

青藏高原高寒草原生态系统土壤 CO₂ 排放及其碳平衡*

张宪洲** 石培礼 刘允芬 欧阳华

(中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要 青藏高原海拔高, 气压低, 太阳辐射强, 气候寒冷, 其主体部分为海拔 4000 m 以上的高寒地区. 由于严酷的自然条件的限制, 对高海拔地区的土壤 CO₂ 排放的研究非常少, 尤其对海拔 4500 m 以上的高寒草原生态系统土壤的 CO₂ 排放研究更不多见. 本试验采用静态箱式法, 通过对高原高寒草原生态系统(西藏: 班戈县, 90.01°E, 31.23°N, 海拔 4800 m)土壤 CO₂ 排放的 2 周年的定点观测, 结果表明: 青藏高原高寒草原生态系统土壤 CO₂ 排放的日变化呈现单峰曲线, CO₂ 排放最高点出现在当地时间的 14:00 左右, 最低点出现在当地时间的凌晨 5:00 左右, 在夏季这种特征尤其明显; 高寒草原生态系统土壤 CO₂ 排放亦呈现明显的季节变化, 夏季增强, 冬季明显减弱; 根据计算, 高寒草原生态系统土壤 CO₂ 排放年日平均值和年总量分别为 21.39 mgCO₂·m⁻²·h⁻¹ 和 187.46 gCO₂·m⁻²·a⁻¹, 结合高寒草地净生产量的观测结果, 表明青藏高原高寒草原生态系统是碳汇.

关键词 土壤 CO₂ 排放 高寒草原 青藏高原

早在 19 世纪, 土壤微生物活动和土壤 CO₂ 呼吸就开始引起人们的注意^[1], 在 19 世纪后半叶和 20 世纪初的几年中, 人们就开始了土壤呼吸的研究, 但在随后几十年中, 土壤呼吸研究的报道很少^[2]. 在 20 世纪 60 年代以后, 有关研究再度兴起, 不仅深度得以深化, 而且由于测量方法的改进、仪器的改善以及相关因素的综合考虑, 精度得到进一步提高. 特别是近

10 余年来, 随着全球气候变化成为公众和科学界的关注热点之一, CO₂ 作为一种最重要的温室气体, 其源、汇及通量的精确测定格外受到重视.

从 70 年代国际生物圈计划(IBP)实施以来, 对全球生态系统的生物生产力进行了广泛研究, 关于典型陆地生态系统的碳平衡研究已经有不少报道^[3]. 土壤是全球碳收支的一个重要分室, 是陆地生态系统

2004-07-14 收稿, 2004-10-12 收修稿

* 国家重点基础研究发展规划项目(编号: G1998040800, G2002CB412501)、国家自然科学基金项目(批准号: 30170153, 30470280)、中国科学院知识创新工程重大项目(编号: KZCX1-SW-01-01A)和中国科学院地理科学与资源研究所创新工程主干项目(编号: CXIOG-E01-03-03)共同资助

** E-mail: zhangxz@igsrr.ac.cn

最大的碳库, 达 1500 PgC, 是大气碳库 750 PgC 的 2 倍^[4], 土壤呼吸是生态系统碳循环向大气释放 CO₂ 的主要碳源, 估计全球土壤呼吸每年释放到大气碳通量达到 68~75 PgC^[5,6]. 我国对碳循环的研究已有十几年的历史, 对森林^[7,8]和草地生态系统^[9~13]的温室气体排放进行了广泛的研究, 但对青藏高原地区, 除了在贡嘎山^[14]、海北^[9,15]和五道梁^[16,17]地区分别对森林生态系统和草地生态系统进行了相关的研究之外, 对高原腹地的土壤温室气体排放的研究还非常少^[18,19].

青藏高原的主体部分为高寒地区, 在这种寒冷的气候条件下, 每年植被层的凋落物的分解速率很低, 尤其是分布在海拔 4000 m 以上的、作为青藏高原主体部分的高寒草甸和高寒草原, 其土壤层碳的释放是缓慢的, 土壤层长时期碳的累积量是巨大的. 在未来全球变化情景下, 高原土壤层的 C 排放和植被层的 C 吸收对全球变化更为敏感, 因此高原 C 的源、汇转换在时间尺度上要比平原地区快得多. 青藏高原对其上空大气来讲究竟是 C 的源还是汇, 强度有多大? 这个问题将会成为世界全球变化研究中的焦点, 解决这个问题不但填补了有关全球变化的空白, 而且也许会对有关全球 C 平衡研究中的一些不确定性问题提供全新的解释.

