

天然温带草地 CO₂ 通量排放规律研究*

杜睿 吕达仁 王庚辰

中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

摘要 以天然状态下(无牧、无施肥、无割草、无灌溉)内蒙古温带半干旱典型草原羊草草原为主要研究对象, 利用静态箱法和气相色谱法进行草地田间 CO₂ 通量的原位观测实验. 采用 SPSS 统计分析软件, 研究分析了 1998 年 5 月至 1999 年 5 月, 2001 年至 2003 年, 共 4 个实验观测年 CO₂ 通量的观测数据与主要的环境因子(土壤含水量、降雨量、空气温度、地表温度、不同土层温度)间的相关性. 结果表明: 温带草地土壤 CO₂ 排放通量具有明显的日变化特征, 不同的生长状态对于其日变化特征具有明显的影响; 主要的环境因子中只有表层土壤含水量与草地 CO₂ 排放通量的日变化具有显著的正相关性; 草地 CO₂ 排放通量的季节变化显著而且不同的年份其变化特征也各不相同; 降雨量的季节分布与其季节通量的变化特征间具有极显著的正相关性; 4 年的实验观测的统计分析表明: 表层土壤含水量是温带半干旱草地 CO₂ 排放通量主要控制因子. CO₂ 排放通量的年际变化不显著, 以 4 年观测的平均年通量估算我国温带草地 CO₂ 年排放量是 3.17 Pg, 约占全球土壤 CO₂ 年排放量的 1.23%, 对于全球碳循环有着重要影响.

关键词 天然温带草地 CO₂ 排放通量 日变化 季节变化 年际变化

进入 21 世纪, 碳循环研究再次成为全球变化研究的焦点. 科学界普遍关注的是全球碳循环中主要的碳库在地理空间与时间上的分布以及碳通量的空间和时间尺度上的变化如何. 当前的气候变化研究多集中于对大气中温室气体尤其是 CO₂ 的研究. CO₂ 的排放量等实际问题(如京都议定书)已引起国际上较大的争议, 这需要从许多方面去解决.

现在大气中 CO₂ 的浓度(体积比)比地球间冰期的最大值还要高出 10⁻⁴, CO₂ 浓度的增长速率至少是过去 0.42 Ma 来的 10 倍, 甚至可能达 100 倍. 在热带地区由于土地利用方式的变化引起 CO₂ 的大量排放, 但在北半球中纬度地区, 由于土地管理方式的变化而产生大量的碳库. 在碳交换的过程中, 陆地生态系统比海洋与大气间的交换量则占据了更主要的地位^[1]. 草原生态系统作为主要的陆地生态系统, 在全球碳循环研究中具有着重要的研究意义.

全球草地面积约为 3.3 × 10⁹ hm², 占陆地面积的 25%^[2]. 我国草地面积约有 4 × 10⁸ hm², 占世界草地面积的 12.5%, 占国土面积的 41.7%, 超过我国农田面积的 3 倍^[3]. 温带半干旱草原是北半球陆地生态系统的重要组成部分, 我国温带草原占草地总面积的 78%, 是我国草地的主体^[4]. 内蒙古温带半干旱草原是国际地圈-生物圈计划(IGBP)陆地样带(NECT)的重要的组成部分. 内蒙古草原是极具代表性的温带草原, 也是目前保存较为完好的天然草原之一. 在大气与陆地生态系统的碳交换过程中, 土壤具有重要的作用, 它不仅是重要的碳库, 而且是碳转化的重要场所, 土壤条件的改变将直接造成大气中 CO₂ 的变化. 所以了解草地土壤 CO₂ 的通量变化, 对于全球碳循环研究具有重要的科学价值和意义. 但目前对该区域只有一些零散的研究工作涉及到草地生态系统的 CO₂ 收支行为, 从而使

2005-03-02 收稿, 2005-05-09 收修稿稿

* 国家自然科学基金(批准号: 40005009, 4979020)、中国科学院野外台站基金和大气物理研究所创新基金(7-053706, 8-3305)资助项目
E-mail: ruidu@mail.iap.ac.cn

