

中国温带典型草原土壤呼吸特征的实验研究

王庚辰 杜睿 孔琴心 吕达仁

(中国科学院大气物理研究所, 北京 100029. E-mail: wgc@mail.iap.ac.cn)

摘要 1998~2000年间在内蒙古草原对中国温带典型草原土壤呼吸特征进行了实验研究, 所采用的观测手段为静态箱法和GC/FID分析技术. 对观测资料的分析表明, 中国温带草地的土壤呼吸的变化范围为 $390\sim 866\text{ gC/m}^2\cdot\text{a}^{-1}$, 表现有明显的季节变化和较大幅度的年际变化, 土壤呼吸平均占草地总呼吸的70%~88%. 研究结果还发现, 丰水年土壤呼吸与土壤温度有较强的关系, 1998年中国北方雨水增多使草地土壤呼吸显著增强, 而在干旱年份, 土壤呼吸与土壤温度的关系明显减弱, 而与空气温度的关系却显著增强, 土壤含水量在土壤呼吸与温度之间的相关性方面有着重要的制约作用.

关键词 温带草原 土壤呼吸 内蒙古草原 CO_2 排放

认识陆地生态系统的 CO_2 源、汇特征是当前全球气候和环境变化研究中的核心问题之一, 但到目前为止, 有关陆地生态系统碳循环的研究工作大多集中在森林生态系统方面. 而对于自然草地生态系统, 尤其是对于温带自然草地生态系统却缺乏足够的研究. 自然草地生态系统约占全球陆地表面的25%, 全球温带草地与热带森林的面积几乎相当, 但无论在全球尺度, 还是在区域尺度, 人们对其在全球循环中的作用却了解得甚为不够^[1~3].

中国境内的内蒙古草原是欧亚大草原的一部分, 属典型半干旱温带草原, 与北美和欧洲的草原相比, 它在生产力, 土壤特性以及气候条件等方面均有着明显的差异^[4]. 但目前只有个别零散的研究工作涉及到这一生态系统的 CO_2 收支行为, 从而使得对中国温带草地土壤呼吸特征的定量估计有较大的不确定性^[5~7]. 可见, 对这一自然生态系统的 CO_2 收支进行较长时间的实验研究, 估计它在区域和全球碳循环中的作用有着重要意义. 不仅如此, 近10多年来, 由于人类活动直接影响到这一自然生态系统的生物量和土壤特性, 进而使草地的 CO_2 收支发生变化. 为此, 在1998~2000年间, 先后在内蒙古草原对典型草原的草地-大气间的 CO_2 交换通量, 土壤呼吸和碳同化等进行了实验研究. 本文重点介绍对典型草地土壤呼吸的实验研究, 简要介绍了研究方法, 给出并讨论温带草地土壤呼吸的初步研究结果.

1 研究方法

1.1 实验场地选择

作为半干旱温带草原, 由于地理位置和气候条

件的差异, 内蒙古草原实际上涵盖了草甸草原、典型草原、干旱草原和沙地草原等多种类型. 本实验重点以典型草原为实验对象. 实验区以栗钙土和暗栗钙土为主, 以羊草和大针茅为优势群落. 表1给出了典型草原土壤的某些物理、化学特性^[8].

典型草地以钙质土壤为主, 表层的pH值略低, 羊草草地中的各类养分略高于大针茅草地. 不仅如此, 已有研究表明, 羊草草原的地上和地下生物量均高于大针茅草地的相应值. 研究还表明, 中国内蒙古温带典型草地的一个重要特征是地下生物量平均约为地上生物量的5~10倍, 这会对土壤呼吸产生重要影响. 不仅如此, 人类活动(主要是开垦和过牧)会对草地土壤的物化性质产生重要影响, 例如, 过牧不仅会改变土壤的养分, 而且会导致土壤表面硬度增加, 并使土壤含水量减少. 本实验场地选择在内蒙古锡林河流域温带典型草原的优势群落中, 实验场地的具体位置由图1给出.

