' E, 海拔 3 688 m)内。该站位于青藏高原东南部拉萨河下游南岸宽谷盆地的冲洪积阶地上, 属高原季风温带半干旱气候。年平均气温约 7.5℃; 年降水量 430 mm 左右, 90% 以上集中在雨季的 6~9 月。生态站土壤为冲洪积物母质, 质地偏沙; 土壤类型主要有灌丛草原土、草甸土、潮土、风沙土和新积土。本文报道的试验分别在冬小麦、冬青稞、春青稞

\* 国家重点基础研究发展规划项目(G1998040800)和中国科学院青藏高原研究项目(KZ95T-A1-204, KZ95T-06)资助

收稿日期: 2000-11-28; 收到修改稿日期: 2001-04-18

和撂荒地,土壤为灌丛草甸土,经多年耕种,熟化后形成潮土。土壤质地为粉砂壤土,粘土含量为 15%~20%;土壤 pH 值较高,为 6.95~8.55;有机质含量较低,一般在 0.76%~1.56%。受水热条件的制约,天然植被为河谷灌丛草原,有少量草甸。人工植被有:农作物、人工牧草和人工林地。

## 1.2 主要研究方法

采用定位观测与综合分析相结合、野外试验与模型模拟相结合的方法,研究高原农田生态系统土壤-植被 CO<sub>2</sub> 气体吸收/排放的动态特征。

1.2.1 土壤 CO<sub>2</sub> 气体排放测定与计算 采用箱法直接测定、分析。土壤气体采集器由箱体(地上部分)和箱底座(地下部分)组成。箱体内径 245 mm,高 300 mm,圆周和顶部封闭,底部开口;顶部除有气管可与红外 CO<sub>2</sub> 分析仪联接外,还安装 2 个由 12V 电池供电的  $\phi$ 50 mm 的电风扇。圈状箱底座内径 250 mm、高 100 mm。土壤气体分析用 CF-301PS 便携式红外 CO<sub>2</sub> 气体分析仪在野外直接测定、计算。试验前分别在北京和高原用 CO<sub>2</sub> 标准气对仪器进行了严格的标定和预试验。预试验结果表明,在扣箱后短时间(预试验时间 20 min)内土壤排放速率随时间呈线性变化( $P < 0.001$ )。试验过程中每次测定的前一天晚上都用标准气对仪器进行标定。仪器本身具有自动调零功能。土壤 CO<sub>2</sub> 气体排放每半月进行 1 d 野外连续观测,每次测定时将气体采集器箱体罩于底圈槽内,每次扣箱测定约 10 min,计算该时间间隔内 CO<sub>2</sub> 平均增量代表该时段土壤 CO<sub>2</sub> 排放通量。每个试验点设置 3 个重复观测。计算公式为:

$$Q_t = \frac{273.15}{T_a} \times \frac{P}{1.013} \times \frac{1}{22.41} \times \frac{10000 \times V}{A} \times \frac{\Delta C}{\Delta t}$$

式中  $Q_t$  为  $t$  时土壤 CO<sub>2</sub> 排放通量( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ),  $V$  为箱子体积( $\text{dm}^3$ ),  $\Delta t$  为时间间隔(s),  $T_a$  为空气温度(K),  $P$  为大气压力( $10^5 \text{ Pa}$ ),  $\Delta C/\Delta t$  是观测时间内 CO<sub>2</sub> 浓度随时间变化的直线斜率,正值表示排放,负值表示吸收。

1.2.2 植被碳固定测定与计算 植物生长季每半月、非生长季每月测定 1 次。用样方收获法测定地上生物量(包括地上部分各器官以及凋落物、立枯和杂草),用土柱法测定地下生物量。分析植被有机碳含量用以计算碳固定量。

1.2.3 环境因子的测定 气象因子:土壤 CO<sub>2</sub> 气体排放测定的同时,测定试验样地地温及箱体温度;大气压力、气温、湿度等要素值取自生态站自动气象观测记录;及时记录自然灾害(包括日期、灾害种类及其影响程度等)。土壤因子:测定日上午在每个试验样地取土用以分析土壤化学成分并测定土壤含水百分率。