得对中国温带草地土壤 CO₂ 通量的定量估计有较大的不确定性^[5-8]。本研究作为国家自然科学基金重大项目 IMGRASS 的一部分和后续工作,在 1998—2003 年间,先后在内蒙古草原对典型草原羊草草原土壤-大气间的 CO₂ 交换通量进行了连续多年的原位观测,本文主要给出草地 CO₂ 通量不同时间尺度的变化特征。

1 研究方法

1.1 采样地点

采样地点位于锡林河中游地区,海拔 1100—1300 m,地形特征为低丘、台地、塔拉,雨量较少,年降雨量在 350—450 mm 左右,属半干旱大陆

性季风气候。地带性土壤类型是暗栗钙土壤,植被类型以中旱生或旱生杂类草,其中旱生丛生禾草占绝对优势,形成了温带典型草原。在该区 1980 年中国科学院内蒙古草原生态系统定位研究站(定位站)建立了面积为 400 m×600 m 的羊草草原围栏永久性实验样地(简称羊草样地)^[9]。其地理坐标为 43°32′45″—43°33′10″N, 116°40′30″—116°40′50″E,是全球变化研究中的中国东北样带(NECT)穿过的中心区域。组成羊草群落的植物约有 86 种,分属于 28 科,67 属。其中常见的种类约有 45 种,广旱生根茎禾草占优势,其次为大针茅、潜草、冰草等旱生密丛生禾草。草群高度 50—60 cm,盖度 30%—40%,多雨年份可达 60%—70%,地表有薄层凋落物覆盖。样地的土壤理化特性见表 1。

表 1 实验点表层暗栗钙土壤理化特性

土壤质地	有机碳 /%	全 N /%	C/N	pH (H ₂ O)	机械组成(粒径:mm)/%		
					2—0.05	0.05—0.002	<0.002
砂壤质	1.85	0.188	9.84	6.92	62.3	23.6	14.1

1.2 采样方法

利用静态箱法^[10]自 1998 年 5 月 10 日至 1999 年 5 月 10 日,在草原植物生长期,以平均每周 1 次,生长旺盛期则加密 4 天 1 次的观测频率进行观测,进入冬季后则以每月 1 次的观测频率对草原土壤-植物系统进行观测;自 2001 至 2003 年连续 3 年,以草原土壤为研究对象坚持野外观测,在 4 月至 11 月期间其观测频率平均 10 天 1 次,12 月份至来年 2 月份,每月 1 次;3 月份,2 周 1 次。自 1998 至 2003 年间总共有 4 个完整的不同年际的实验观测资料(1998, 2001, 2002, 2003 年)。在 1998 年的 4 个不同的草原生长物候期(抽穗前期、开花期、结实期、立枯期)连续 24 h^[9]进行实验观测土壤 CO₂ 通量的日变化情况。

由于 1998 年的实验观测,是针对土壤-植被-大气系统的,采样箱内未进行割草处理,而经过 1999, 2000 年连续对箱法测量草原土壤-植被-大气系统 CO₂ 通量的准确性^[11]以及土壤呼吸^[10]的实验观测研究后发现:密闭透光明箱对于草地土壤-植被系统 CO₂ 通量的观测结果偏离误差较大,基本不适宜测量土壤-植被系统 CO₂ 的通量,详见文献

[11],因此,自 2001 到 2003 年的田间通量的观测所采用的处理方法较以前有所差别,每次采样前至少提前 12 h,将基座内的所有植物齐地表剪去,同时根据实验结果^[11]“不透明箱体内温度变化较透明箱体内缓慢”,2001 年尽管使用的仍是透明的方箱,提前将箱体用不透光的锡箔纸完全包被,使之成为暗箱;2002 至 2003 年则使用不透明材料改进的采样箱^[12]。本研究所采用 1998 年的数据是观测结果的修正值,修正方法详见文献 [11]。