本研究的目的是通过对青藏高原高寒草原生态系统土壤 CO₂ 排放的 2 周年的定点观测, 定量地描述青藏高原高寒草原生态系统土壤 CO₂ 排放的日变化和季节变化特征, 估算青藏高原高寒草原生态系统的碳平衡.

1 研究方法

1.1 研究区概况

本试验测定点设在西藏班戈县的高寒草原地区 (90.01°E, 31.23°N, 海拔 4800 m), 属亚寒带气候区. 该地区高寒缺氧, 气候干燥, 多大风天气, 年平均气温为 -1.2°C, 年相对湿度为 48%~51%, 年降水量 380 mm, 年日照时数为 2852.6~2881.7 h, 总辐射可达 8360 MJ·m⁻²·a⁻¹, 差不多是内地沿海地区的两倍, 全年无绝对无霜期. 生态系统为紫花针茅 (*Stipa purpurea* Griseb) 为建群种的丛生禾草或根茎苔草高寒草

原, 群落混生有较多青藏苔草 (*Carex moocroftii* Falx. Ex Boott), 形成二者共优的高寒草原生态系统. 本区土壤类型为高山草原土, 0~40 cm 土壤有机碳含量为 1.1%, 全氮含量为 0.067%, pH 为 8.2.

1.2 观测方法

土壤 CO₂ 排放的观测采用静态箱法. 采样箱用不透明 PVC 板制成, 底面积为 50 cm×50 cm, 采样箱高度为 30 cm. 采样箱带有一个用于抽取箱内气体的注射器 (100 mL), 采样箱内还安置了用于使箱内空气均匀 12 V 风扇和用于读取箱内气温的温度表.

在每次观测时, 观测前 24 h 在样地里布置 3 个重复样点, 将采样箱底圈压进每个重复样点的 5 cm 深的土壤里, 采样箱底圈注水用于密封, 并剪去底圈内地上部分的植物. 在每次取样时, 每个重复在扣箱后 0, 10, 20, 30 min 时抽取气样, 用 100 mL 注射器抽取箱内气样直至注满贮气袋 (1 L), 然后利用 LI-COR 6252 型 CO₂ 红外线分析仪测定气样的 CO₂ 浓度. 采样时间从 1999 年 10 月开始到 2001 年 7 月结束. 在生长季每个月测定两次, 在非生长季每个月测定一次. 在每个测定日, 在当地时间 7:00~9:00 和 15:00~17:00 各采集气体 1 次; 对用于日变化分析的气体采样则从早上当地时间 7:00 开始每隔 3 h 每个重复取样 1 次, 全天测定 8 次. 在整个试验期间共实施了 22 次 (日) 观测, 其中有 6 次 (日) 为日变化的观测. 另外, 在采样地点还设置一套地温表 (0, 5, 10, 15, 20 cm 温度), 在每个重复样点取样的同时观测地温. 逐日气象资料如地温资料来自于离观测样点 2 km 远的班戈县气象站.

生物量取样是选择 3 个 50 cm×50 cm 的样方, 自地表剪掉地上部分的植物, 放进塑料袋内, 带回到实验室烘干称重. 关于根的观测, 是在 3 个测定样方内将根带土挖出装进塑料袋, 带回实验室将根筛出, 用水洗净, 风干后将材料放进 65°C 烘箱中烘干至恒重. 生物量在 2000 年 1 月 7 日和 2000 年 8 月 27 日各测定了 1 次, 用于计算当年的生物生产力.