1.2 实验方法

草地土壤呼吸测量中所采用的方法, 主要包括现场采样和对样品的实验室分析, 静态箱法是现场采样所使用的主要方法^[9]. 采样箱由耐热有机玻璃制成, 其几何尺寸为65cm(长)×65cm(宽)×25cm(高). 采样箱的基座由不锈钢制成并配有弹性胶垫以防漏气. 为获得典型草原土壤和植被的呼吸特征, 本实验设计了两种采样箱(即明箱和暗箱), 并在具体测量中采用了3种操作方式, 即暗箱有草(DCG)、明箱有草(TCG)和明箱无草(TCMG). 明箱即为用有机玻璃制成的透光采样箱, 暗箱是对明箱进行特殊遮光处理, 使其箱内不再有光照. 这样, DCG和TCG获得的分

表 1 典型草原土壤的某些物理化学特征

草地类型	土壤深度/cm	有机质/%	含氮/%	含磷/%	速效钾 /μL · L ⁻¹	pH	土壤含水量	
							深度/cm	比例/%
羊 草	0~10	3.360	0.206	0.080	292	6.6	0~13	51.10
	10~30	1.790	0.101	0.051	155	6.7	13~41	43.48
	30~70	1.440	0.085	0.048	140	7.0	41~82	42.54
大针茅	0~10	1.996	0.130	0.070	129	7.8	0~15	45.55
	10~30	0.469	0.030	0.064	125	8.0	94~120	30.61
	30~70	0.243	0.016	0.058	138	8.1	—	—

别为无光合和有光合情况下土壤和草地植被的呼吸，而 TCMG 获得的则是有光照但无光合情况下的土壤呼吸。

的土壤CO₂排放通量*F*由下式计算得到(mg · m⁻² · h⁻¹):

$$F = \frac{\Delta c}{\Delta t} \cdot \rho \frac{V}{A} = h \cdot \rho \frac{\Delta c}{\Delta t},$$

式中， $\frac{\Delta c}{\Delta t}$ 为时间段Δ*t*期间CO₂浓度的变化量(Δ*c*)， ρ 是采样箱内的样气密度，*V*、*A*和*h*分别为采样箱的体积，底面积和高度。用上式获得土壤CO₂排放通量的基本条件是：认为单位时间内采样箱内CO₂浓度的增加是一个常数，即箱内CO₂浓度成线性增加。

箱法是测量土壤呼吸的通用方法，但应当指出，用上述方法获得的土壤呼吸实际上是包括土壤有机物、根系和表层凋落物等的总呼吸，即土壤CO₂排放通量或排放速率。但对于草地-大气相互作用研究而言，可将用上述方法测量得到的土壤总呼吸视为真正的土壤呼吸。

1.3 样品的采集

利用所描述的实验方法在选择的典型草原样地进行了采样，考虑到 7~8 月份是内蒙古典型草原群落的生长旺季，其生物量达到一年的高值[10]，因此样品的采集每年都选择在 7~8 月间进行，以便获得内蒙古典型草原群落生长旺季的代表性土壤呼吸结果，并使不同年份获得的资料具有可比性。与此同时，样品采集主要在羊草群落进行。根据已有的一些研究结果，羊草群落在本地区具有相对较高的生物量(包括植物总生物量和微生物总生物量)和土壤有机质含量等[10、11]，同时，在内蒙古草原，羊草具有广幅的地带性分布且能反映出旱中生生境的特点，因此，所获土壤呼吸结果将代表内蒙古典型草原分布较广的优势群落的土壤呼吸特征。表 2 给出了 1998~2000 年 7~8 月间的箱法采样时段、总样品数以及采样期间箱内温度的变化范围，其中土壤温度为 10 cm 深度处的土壤温度。