在采集气体样品的同时进行环境因子(空气温度、地表温度、地下温度、土壤含水量)的检测和记录(温度由测温探头和便携式数字温度计测量,烘干法测土壤含水量)。其中表层土壤 0—20 cm 的土壤含水量同步检测进行了 2 个实验观测年即(1998 和 2001 年),地下温度由于进入冬季后地面封冻,一般只在生长季节(5 至 9 月)进行检测。

1.3 气体样品分析与通量的计算

所采集的气体样品用气相色谱仪 Hp5890 进行分析^[13],通量公式是:

$$f = \frac{\Delta m}{A \Delta t} = \frac{\rho V \Delta C}{A \Delta t} = \rho h \frac{\Delta C}{\Delta t}$$

ρ 为试验时温度下的气体密度, Δm 和 ΔC 分别是 Δt 时间内的采集箱中变化的气体质量和混合比, h , A , V 分别为箱高、底面积和体积. 气体通量 f 为负值时表示土壤从大气中吸收该气体, 正值时表示土壤向大气排放该气体. CO_2 通量的单位以 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 来表示.

年通量公式是

$$F = \frac{(X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_n)}{(D_f - D_0)} \times 365,$$

$$X_n = \frac{f_n + f_{n-1}}{2} \times (D_n - D_{n-1}),$$

其中 X_n 是两个相邻观测日间的观测期的阶段通量, f_n 既是某一观测期的结束日同时也是下一观测期的

起始日的通量值, f_{n-1} 则是前一观测期的结束日同时也是当前观测期的起始日的通量值, f_0 是整个实验观测开始第一天的通量值, 同样 D_n 是某一观测实验期的最后一天同时也是下一观测期的第一天, D_{n-1} 则是前一观测期的最后一天, D_0 是整个实验观测第一天, D_t 是观测期的最后一天.

利用SPSS统计分析软件进行通量与环境调控因子的相关性、方差和回归分析.

1.4 草原季节的划分

本研究根据温带草原植物的生长物候期的特征, 将温带草原的四季按照: 春季5, 6月份(儒略历121—180), 夏季7, 8月份(181—240), 秋季9月份(241—270), 冬季10月至12月及次年1月至4月(271—365, 1—120)进行划分. 以下的结果讨论中所涉及的四季均采用此法划分.

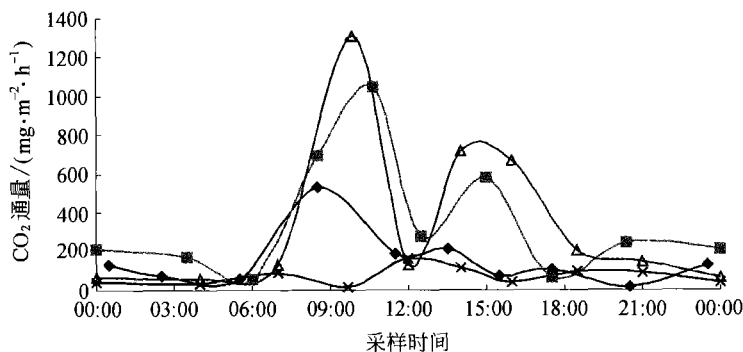


图1 天然温带草原土壤 CO_2 通量日变化

—◆— 抽穗前期 —■— 开花期 —▲— 结实期 —×— 立枯期

2 结果与讨论

2.1 日变化

土壤 CO_2 的产生过程主要由植物根系、土壤微生物、土壤动物等共同参与组成的土壤呼吸作用产生, 另外非生物过程的土壤有机质的化学氧化分解过程也产生少量的 CO_2 . 图1是在1998年4个不同的草原植物生长物候期(抽穗前期、开花期、结实期、立枯期)的该季节具代表性的晴朗天气下所观测得的土壤 CO_2 排放通量的日变化. 图中显示: 草原植物生长旺盛期(开花期与结实期)土壤 CO_2 排放通量的日变化具有明显的双峰型, 在草原植物生长