1.3 通量计算

土壤 CO₂ 排放通量的计算可用下面公式:

$$F = \frac{\Delta m}{\Delta t} \cdot D \frac{V}{A} = hD \frac{\Delta m}{\Delta t}, \quad (1)$$

公式(1)中 F 为温室气体排放通量($\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$), V 为观测箱的容积, A 为采样箱底面积, D 为箱内气体密度($D = n/V = P/RT$, 单位为 $\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$, P 为箱内气压, T 为箱内气温, R 为气体常数), $\Delta m/\Delta t$ 是气体浓度在观测时间内随时间变化的直线斜率, h 为观测箱高度.

2 结果与讨论

2.1 高寒草原生态系统土壤 CO₂ 排放特征

2.1.1 日变化

在整个试验期间共进行了 6 次土壤 CO₂ 排放日变化的观测(图 1), 主要集中在春季、秋季和夏季. 在冬季, 班戈的气候条件非常严酷, 无法进行土壤 CO₂

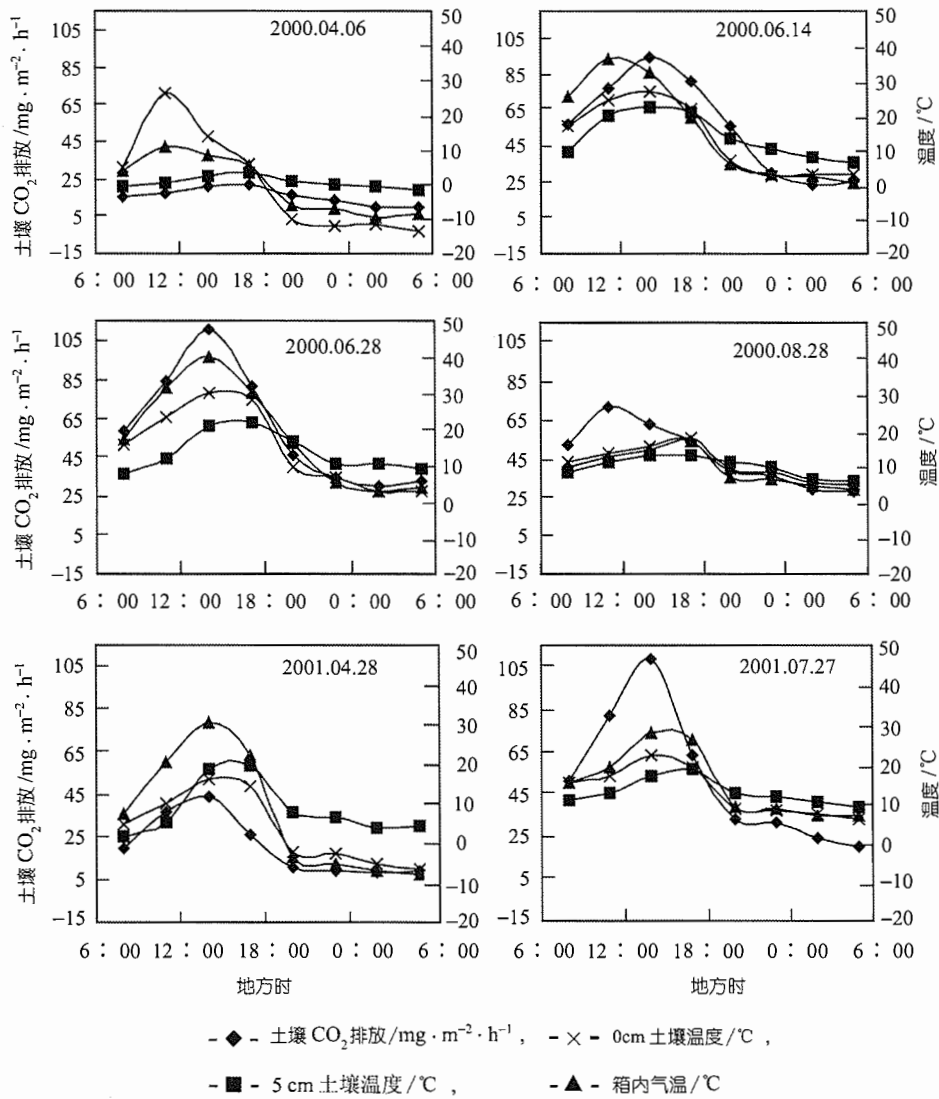


图 1 高寒草原生态系统土壤 CO₂ 排放的日变化

排放日变化的观测. 从图 1 可以看出, 高寒草原土壤 CO_2 排放的日变化呈现单峰曲线, CO_2 排放最高点出现在当地时间的 14:00 左右, 最低点出现在当地时间的凌晨 5:00 左右, 在夏季这种特征尤其明显; 土壤 CO_2 排放与 0 cm 地温和 5 cm 地温关系紧密.