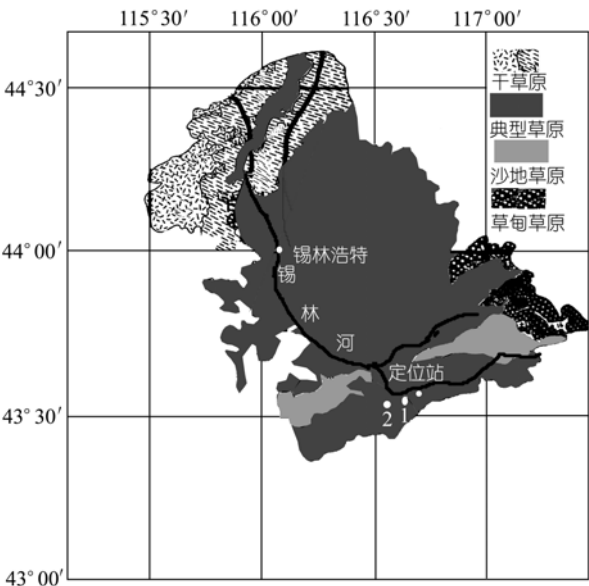


图 1 锡林河流域典型草原分布及实验场位置
1. 单草实验地; 2. 大针茅实验地

这样，根据实验资料便可以较容易地将土壤呼吸和草地植被呼吸区分开来。对于每一种操作方式，每次采样均采用平行采样法，即每次使用两个完全一致的采样箱同时采样。所有样品均在实验室通过气相色谱仪(GC/FID)进行分析而获得相应的CO₂浓度值，具体方法的描述见文献[9]。通常，箱法在使用过程中会对被测环境造成一定的影响，为使这种影响降到最低程度，本实验中，每年的第 1 次采样均采用预埋基座的做法，即至少提前 24 h 将采样箱基座埋入样地中。同时每次采样均在开始时采集“零时间样品”(即采样计时开始时的样品)作为基准样品，并以此样品为基础计算采样时间段Δ*t*期间箱内CO₂浓度的变化。

根据每个样品的室内分析结果，表征土壤呼吸

表2 箱法采样时段、样品数及箱内温度变化

年份	观测时段/月-日	样品数	温度变化范围()		
			土壤温度	地表温度	空气温度
1998	07-22~08-19	696	16.8~26.6	17.1~32.5	13.6~36.4
1999	08-15~08-22	660	13.1~24.2	11.5~28.8	7.4~31.9
2000	08-25~09-02	216	14.8~21.1	13.9~24.4	12.8~32.4

表3 草地呼吸 R 和土壤呼吸 R_s ($\text{mgCO}_2/\text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1}$)

呼吸	夜间			白天		
	1998	1999	2000	1998	1999	2000
R	800 ± 75	221 ± 36	327 ± 59	924 ± 171	425 ± 111	428 ± 124
R_s	656 ± 62	195 ± 30	270 ± 41	680 ± 153	331 ± 82	297 ± 94
R_s/R	0.82	0.88	0.83	0.74	0.78	0.69

2 结果和讨论

2.1 土壤呼吸

土壤的呼吸是草地生态系统向大气释放 CO_2 的主要路径, 一般而言, 土壤呼吸由土壤中产生 CO_2 的所有代谢过程决定, 这些过程包括土壤微生物呼吸, 根系呼吸和土壤动物呼吸等生物过程以及含碳矿物质化学氧化的非生物过程^[2,3,12]。可见, 土壤向大气释放 CO_2 的量及其变化会受到多种因素的影响, 这些因素主要包括土壤中 CO_2 的产生率、土壤气孔的大小、“土壤-植被-大气”系统中的 CO_2 浓度梯度以及包括温度、湿度和风等因子在内的环境条件, 因此, 不难理解, 不同草地土壤类型的土壤呼吸会有较大的变化范围。一些研究结果表明, 温带草原土壤呼吸的变化范围约为 $132 \sim 830 \text{ gC}/\text{m}^2 \cdot \text{a}^{-1}$, 并且具有较大的不确定性^[2,13]。