1.2.4 发育期观测 主要包括播种、出苗、越冬、返青、拔节、孕穗、抽穗、开花、灌浆、乳熟等。

1.2.5 田间管理记录 主要包括整地方式、秸秆还田、施肥、撒药、灌溉、锄草、收割等。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同植被土壤 CO<sub>2</sub> 排放速率的特点及异同

对土壤 CO<sub>2</sub> 排放速率进行  $t$  检验表明,不同植被的处理之间没有显著差异。其值以 1998 年的撂荒地最低,而以 1999 年的冬青稞最高。从 2 年的试验结果看,土壤 CO<sub>2</sub> 排放速率为冬青稞 > 冬小麦 > 春青稞 > 撂荒地,其中作物地的土壤 CO<sub>2</sub> 排放速率明显高于撂荒地(表 1)。与国内外同类研究比较(由于试验方法与仪器、环境条件等均有差别,这只是粗浅的比较)<sup>[3~6]</sup>,我们的测值在其上限范围或偏高(表 2)。

表1 高原农田土壤 CO<sub>2</sub> 排放瞬时值Table 1 Soil CO<sub>2</sub> emission flux from farmland on the Qinghai-Tibet Plateau (mg m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>)

项目 Item	1998年冬小麦 Winter wheat in 1998	1999年冬小麦 Winter wheat in 1999	1998年春青稞 Spring highland barley in 1998	1999年冬青稞 Winter highland barley in 1999	1998年撂荒地 Unused land in 1998
平均	971.7	1 064.9	922.4	1 183.5	612.2
均方差	424.7	932.6	502.0	1 192.1	249.5
最小值	302.4	76.6	299.9	73.1	195.4
最大值	2 789.7	4 276.2	3 151.1	4 650.7	1 291.0
计数	71	92	71	83	71

表2 不同地区农田土壤相近发育期 CO<sub>2</sub> 排放瞬时值比较Table 2 Comparison in soil CO<sub>2</sub> emission flux from farmland between different regions at similar crop growth stage (mg m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>)

地点 Site	下垫面 Underlying surface	日期 Date	发育期 Growth stage	CO <sub>2</sub> 排放 CO <sub>2</sub> emission flux
ALASKA	大麦	1981		396.0
ALASKA	大麦	1964		681.1
拉萨站	春小麦	1995年8月平均	灌浆~乳熟	606.6
拉萨站	春小麦	1996年6月平均	拔节孕穗	989.7
本试验	春青稞	1998年8月平均	成熟~收割	817.9
北京	麦田	1981		530.0
拉萨站	冬小麦	1996年6月平均	孕穗~抽穗	1413.0
本试验	冬小麦	1998-6-16	孕穗~抽穗	1621.6
拉萨站	冬小麦	1996年7月平均	灌浆	1576.0
本试验	冬小麦	1999年7月平均	灌浆	1936.5
拉萨站	撂荒地	1995年8月平均		757.8
本试验	撂荒地	1998年8月平均		797.1
ALASKA	高粱	1974		3991.7
ALASKA	甜菜	1971		427.7
ALASKA	甜菜	1971		453.6
拉萨站	玉米249	1995年8月平均	灌浆~乳熟	377.0
拉萨站	玉米249	1995年9月平均	灌浆~乳熟	337.5
拉萨站	饲料玉米	1995年9月平均	拔节抽穗	503.7
拉萨站	覆膜玉米	1996年7月平均	吐丝	692.3
拉萨站	覆膜玉米	1996年8月平均	吐丝~灌浆	494.6
拉萨站	未覆膜玉米	1996年7月平均	吐丝	674.0
拉萨站	未覆膜玉米	1996年8月平均	吐丝~灌浆	427.6