末期(立枯期)则是多峰型, 而相对草原植物生长初期的抽穗前期, 草地 CO_2 排放通量的日变化情况介于两者之间. 但相同的是, 白天的排放通量普遍较高, 草原植物生长初期和旺盛期的峰值均出现在9点至11点间, 生长末期的峰值则出现在正午时段. 这与张金霞^[14]等所观测的高寒嵩草草甸覆被下的草毡寒冻锥形土 CO_2 释放速率的日变化进程最大值出现在下午14点至16点间, 最小值出现在早晨6点至8点间有所不同, 这可能是由于所研究的土壤的地带性差别以及植被类型、土壤微生物菌群类型和数量以及气候环境等差异所引起的, 另外也可能与1998年观测时地上植物未被修剪, 校正时考虑植物

的光合作用吸收 CO_2 的日进程的特征有关^[11].

表2 CO_2 通量的日变化统计参数特征

	平均通量 $/(\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1})$	排放量 $/(\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1})$	方差	标准 偏差	变异 系数
抽穗前期	154	3697	21457	146	0.96
开花期	330	7925	101430	318	0.90
结实期	334	8024	173731	417	1.19
立枯期	73	1747	2124	46	0.62

将主要环境因子与 CO_2 排放通量通过 SPSS 软件进行相关性分析发现:若考虑草地植物生长状态则 CO_2 排放通量(f)日变化与土壤含水量(X_w)、地表温度(X_s)、地下 15 cm 处土壤温度(X_d)的线性相关分析结果均不显著,这 3 种主要的环境因子与 CO_2 排放通量间,不存在线性相关(见表 3). 方差分析显示草地植物的不同生长阶段对于草地土壤 CO_2 的排放

通量具有显著的影响($F=3.854$, $p=0.032<0.05$). 生长旺盛期(开花期、结实期)土壤 CO_2 日排放通量分别达 7.9 和 $8.0 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, 而抽穗前期和立枯期降低了大约 50% 和 80%, 分别是 3.7 和 $1.7 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$. 从表 3 的统计分析表明:不同的生长期,草地 CO_2 通量与主要的环境因子(土壤含水量、土壤温度、地表温度)间不存在显著的线性相关性,而且差异很大. 如果不考虑草地不同的生长物候期的影响,对 CO_2 排放通量(f)日变化与以上 3 个主要环境控制因子进行偏相关分析发现,草地 CO_2 排放通量(f)与土壤含水量(X_w)间具有正相关,相关系数 $r=0.342$, $p=0.041<0.05$, 具有显著水平,而地表温度和地下 15 cm 处温度对 CO_2 排放通量的线性影响远低于土壤含水量(表 3).

表3 不同生长阶段 CO_2 排放通量与主要环境因子的相关性分析

	土壤含水量			地下 15 cm 温度			地表温度		
	r	p	n	r	p	n	r	p	n
抽穗前期	-0.409	0.420	6	-0.060	0.868	10	0.358	0.309	10
开花期	0.332	0.349	10	0.275	0.442	10	0.532	0.114	10
结实期	-0.113	0.757	10	0.456	0.185	10	0.501	0.140	10
立枯期	0.299	0.402	10	0.232	0.520	10	0.379	0.281	10
生长期 ^{a)}	0.342 ^{b)}	0.041	36	0.207	0.200	40	0.291	0.069	40

a) 生长期是不考虑草地植物不同生长阶段,将 4 次观测结果统一进行的统计分析,b) 相关性显著水平是 0.05

这也表明在温带半干旱天然草地,土壤含水量成为草地 CO_2 排放通量的主要控制因子,同时地表温度和地下 15 cm 处温度对草地 CO_2 排放通量的作用关系表现为非线性. 同期崔骁勇等^[5]研究也发现羊草群落土壤水分不仅对土壤呼吸的季节变化有一定的影响,而且不同的季节有明显差异,对根系生长和土壤微生物活动产生显著影响,对草地土壤呼吸具有密切的影响. 由于草地 CO_2 主要来源是土壤呼吸作用,但因受限土壤排放过程的复杂作用使其又不等同于土壤呼吸,但两个高 CO_2 排放通量日均处于当地降水最充沛的月份(7, 8 月份). 对土壤水分与 CO_2 排放通量进行单因子方差分析结果也表明土壤含水量对草地 CO_2 排放通量影响显著($F=4.507$, $p=0.041<0.05$, $n=35$), 多因子逐步回归分析方程显示: $Y_{\text{flux}} = 20.11X_w - 54.7$ ($r=0.342$, $p=0.041<0.05$).