利用前节描述的方法, 曾于1998~2000年间在内蒙古草原, 对典型草原土壤呼吸进行了测量, 测量工作包括生长旺季和非生长季节(冬季)。由测量的操作方式可知, 包括土壤有机物、根系呼吸和凋落物呼吸在内的土壤呼吸可以根据TCMG测量资料获得, 而白天和夜间的DCG测量资料以及夜间的TCG测量资料可用来获得草地呼吸(即包括土壤总呼吸和地上植被的呼吸)。根据1998~2000年典型草原生长季节观测资料计算得到的草地呼吸 R 和草地土壤呼吸 R_s 由表3给出。

表3中的结果显示, 平均而言, 内蒙古草原的温带典型草地呼吸在生长季节变化范围分别为 $221 \sim 800 \text{ mgCO}_2/\text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1}$ (夜间)和 $425 \sim 924 \text{ mgCO}_2/\text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1}$ (白天), 其中草地土壤呼吸在草地呼吸中的贡献在夜

间和白天分别为 $82\% \sim 88\%$ 和 $70\% \sim 78\%$ 。这表明, 无论在白天或是夜间, 土壤呼吸都是草原生态系统向大气释放 CO_2 的主要贡献者。根据草原生长季节和非生长季节观测到的资料, 最后计算得到了温带半干旱典型草原土壤呼吸量在干旱年份平均为 $390 \text{ gC}/\text{m}^2 \cdot \text{a}^{-1}$, 略低于在北美和欧洲的相应结果($442 \text{ gC}/\text{m}^2 \cdot \text{a}^{-1}$)^[2]。但在丰水的1998年, 这个值却达到了 $866 \text{ gC}/\text{m}^2 \cdot \text{a}^{-1}$ 。

2.2 草地植被呼吸

对某一草地群落而言, 草地植被的碳同化是碳输入的最主要途径, 与此同时, 地上草地植被不分昼夜地进行呼吸, 向大气释放 CO_2 。内蒙古温带半干旱草原地上和地下生物量的分布与北美和欧洲大草原有着很大的差别。因此, 在研究土壤呼吸的同时, 估计内蒙古温带草原地上植被的呼吸有着重要价值。一般来讲, 草地的地上植被呼吸主要依赖于地上生物量和相关的气象条件。本实验结果表明, 对于内蒙古温带典型草原而言, 地上植被在生长季节的平均呼吸量的变化范围分别为 $26 \sim 58 \text{ mgCO}_2/\text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1}$ (夜间)和 $95 \sim 130 \text{ mgCO}_2/\text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1}$ (白天), 约分别占相应草地呼吸的 15% (夜间)和 25% (白天)。可见白、昼期间, 由于气象条件的影响地上植被呼吸对整个草地群落呼吸的贡献明显大于夜间。

2.3 土壤呼吸的变化

由于几乎所有决定土壤呼吸的过程都对环境因子有很强的依赖关系, 因此无论土壤呼吸还是草地呼吸均表现出明显的日变化, 季节变化和年际变化。作为实例, 图1同时给出了内蒙古温带典型草原生长旺季(7~8月)连续3年得到的土壤呼吸(R_s)均值的日变化。可以发现, 其日变化特征是明显的, 即最大值

出现在 14:00 前后, 低值出现在夜间, 但变化幅度却表现出明显的年际差别. 进一步分析表明, 就平均而言, 与干旱年份(1999 和 2000 年年降水量平均为 310 mm, 属典型干旱年份)相比, 丰水年的 1998 年(年降水量为 580 mm)温带典型草地土壤呼吸增加了 2 倍之多.

对 3 年来所有关于典型草地土壤呼吸测量结果的分析显示, 草地土壤呼吸随着草地植被的生长和气象条件的变化也表现出明显的变化. 表 4 给出 1998 年典型草原(羊草草原)土壤总呼吸的逐月值所占生长季节(5~9 月)总和的百分比^[5].