2.1.2 季节变化

在整个试验期间共进行 22 次土壤 CO_2 排放观测, 其中 6 次为日变化观测(图 1), 我们可以直接计算得到这 6 次的土壤 CO_2 排放日平均值和日总量. 从 6 次日变化的观测中也可以看出, 土壤 CO_2 排放的日均值非常接近每日 8:00 的观测值(图 1), 因此对于没有进行日变化观测的而只进行一天两次观测的其他 16 次观测, 我们可以直接用上午 7:00 ~ 9:00 的观测值作为日均值来计算其日总量. 图 2 表示了土壤 CO_2 排放日总量的季节变化状况. 从图 2 可以看出, 高寒草原土壤 CO_2 排放日总量季节变化呈单峰曲线的特征, 最小值出现在冬季 12~1 月, 2000 年 1 月 7 日的土壤呼吸量仅有 $0.096 \text{ g CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$; CO_2 排放最大值出现在夏季 6~7 月, 2000 年 6 月 28 日的土壤呼吸量可达 $1.44 \text{ g CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$.

2.2 土壤 CO_2 排放通量与地温的关系

从上述高原高寒草原土壤 CO_2 排放的日变化特

征和年变化特征来看, 土壤 CO_2 排放与土壤温度密切相关, 土壤温度应该是决定土壤 CO_2 排放量大小的主导因子. 在这里, 我们分析了土壤 CO_2 排放与 0 cm 地温和 5 cm 地温的相关性(图 3). 从图 3 可以看出, 土壤 CO_2 排放与 0 cm 地温和 5 cm 地温有着良好的指数关系, 但 0 cm 地温与土壤 CO_2 排放的关系似乎比 5 cm 地温的关系更为显著.

2.3 土壤 CO_2 排放年总量

土壤 CO_2 排放年总量的估算方法有两种. 一种是利用土壤 CO_2 排放季节变化的数据(图 2)直接估算土壤 CO_2 排放的年总量; 另一种方法是利用土壤 CO_2 排放与 0 cm 和 5 cm 的相关关系式(图 3)来计算土壤 CO_2 排放年总量. 由于我们在整个试验期间观测次数的限制(22 次), 用第一种方法直接估算土壤 CO_2 排放的年总量会带来一定的误差, 因此采用第二种方法来估算土壤 CO_2 排放年总量比较合适. 根据土壤 CO_2 排放与 0 cm 和 5 cm 的相关关系式(图 3), 采用逐日 0 cm 地温资料来估算土壤 CO_2 排放年总量, 逐日 0 cm 地温资料来自于离观测样点 2 km 远的班戈县气象站. 图 4 为利用逐日 0 cm 地温资料计算了 1999 年、2000 年和 2001 年逐日的土壤 CO_2 排放总量, 并与实测资料进行了比较.