2.2 季节变化

温带天然草地 CO_2 通量的最小值均出现在冬季,但其最大值未必均出现在夏季,如 2002 年最大值则出现在春季(160 天附近),其他 3 个实验观测年 CO_2 排放通量的最大值都出现在夏季(200 天左右)(图 2). 4 个实验年的季节通量也各不相同(图 3). 1998 CO_2 季节通量变化表现:夏季最高,春季次之,秋季较冬季略低,与降雨量的季节分布趋势相一致;2001 年则是随着春、夏、秋、冬四季的顺序递减;2002 年按照夏、春、秋、冬的顺序递减,两年间的季节通量的变化趋势与降雨量的季节分布趋势不完全一致;而 2003 年 CO_2 季节通量变化与降雨量的季节分布趋势一致,夏季最高,秋季次之,冬季最低. 将 4 年的 CO_2 季节通量与季节降雨量进行数理统计分析结果表明:两者间具有非常显著的线性正相关(其中 $r=$

0.707, $p=0.002<0.01$).

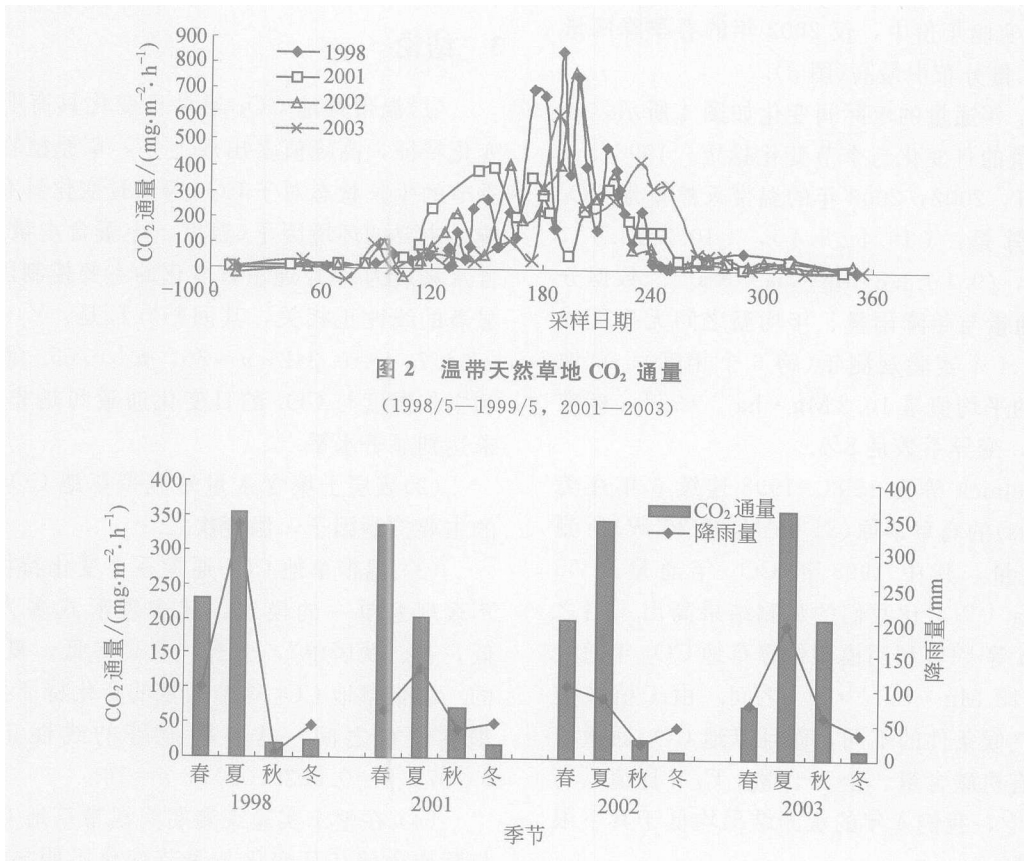


图2 温带天然草地 CO₂ 通量
(1998/5—1999/5, 2001—2003)