### 2.2 土壤 CO<sub>2</sub> 排放速率日变化

农田土壤 CO<sub>2</sub> 排放速率日变化, 表现为较明显的单峰型: 峰值一般出现在地方时 11:00~ 16:00, 谷值出现在地方时凌晨 5:00 前后(图 1), 这与 Steven<sup>[1]</sup> 和 Seiko Osozawa<sup>[2]</sup> 研究结论一致。

### 2.3 不同植被土壤 CO<sub>2</sub> 排放速率与净光合速率的关系

根据同日同地块用同样仪器测定的土壤 CO<sub>2</sub> 排放速率与冬小麦、未覆膜玉米及覆膜玉米功能叶片的净光合速率, 计算了白天土壤 CO<sub>2</sub> 排放占功能叶片净光合速率的百分比, 比值为 10% ~ 60%, 除日出后和日落前的较短时间(一般不超过 30 min) 该比值较高外, 一般来讲土壤 CO<sub>2</sub> 的排放速率不及所覆盖植被功能叶片净光合速率同化 CO<sub>2</sub> 的 1/3(图 2)。比较全天土壤 CO<sub>2</sub> 排放速率与植被叶片的净光合速率, 还可以看出作物生长季在一般天气条件下(无雨), 植被白天(8:00~ 19:00) 通过光合作用固定的 CO<sub>2</sub> 量明显高于土壤碳排放, 夜间(20:00~ 7:00) 土壤 CO<sub>2</sub> 排放速率很低, 就全天而言, 土壤- 植被界面具有 CO<sub>2</sub> 的净固定量。以 1996 年 8 月 4 日测定结果为例, 冬小麦地土壤- 植被间的净固定量 CO<sub>2</sub> 达 19.64 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>(图 3)。由此可见, 由于土壤排放的 CO<sub>2</sub> 补充了高原大气 CO<sub>2</sub> 含量的不足, 作为光合作用原料的重要组成部分被植物同化, 因而不会增加大气中的 CO<sub>2</sub> 浓度。

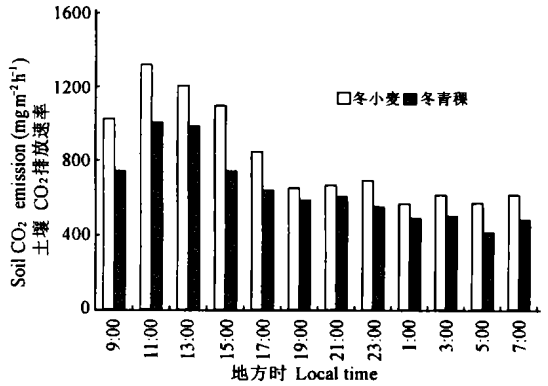


图 1 拉萨站 1999-05-09 农田土壤 CO<sub>2</sub> 排放日变化  
Fig 1 Diurnal variation in soil CO<sub>2</sub> emission flux from the farmland at Lhasa Station on May 9, 1999

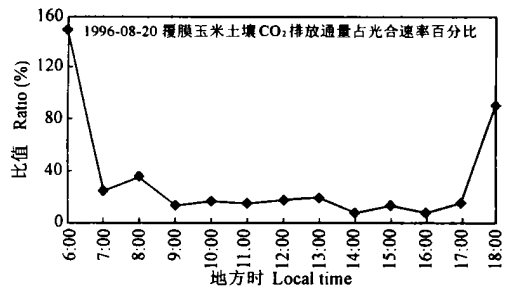
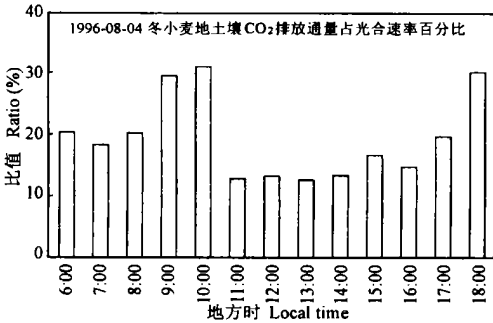


图 2 不同植被土壤 CO<sub>2</sub> 排放通量占净光合速率百分比日变化

Fig. 2 Diurnal variation in percentage of soil CO<sub>2</sub> emission flux to vegetation net photosynthetic rate in different vegetations