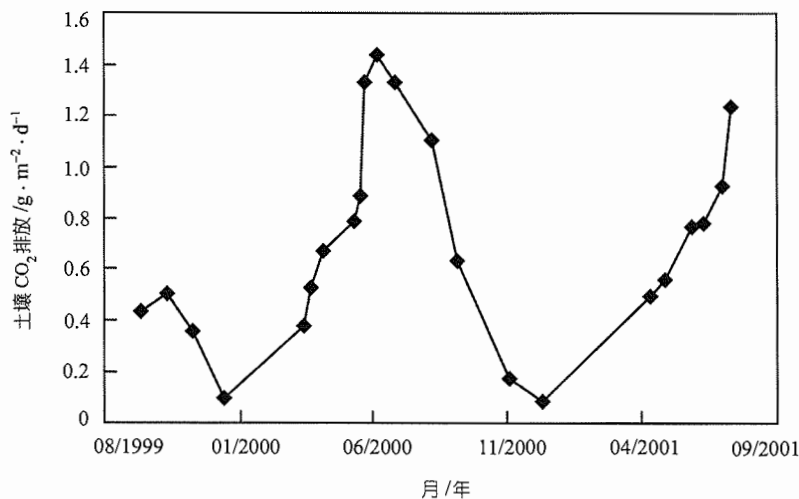


图 2 高寒草原生态系统 CO_2 排放的季节变化

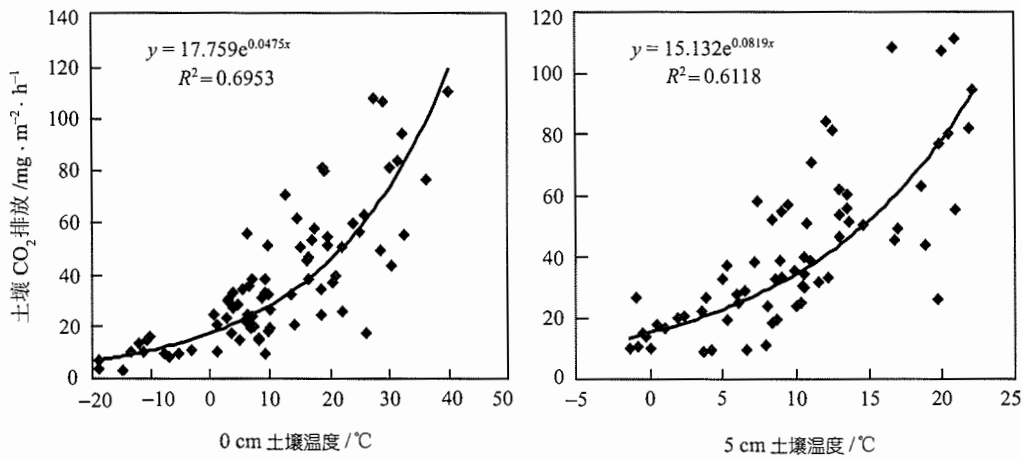


图3 土壤 CO₂ 排放与 0 cm 和 5 cm 地温的关系

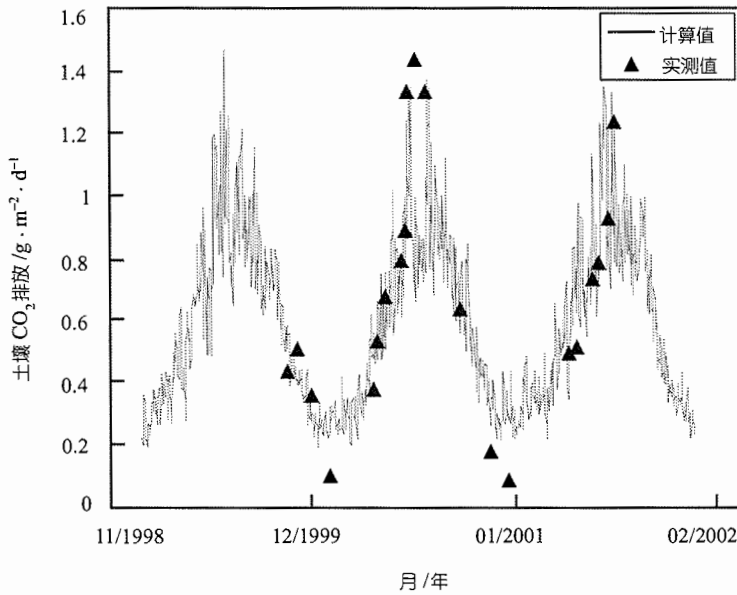


图4 1999~2001 年高寒草原生态系统土壤 CO₂ 排放年变化

为了消除由于逐年气候变动造成土壤 CO₂ 排放年际间变化的影响, 我们统计得到了 1981~2000 年 20 年平均逐日 0 cm 的地温资料, 并以此计算了土壤 CO₂ 排放的逐日的日总量(图 5)和年总量, 用以代表在平均气候状况下的土壤 CO₂ 排放, 计算得到的土壤 CO₂ 排放年日平均值和年总量分别为 21.39 mgCO₂ · m⁻² · h⁻¹ 和 187.46 gCO₂ · m⁻² · a⁻¹.