图3 温带天然草地 CO₂ 通量季节变化

已有的研究表明^[15]: 由于土壤呼吸主要是根系呼吸和土壤微生物作用下的土壤有机质的分解过程, 因此其与植物群落的生长状况及气候、土壤环境条件密切相关. 草地 CO₂ 排放通量主要来源是草地土壤呼吸作用, 其反映了土壤呼吸的作用规律, 但又不完全等同于草地的土壤呼吸作用. 土壤质地、结构和透气性对于草地 CO₂ 排放通量有着重要的影响. 土壤水分对于土壤过程的作用效果通过它对土壤透气性和微生物活性的影响而反映出来. 在旱地土壤中, 土壤水分及结构是影响气体扩散的重要因子, 结构紧密及高含水量会限制气体的传输. 将4年的 CO₂ 通量值与主要的环境因子进行相关性分析, 其相关系数见表4, 土壤含水量对于草地 CO₂ 排放通量有着显著的线性正相关, 在半干旱的天然草场中, 由于降水是土壤水分的主要来源, 其季节通量与降雨量具有显著的线性正相关的作用关系与此结论相印证.

表4 草地 CO₂ 通量与环境因子的相关性

	土壤含水量 /单位	日均气温 /单位	土温/单位			
			0 cm	5 cm	10 cm	20 cm
相关系数 ^{a)}	0.442	0.526	0.506	0.334	0.322	0.316
<i>p</i>	0.000	0.000	0.000	0.005	0.007	0.008
<i>n</i>	64	110	110	70	70	70

a) 相关性显著水平为 0.01, 两变量间为强正相关

利用逐步回归法进行回归分析发现, 在统计的调控因子中, 土壤含水量是草地 CO₂ 排放通量的主要控制因子, 温度次之. 而所测不同类型的温度中, 日均气温对于草地 CO₂ 排放通量的影响最显著.

4年的观测研究表明: 草地 CO₂ 通量的季节变化规律模式并不局限于“夏高冬低, 春秋居中”的固定模式. 尽管最大峰值大多出现在夏季(该地区70%—80%的年降雨量集中在7, 8月份)但有时也

出现在春季(2002年),这与降雨量的分布有着直接的关系,4个实验年份中,仅2002年的春季降雨量在当年的降水量分布中最高(图3)。

草地 CO₂ 年通量的年际间变化如图4所示,较草地 CO₂ 通量的日变化与季节变化稳定。1998/5—1999/5, 2001, 2002, 2003年的温带天然草地 CO₂ 年通量分别是: (10.4±8.4), (10.2±3.5), (11.0±2.0), (9.1±3.8) Mg·ha⁻¹·a⁻¹。数据分析表明:年通量与年降雨量、年均温之间无显著线性相关关系。4个实验观测年(跨6个年度),草地 CO₂ 年通量的平均值是 10.2 Mg·ha⁻¹·a⁻¹, 标准偏差是 0.08, 变异系数是 8%。

同期 Mielenick 等自 1993—1998 连续 6 年在美国德州(Texas)的高草草原(31°06'N, 97°20'W)所测草地 CO₂ 通量,其中 1998 年 CO₂ 年通量是 55 Mg·ha⁻¹·a⁻¹[16], 比我们的观测结果高出 4 倍之多。而 Raich 等[17]曾利用模型估算草地 CO₂ 年通量大约在 14~18 Mg·ha⁻¹·a⁻¹之间。由于植被类型、土壤和气候条件的不同,而且草地 CO₂ 通量与土壤表层的有机碳含量、全 N 含量、C/N 比值具有显著正相关[18], 我们 4 年的观测结果均低于其下限的 20%—35%。