### 2.4 土壤 CO<sub>2</sub> 排放通量日合计及其季节变化

根据 2 年的观测, 对于试验日, 按式  $Q_a = \int_{t_1}^{t_2} Q_t dt$  计算了土壤 CO<sub>2</sub> 排放通量日合计值。式中  $Q_a$  为单位面积土壤 CO<sub>2</sub> 排放通量日合计,  $t_1$ 、 $t_2$  分别为测定日的开始、结束时间(时),  $Q_t$  为相应时次的 CO<sub>2</sub> 排放通量。以冬小麦为例, 生长季节冬小麦地土壤 CO<sub>2</sub> 排

放通量日合计为 25.96~ 361.33 kg hm<sup>-2</sup>d<sup>-1</sup>。土壤 CO<sub>2</sub> 排放通量日进程是随着发育期呈偏态抛物线的形式分布的,即苗期、越冬期最小,返青后开始逐渐增大,至发育盛期的抽穗、灌浆期最大,收割后迅速降低(见图 4)。这种变化趋势与冬小麦的光合作用日进程基本一致,这是由于作物发育盛期也正值高温、高湿期,植物根系生长旺盛,土壤微生物活跃,土壤有机质分解迅速。土壤 CO<sub>2</sub> 排放与作物光和高峰期一致,有利于高原缺少 CO<sub>2</sub> 条件下光合作用的进行,有利于作物对碳的吸收、固定。

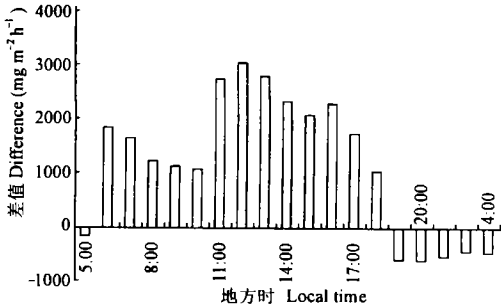


图 3 1998-08-04 冬小麦净光合速率与土壤 CO<sub>2</sub> 排放速率差

Fig. 3 Difference between winter wheat net photosynthesis rate and soil CO<sub>2</sub> emissions rate on August 4, 1998

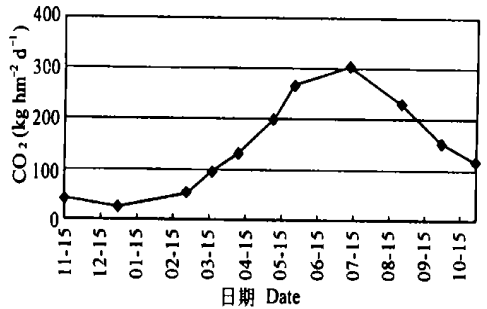


图 4 1999 年冬小麦地土壤 CO<sub>2</sub> 排放日进程

Fig. 4 Daily course of the soil CO<sub>2</sub> emission in winter wheat field of 1999

### 2.5 土壤碳排放通量累积值及其与植被碳固定量的关系初探

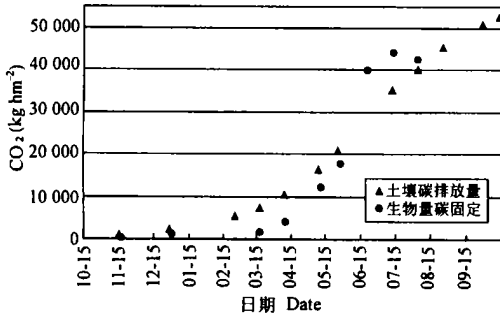


图 5 1998~ 1999 年度冬小麦地土壤 CO<sub>2</sub> 排放与生物量固定 CO<sub>2</sub>

Fig. 5 The gross soil CO<sub>2</sub> emissions and biomass CO<sub>2</sub> assimilation in winter wheat field (1998- 1999)