2.4 高寒草原生态系统的碳平衡

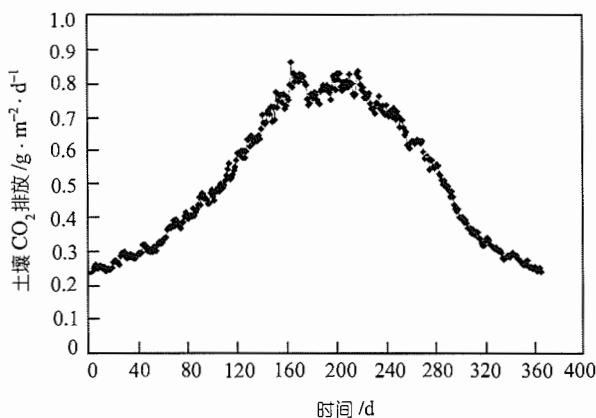
净生态系统生产力是表示生态系统碳平衡的指标, 是生态系统净初级生产力与土壤异养呼吸的差值, 净生态系统生产力为负值表示生态系统为碳源, 若为正值, 则表明生态系统是碳汇。

草原生态系统的净初级生态系统生产力由一年中生长季最大生物量与非生长季最小生物量的差值

表 1 高寒草原净初级生产力的确定

时间	项目	植物量/ $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$			平均
		A	B	C	
2000-01-7	地上枯萎物	73.36	81.72	69.80	74.96
	根系生物量	793.28	837.72	749.00	793.32
2000-08-27	地上生物量	118.68	86.96	100.12	101.94
	当年凋落物	11.52	7.76	9.24	9.48
	根系生物量	969.56	851.48	901.64	907.56

$$NPP = 101.94 + 9.48 + (907.56 - 793.32) = 225.66 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$$

图 5 平均气候状况下的高寒草原生态系统土壤 CO_2 排放的年变化

来确定。以 2000 年为例, 在 2000 年 1 月 7 日草地休眠期和 2000 年 8 月 27 日草地生物量最大时期分别测定地上、地下部分和当年凋落物的量, 计算出高寒草原生态系统年净初级生产力为干物质 $225.66 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (表 1)。根据班戈样点的实际测定, 高寒草地植物地上地下部分混合样含碳量为干物重的 43%, 由此可以推算班戈高寒草原生态系统的净初级生产力为 $97.03 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

土壤呼吸包括根系呼吸和土壤微生物异氧呼吸, 异氧呼吸占整个土壤呼吸的 45%~48%^[20-22]。以 2000 年为例, 由逐日的土壤 CO_2 排放得到 2000 年高寒草原土壤呼吸年总量为 $211.16 \text{ gCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 按异氧呼吸占整个土壤呼吸的 45%来计算, 可以推算出班戈高寒草原生态系统的异氧呼吸为 $25.91 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。联系到上述得到的 2000 年班戈高寒草原生态系统的净初级生产力为 $97.03 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,

由此可以计算得到 2000 年班戈高寒草原生态系统的碳平衡即净生态系统生产力为 $71.12 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 表明班戈高寒草原生态系统是碳汇。

3 结论

(1) 高寒草原土壤 CO_2 排放的日变化呈现单峰曲线, CO_2 排放最高点出现在当地时间的 14:00 左右, 最低点出现在当地时间的凌晨 5:00 左右, 在夏季这种特征尤其明显; 土壤 CO_2 排放与 0 cm 地温和 5 cm 地温关系紧密。

(2) 高寒草原 CO_2 排放的日总量季节变化呈单峰曲线的特征, 最小值出现在冬季 12~1 月, 冬季最小的土壤 CO_2 排放仅有 $0.096 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$; 最大值出现在夏季 6~7 月, 可达 $1.44 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

(3) 土壤温度是决定土壤 CO_2 排放大小的主导因子。土壤 CO_2 排放与 0 cm 地温和 5 cm 地温有着良好的指数关系, 但 0 cm 地温与土壤 CO_2 排放的关系比 5 cm 地温的关系更为显著。