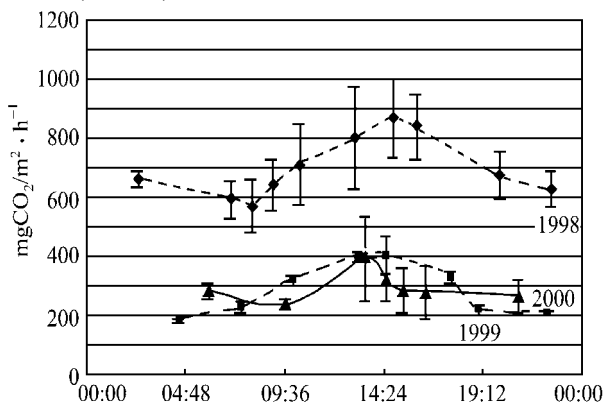


图 2 内蒙古半干旱典型草原土壤呼吸均值的日变化 (1998~2000 年, 7~8 月)

由表 4 可以发现草地土壤呼吸变化的两个重要事实, 其一是随着气象条件的变化(主要是温度升高和降雨量增加)和草地植被生物量的增加, 温带典型草原土壤呼吸量有着明显的变化; 其二是在内蒙古温带草原土壤呼吸量的最大值出现在 7 月, 尽管在该地区草地植被地上生物量的最大值一般出现在 8 月, 地下生物量的最大值也出现在 8~9 月, 这说明控制土壤呼吸的主要因子是温度和降水(在这一地区月均温和月均降水量的最大值均出现在每年的 7 月).

表 4 生长季节土壤呼吸逐月贡献率(1998-05-09)

月份	5	6	7	8	9	5~9
贡献率 /%	17.88	19.69	29.57	16.19	16.67	100

2.4 温度对土壤呼吸的影响

在所有控制土壤呼吸的因子中, 温度被认为是最重要的, 因为正是温度直接影响着土壤中的所有生物过程. 关于温度与土壤呼吸之间的关系已有很多研究^[2,3], 但由于所研究的植被种类, 土壤类型等

差异, 因此给出的结果之间有很大差异. 本研究中的有关结果将另文专门讨论. 一些研究者曾先后提出了二者之间的对数、线性和多次函数等关系. 为探讨温带半干旱草原土壤呼吸对温度的依赖关系, 在实验中, 对采样箱内的空气温度(t_a), 地表温度(t_s)和 10 cm 深处的土壤温度(t_{10})进行了同时测量, 并根据这些结果得到了土壤呼吸(R_s)和 3 种温度之间的线性(Lin)和对数(Ln)依赖程度(见表 5).

表 5 给出的结果是根据多次测量的平均资料计算得到的. 表 5 显示出的一个重要结果是在丰水的 1998 年, R_s 与土壤 10 cm 深处的土壤温度有很好的相关性, 而在干旱的 1999 和 2000 年, 这种相关性却变得非常之弱, 与此同时土壤呼吸与空气温度之间的相关性却显著增大. 由此可见, 对于半干旱温带草地而言, 土壤含水量在土壤呼吸与温度之间的相关性方面有着重要的制约作用. 对这一事实需要做进一步的室内外研究并应当引起相应模式研究者的注意.

表 5 R_s 和 t 之间的相关系数(R^2)

	1998		1999		2000	
	Lin	Ln	Lin	Ln	Lin	Ln
t_a	0.59	0.57	0.84	0.87	0.69	0.74
t_s	0.64	0.62	0.78	0.83	0.53	0.55
t_{10}	0.74	0.72	0.33	0.36	0.14	0.14

3 结论

() 1998~2000 年间, 利用箱法和气相色谱技术对中国内蒙古地区温带半干旱草原的土壤呼吸进行了较系统的实验研究, 获得了温带典型草原土壤呼吸、植被呼吸及其变化等有关草地 CO_2 收支的较系统资料.