考虑到土壤碳排放对大气 CO<sub>2</sub> 浓度的贡献是一个累积效应,我们对周年内单位面积土壤 CO<sub>2</sub> 排放总量与生物量固定的 CO<sub>2</sub> 量的关系进行了初步探讨,计算了 1998~ 1999 生长年度排放通量累积值: 1998 年 10 月 15 日~ 1999 年 10 月 14 日 1 周年内冬小麦地土壤 CO<sub>2</sub> 排放总量为 52.51 t hm<sup>-2</sup>,而冬小麦生长期间 (1998 年 10 月 15 日~ 1999 年 8 月 8 日) 土壤 CO<sub>2</sub> 排放为 40.01 t hm<sup>-2</sup>,单位面积生物量折算 CO<sub>2</sub> 为 42.48 t hm<sup>-2</sup>,即在该年环境条件下,全年土壤 CO<sub>2</sub> 排放总量与生长季单位面积生物量固定的 CO<sub>2</sub> 总量之比为 1.24,而生长季该比值为 0.94。冬小麦生长前期 (从播种到拔节) 土壤碳排放量高于植被碳固定,生长后期 (灌浆到成熟) 则是植被碳固定高于土壤碳排放量。农田生态系统碳平衡在生长季是生物量碳固定大于土壤碳排放,就全年而言则是土壤碳排放高于生物量碳固定。由于仅有 1 年完整资料,还将在连续多年的试验中进一步深入研究这一问题。

冬小麦生长前期 (从播种到拔节) 土壤碳排放量高于植被碳固定,生长后期 (灌浆到成熟) 则是植被碳固定高于土壤碳排放量。农田生态系统碳平衡在生长季是生物量碳固定大于土壤碳排放,就全年而言则是土壤碳排放高于生物量碳固定。由于仅有 1 年完整资料,还将在连续多年的试验中进一步深入研究这一问题。

## 2.6 土壤 CO<sub>2</sub> 排放通量与植被光合总量的关系

大气和土壤中的 CO<sub>2</sub> 是陆地植物光合作用的唯一供应者, 我们希望了解土壤碳排在作物光合中的作用。由于 1998 年未进行光合速率测定, 暂以 1995、1996 年相近生长期的冬小麦光合速率<sup>[7]</sup>与 1998 年度同地块冬小麦地土壤碳排放做一粗略对比, 可以看出, 在作物生长季, 土壤排放的 CO<sub>2</sub> 一般来讲占其上所覆盖植被净光合作用同化 CO<sub>2</sub> 的 80% 左右。由此可见, 由于土壤排放的 CO<sub>2</sub> 补充了高原大气 CO<sub>2</sub> 含量的不足, 作为光合作用原料的重要组成部分被植物同化, 因而不会增加大气中的 CO<sub>2</sub> 浓度(见表 3)。

表 3 冬小麦地土壤碳排放与植被光合总量

Table 3 Gross soil CO<sub>2</sub> emissions and vegetation photosynthesis in winter wheat fields (kg hm<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>)

日期 Date	碳排放日总量 Gross of CO <sub>2</sub> emission	日期 Date	光合日总量 Gross photosynthesis	碳排放/光合 Ratio	日期 Date	光合日总量 Gross photosynthesis	碳排放/光合 Ratio
1998-05-31	221.3	1995-05-22	255.16	0.87			
1998-06-16	273.3	1995-06-06	317.67	0.86	1996-06-20	283.34	0.96
1998-08-04	256.3	1995-07-29	354.92	0.72	1996-08-04	293.84	0.87