(4) 根据 1981~2000 年 20 年平均的逐日 0cm 地温资料, 计算了土壤 CO_2 排放的逐日的日总量和年总量, 用以代表在平均气候状况下的班戈高寒草原土壤 CO_2 排放, 计算得到的土壤 CO_2 排放年日平均值和年总量分别为 $21.39 \text{ mgCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $187.46 \text{ gCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

(5) 根据 2000 年的数据计算, 班戈高寒草原生态系统的碳平衡即净生态系统生产力为 $71.12 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 表明班戈高寒草原生态系统是碳汇。

参 考 文 献

- 1 Saussure Th D E. Recherches chimiques sur la. Vegetation.

- Gauthier-Villars. Paris, 1804
- 2 Magnusson T. Studies of the soil atmosphere and related physics site characters in mineral forest soils. *Journal of soil science*, 1992, 43: 767~790
 - 3 Moore B. Biogeochemical cycles. In: Ramber M B, et al. *Global ecology: Towards a science of biosphere*. New York: Academic Press, 1989. 113~141
 - 4 Eswaran H E, Van Den Berg E, Reich P. Organic carbon in soils of the world. *Soil Science Society of America Journal*, 1993, 57: 192~194
 - 5 Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus*, 1992, 44B: 81~99
 - 6 Raich J W, Potter C S. Global patterns of carbon dioxide emissions from soils. *Global Biogeochemical Cycles*, 1995, 9: 23~36
 - 7 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
 - 8 蒋高明. 北京地区辽东栎土壤释放 CO₂ 的模拟试验研究. *生态学报*, 1995, 17(5): 477~482
 - 9 曹广民, 李英年, 张金霞, 等. 高寒草甸不同土地利用格局土壤 CO₂ 的释放量. *环境科学*, 2001, 22(6): 14~19
 - 10 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
 - 11 崔骁勇, 陈四清, 陈佐忠. 大针茅典型草原土壤 CO₂ 排放规律的研究. *应用生态学报*, 2000, 11(3): 390~394
 - 12 Dong Y S, Zhang S, Qi Y C, et al. Fluxes of CO₂, N₂O, and CH₄ from typical temperate grassland in Inner Mongolia and its daily variation. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45(17): 1590~1594.
 - 13 Wang Y, Hu Y, Ji B, et al. An investigation on the relationship between emission/uptake of greenhouse gas and environmental factors in semiarid grassland. *Advance in Atmospheric Sciences*, 2003, 20(1): 119~127
 - 14 罗辑, 杨忠, 杨清伟. 贡嘎山东坡峨眉冷杉林区土壤 CO₂ 排放. *土壤学报*, 2000, 37(3): 402~409
 - 15 张金霞, 曹广民, 周党为, 等. 退化草地暗沃锥形土 CO₂ 释放的日变化和季节变化规律. *土壤学报*, 2001, 38(1): 32~40
 - 16 林青. 青藏高原五道梁冻土活动层表面二氧化碳和甲烷的排放. *冰川冻土*, 1996, 18(4): 325~330
 - 17 裴志永, 欧阳华, 周才平. 青藏高原高寒草原碳排放及其迁移过程的研究. *生态学报*, 2003, 23(2): 231~236
 - 18 刘允芬. 青藏高原农田土壤 CO₂ 排放研究初报. *自然资源学报*, 1998, 13(2): 181~186
 - 19 刘允芬, 欧阳华, 曹广民, 等. 青藏高原东部生态系统土壤碳排放. *自然资源学报*, 2001, 16(2): 152~160
 - 20 Andrews J A, Harrison K G, Matamala R, et al. Separation of root respiration from total soil respiration using carbon-13 labeling during free-air carbon dioxide enrichment(FACE). *Soil Sci Soc Am J*, 1999, 63: 1429~1435
 - 21 Keltling D L, Burger J A, Edwards G S. Estimating root respiration, microbial respiration in the rhizosphere, and root-free soil respiration in forest soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 1998, 30(7): 961~968
 - 22 Rochette P, Flanagan L B, Gregorich E G. Separating soil respiration into plant and soil components using analyses of the natural abundance of carbon-13. *Soil Science Society of American Journal*, 1999, 63: 1207~1213