() 中国温带半干旱典型草原生长季节的土壤呼吸速率变化范围为: $195 \sim 680 \text{ mgCO}_2/\text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1}$, 这相当于整个生长季节(5 ~ 9 月)的土壤总呼吸量为 $326 \sim 811 \text{ gC}/\text{m}^2$. 全年的土壤总呼吸变化范围为 $390 \sim 866 \text{ gC}/\text{m}^2 \cdot \text{a}^{-1}$.

() 温带半干旱草原土壤呼吸有明显的季节变化和较大的年际变化, 其最大值出现在 7 月份, 平均约占生长季节总呼吸量的 30%. 干旱年份(1999 和 2000 年)土壤呼吸平均约为 $390 \text{ gC}/\text{m}^2 \cdot \text{a}^{-1}$, 而丰水的 1998 年, 土壤呼吸平均值达到了 $866 \text{ gC}/\text{m}^2 \cdot \text{a}^{-1}$.

() 草地土壤呼吸平均占草地系统总呼吸的 70%~88%, 是整个草地群落向大气释放 CO_2 的主要贡

献者.

致谢 感谢中国科学院内蒙古草原生态系统定位研究站对本工作的大力支持. 本工作受国家重大自然科学基金项目(批准号: 49790025)和自然科学基金项目(批准号: 40075028 和 40005009)资助.

参 考 文 献

- 1 Prentice I C. The carbon cycle and atmospheric carbon dioxide, In: Houghton J H, Ding Y, Griggs D J, et al. eds. IPCC, Climate Change 2001: The Scientific Basis (Chapter 3). Cambridge: Cambridge Univ Press, 2001. 183~237
- 2 Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus*, 1992, 44B(2): 81~99
- 3 Raich J W, Potter C S. Global patterns of carbon dioxide emissions from soils. *Global Biogeochemical Cycles*, 1995, 9(1): 23~36[DOI]
- 4 姜 恕. 草原生态系统试验地的设置及其植被背景. 见: 中国科学院内蒙古草原生态系统定位站编. 草原生态系统研究, 第三集. 北京: 科学出版社, 1988. 1~12
- 5 崔晓勇, 王艳芬, 杜占池. 内蒙古典型草原主要植物群落土壤呼吸的初步研究. *草地学报*, 1999, 7(3): 245~250
- 6 李凌浩, 陈佐忠. 草地群落的土壤呼吸. *生态学杂志*, 1997, 17(4): 45~51
- 7 董云社, 章 申, 齐玉春, 等. 内蒙古典型草地 CO_2 , N_2O , CH_4 通量的同时观测及其日变化. *科学通报*, 2000, 45(3): 318~322 [PDF]
- 8 汪久文, 蔡蔚祺. 锡林河流域土壤的发生类型及其性质的研究. 见: 中国科学院内蒙古草原生态系统定位站编. 草原生态系统研究, 第三集. 北京: 科学出版社, 1988. 23~83
- 9 杜 睿, 王庚辰, 吕达仁, 等. 箱法在草地温室气体通量野外实验观测中的应用研究. *大气科学*, 2001, 25(1): 61~70
- 10 姜 恕, 戚秋慧, 孔德珍. 羊草草原群落和大针茅草原群落生物量的初步比较研究. 见: 中国科学院内蒙古草原生态系统定位站编. 草原生态系统研究, 第一集. 北京: 科学出版社, 1985. 12~23
- 11 廖仰南, 张桂枝. 内蒙古草原土壤微生物生态学研究. 见: 中国科学院内蒙古草原生态系统定位站编. 草原生态系统研究, 第一集. 北京: 科学出版社, 1985. 181~194
- 12 刘绍辉, 方精云. 土壤呼吸的影响因素及全球尺度下的温度影响. *生态学报*, 17(5): 469~476
- 13 郭继勋, 张宏一. 羊草草地土壤呼吸与枯枝落叶分解. *中国草地*, 1991, (5): 39~41

(2003-09-08 收稿, 2003-12-18 收修改稿)