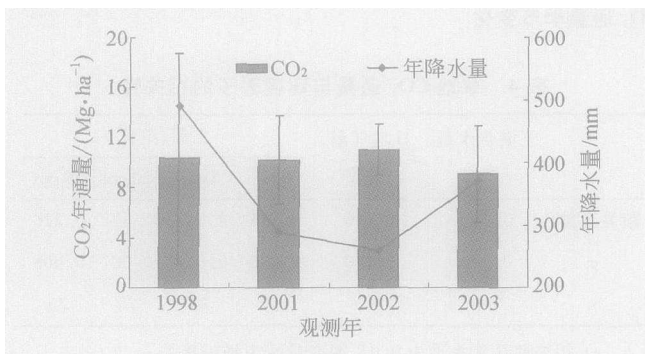


图4 天然草原土壤 CO₂ 通量年际变化

以我们的实验观测结果,不考虑植被和土壤类型的变化以及人类活动的影响,假定我国温带草原类型均为典型草原来估算我国温带草地 CO₂ 年排放总量为 3.17 Pg CO₂, 以 Raich 等[19]1995 年所估算的全球土壤 CO₂ 排放量 249 Pg CO₂ 为准,则我国温带草地 CO₂ 年排放量约占全球土壤 CO₂ 排放总量的 1.23%,由此可见,温带草地土壤对于全球碳通量的评估有着重要的影响,是一个不容忽视的碳

源。

3 结论

(1)温带草地 CO₂ 通量日变化具有明显的昼夜变化特征,峰值多出现上午,草原植物不同生长季节的生长状态对于 CO₂ 通量日变化具有显著的影响。主要的环境因子(温度、土壤含水量)中,土壤含水量成为 CO₂ 通量日变化的主要控制因子,具有显著的线性正相关,其回归方程是: $Y_f = 20.11X_w - 54.7$, $r = 0.342$, $n = 36$, $p = 0.05$ 。而土壤温度和空气温度与 CO₂ 的日变化通量间是非线性关系,未达到显著水平。

(2)表层土壤含水量是温带草地 CO₂ 日均通量的主要控制因子,温度次之。

(3)温带草地 CO₂ 通量季节变化特征显著但并不表现为单一的模式,其表现形式多为“夏高冬低,春、秋居中”,也有“春高冬低,夏、秋居中”的。温带草地 CO₂ 季节通量的变化特征与降雨量的季节分布之间,具有极显著的线性正相关 $r = 0.707$, $p = 0.002 < 0.01$, $n = 16$ 。

(4)在整个实验观测期间温带草地 CO₂ 通量的年际变化较其日变化与季节变化不明显,4个实验观测年的 CO₂ 年通量的变异系数仅是 0.079,远低于日变化与季节变化。

(5)以4个实验观测年 CO₂ 年通量的平均值估算我国温带草地 CO₂ 的年排放总量表明,我国温带草地是大气 CO₂ 不容忽视的源,为了更准确地评估全球土壤的碳排放,我们目前已有的观测资料还是少之又少的,其代表性也具有局限性,因此我们有必要继续加强和深入对草地 CO₂ 排放的研究。