## 3 结 论

通过 1998 年—1999 年的试验研究, 得到以下初步结论并需进一步深入探讨。

(1) 土壤 CO<sub>2</sub> 排放速率日平均值从高到低排列顺序为冬青稞> 冬小麦> 春青稞> 撂荒地。(2) 土壤碳排放速率日变化, 表现为较明显的单峰型: 峰值一般出现在地方时 11:00~16:00, 谷值出现在地方时凌晨 5:00 前后。(3) 土壤 CO<sub>2</sub> 排放速率与净光合速率的关系: 土壤 CO<sub>2</sub> 排放速率不及所覆盖植被功能叶片净光合速率同化 CO<sub>2</sub> 的 1/3, 植被白天光合作用固定的 CO<sub>2</sub> 量明显高于土壤碳排放, 而夜间土壤 CO<sub>2</sub> 排放速率低, 因而就全天而言, 土壤—植被界面具有 CO<sub>2</sub> 的净固定量。(4) 土壤碳排放通量季节变化: 土壤 CO<sub>2</sub> 排放通量日进程是随着发育期呈偏态抛物线的形式分布的, 即苗期、越冬期最小, 返青后开始逐渐增大, 至发育盛期的抽穗、灌浆期最大, 收割后迅速降低。这种变化趋势与冬小麦的光合作用日进程基本一致。(5) 土壤碳排放通量累积值及其与植被碳固定量的关系: 在目前环境条件下, 全年土壤 CO<sub>2</sub> 排放总量与生长季单位面积生物量固定的 CO<sub>2</sub> 总量之比为 1.24, 而生长季该比值为 0.94。(6) 土壤 CO<sub>2</sub> 排放通量与植被净光合总量的关系: 在作物生长季, 土壤排放的 CO<sub>2</sub> 一般来讲占其上所覆盖植被净光合作用同化 CO<sub>2</sub> 的 80% 左右。

## 参 考 文 献

- Houghton J.T., Meira Filho L.G., Bruce J., *et al.* eds. Climate Change 1994. Radiative Forcing of Climate and Evaluation of the IPCC IS92 Emission Scenarios. Cambridge: Cambridge University Press, 1995. 339
- Seiko Oozawa, Shuichi Hasegawa. Diel and seasonal changes in carbon dioxide concentration and flux in an andisol. Soil Science,

1995, 160(2): 117~ 124

3. Steven F O, Chris T G, Cheng Weixin *et al.* Diurnal and seasonal patterns of ecosystem CO<sub>2</sub> efflux from upland tundra in the foothills of the Brooks range, Alaska, U. S. A. *Arctic and Alpine Research*, 1996, 28(3): 328- 338
4. Nakayama F S. Soil Respiration. *Remote-Sensing-reviews*, 1990, 5(1): 311~ 321
5. 刘允芬. 青藏高原农田土壤 CO<sub>2</sub> 排放研究初报. *自然资源学报*, 1998, 13(2): 181~ 186
6. 杜宝华. 作物冠层内 CO<sub>2</sub> 源、流研究的现状与展望. *中国农业气象*, 1994, 15(3): 44~ 48
7. 刘允芬, 张宪洲, 张谊光, 等. 青藏高原田间冬小麦旗叶光合作用研究. *植物生态学报*, 1999, 23(6): 521~ 528

## CARBON BALANCE IN AGRO-ECOSYSTEM IN QINGHAI-TIBET PLATEAU

Liu Yun-fen Ouyang Hua Zhang Xia-zhou Zhong Hua-ping Luo Tian-xiang

(*Institute of Geography and Natural Resources, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101*)

### Summary

During the period from 1998 to 1999, absorption and emission of CO<sub>2</sub> in soil and vegetation system were studied by the static box method used in fields and biomass sampling, in the Lhasa Agro-ecology Station. This experiment was designed to explore carbon balance in the field ecosystem on the Qinghai-Tibet Plateau and its affecting factors, and disclose its contribution and response to the switch between pool and source of carbonaceous gas in the atmosphere. The CO<sub>2</sub> emissions in soil was more than the CO<sub>2</sub> assimilation of vegetation in the early wheat growing period (from sowing to jointing), while in the late period (from milking to maturity) the assimilation exceeded the emissions. The annual CO<sub>2</sub> emissions in soil were a little more than the annual assimilation of vegetation.

**Key words** Qinghai-Tibet plateau, Agro-ecosystem, CO<sub>2</sub> emissions in soil, CO<sub>2</sub> assimilation of vegetation, Carbon balance