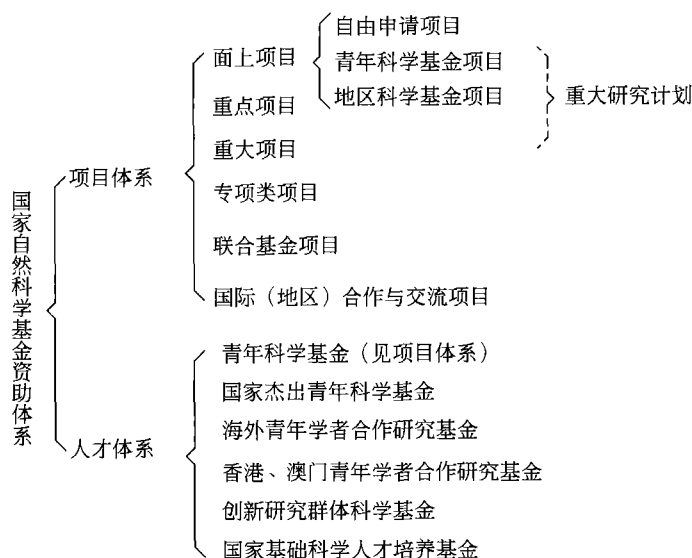
参 考 文 献

- 1 Canadell J G, Dickinson R, Hibbard K, et al. The global carbon project science framework and implementation. Earth system science partnership(IGBP, IHDP, WCRP, DIVERSITAS) Report No. 1: Global Carbon Project No. 1. 2003, Canberra, 69
- 2 French N R. Perspectives on Grassland Ecology. New York. Lauenroth: WK Springer-Verlag, 1979
- 3 中华人民共和国农业部畜牧兽医司, 全国畜牧兽医总站, 主编. 中国草地资源. 北京: 中国科学技术出版社, 1996, 5
- 4 陈佐忠, 汪诗平, 等. 中国典型草原生态系统. 北京, 科学出版社, 2000

- 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 CO₂, N₂O, CH₄ 通量的同时观测及其日变化. 科学通报, 2000, 45(3): 318—322
- 8 王庚辰, 杜 睿, 孔琴心, 等. 中国温带典型草原土壤呼吸特征实验研究. 科学通报, 2004, 49(7): 692—696
- 9 杜 睿, 王庚辰, 吕达仁, 等. 内蒙古羊草草原温室气体交换通量的日变化特征研究. 草地学报, 1998, 6(4): 258—264
- 10 Du R, Wang G C, Lu D R, et al. A study on chamber method of *in-situ* measurements of greenhouse gases fluxes in grassland, Chinese Journal of Atmospheric Science, 2000, 24(4): 396—406
- 11 杜 睿, 王庚辰, 吕达仁, 等. 静态箱法原位观测草原 CO₂ 通量的探讨. 生态学报, 2002, 22(12): 2167—2174
- 12 杜 睿, 黄健辉, 万小伟, 等. 北京地区暖温带森林土壤温室气体排放规律. 环境科学, 2004, 25(2): 12—16
- 13 王跃思, 纪宝明, 王艳芬, 等. 半干旱草原地-气温室气体交换速率测定. 环境科学, 2000, 21(3): 6—10
- 14 张金霞, 曹广民, 周党卫, 等. 草毡寒冻锥形土 CO₂ 释放特征. 生态学报, 2001, 21(4): 544—549
- 15 Rilling M C, Field C B, Allen M F. Soil biota responses to long-term atmospheric CO₂ enrichment in two California annual grasslands. *Oecologia* 1999 119: 572—577
- 16 Mielnick P C, William A D. Soil CO₂ flux in a tallgrass prairie. *Soil Biology & Biochemistry*, 2000, 32: 221—228
- 17 Raich J W, Schlesinger W H. Global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus*, 1992, 44B: 81—99
- 18 耿远波, 章 申, 董云社, 等. 草原土壤的碳氮含量及其与温室气体通量的相关性. 地理学报, 2001, 56(1): 44—52
- 19 Raich, J W, Potter C S. Global patterns of carbon dioxide emission from soils. *Global Biogeochemical Cycles*, 1995, 9: 23—36

国家自然科学基金项目资助类型介绍：总体情况

自然科学基金经过近二十年的发展，其资助格局目前基本可分为“项目”和“人才”两大资助体系(参见图)，这两个体系是相辅相成，互相交叉和互相促进的。项目资助体系以面上项目、重点项目和重大项目为主，构成自然科学基金项目资助的三个层次，同时根据需要设有若干专项类项目和国际合作与交流项目。“十五”期间，自然科学基金委根据基础研究的特点和科学发展的需要，试点实施“国家自然科学基金重大研究计划”。人才资助体系包含青年科学基金、国家杰出青年科学基金、海外和香港/澳门青年学者合作研究基金、创新研究群体科学基金和国家基础科学人才培养基金，其中青年科学基金也是面上项目的组成部分。



自然科学基金资助结构示意图