

草原土壤的碳氮分布与 CO₂ 排放通量的相关性分析

李明峰,董云社*,耿元波,齐玉春

(中国科学院地理科学与资源研究所,北京 100101)

摘要:利用静态暗箱法,对内蒙古锡林河流域的贝加尔针茅(*Stipa baicalensis*)、羊草(*Leymus chinensis*)、大针茅(*Stipa grandis*)、克氏针茅(*Stipa krylovii*)等草原群落样地的 CO₂ 排放通量进行了测定;同时采集各样地的不同层次土壤混合样,分析其中有机碳和全氮的含量,探讨其与 CO₂ 排放的相关性.结果发现:不同样地群落的 CO₂ 排放与其土壤中不同层次的有机碳和全氮含量呈高度正相关,相关系数(*R*)均 0.8 以上,说明在环境因子相对稳定的情况下,土壤有机碳和全氮含量直接或间接地决定生态系统 CO₂ 排放通量的变化.另外,土壤不同层次的有机碳和全氮含量随深度增加递减,其中 70% 以上集中在 0~30cm 土层中,说明它们主要是来自地表有机质的分解;在 0~100cm 的土层中,土壤有机碳和全氮的总含量从贝加尔针茅草原、大针茅草原、羊草草原和克氏针茅草原依次减少,表明降水量、蒸发量和干燥度是影响土壤有机碳、全氮分布的重要因子.

关键词:土壤有机碳;碳氮循环;温室气体;草原土壤

中图分类号:X144;S159;P935.1;Q948 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2004)02-0007-05

Analyses of the Correlation Between the Fluxes of CO₂ and the Distribution of C & N in Grassland Soils

LI Ming-feng, DONG Yun-she, GENG Yuan-bo, QI Yur-chun

(Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, 100101 Beijing)

Abstract: Using static dark enclosed chamber technique, the emissions of CO₂ from typical temperate grasslands such as *Stipa baicalensis*, *Leymus chinensis*, *Stipa grandis* and *Stipa krylovii* in Xilin River Basin of Inner Mongolia were measured. And the contents of organic carbon and total nitrogen in different soil layers were also studied to analyze the correlation between the emissions of CO₂ and the contents of C & N. The results showed that the emissions of CO₂ from the 4 grassland communities were significantly positively correlated with soil organic carbon and total nitrogen in different layers of grassland soils, and the correlation coefficients were almost all above 0.8. That meant the flux of CO₂ is severely influenced by the contents of soil organic carbon and total nitrogen when environmental factors were similar. The decreases of soil organic carbon and total nitrogen with the depth into soils (more than 70% of the contents centralizes above 0~30cm layer) showed that most of them came from the decomposition of organic matter on the earth's surface. In the 0~100cm layer of grassland soils, the decreases of amount of soil organic carbon and total nitrogen from *Stipa baicalensis*, *Stipa grandis* and *Leymus chinensis* grasslands to *Stipa krylovii* grassland orderly showed that the impacts of precipitation, evaporation and dryness index on the distribution of soil organic carbon and total nitrogen were important.

Key words: soil organic carbon; cycles of C & N; greenhouse gases; grassland soils

目前,全球碳循环已成为科学研究的热点,因为碳循环是人类了解地球系统的关键,而 CO₂ 则是决定碳循环 2 个重要生物地球化学反应系列(即光合作用和呼吸与分解作用)的核心^[1].大气中 CO₂ 浓度的变化不仅受人类活动、生物地球化学过程和气候过程的影响,而且受它们与碳循环之间相互关系的制约^[2].据估计,陆地生态系统每年与大气圈之间的碳交换量大约为 120 Pg^[3],而草地作为陆地生态系统的主要类型之一,约占陆地总面积的 25%^[4],其中贮存的碳总量为 266.3 Pg,占陆地生态系统总碳贮量的 12.7%^[5],且草地生态系统又是对 CO₂ 增加和全球变暖反应最明显的生态系统之一^[6,7],其对全球碳氮循环的影响将不容忽视.早期有关草地碳氮循环的研究主要集中在草原群落土壤

呼吸、碳平衡、人类活动以及 CO₂ 倍增等对草地碳氮元素环境生物地球化学循环的影响.研究显示,草场开垦 60 年后可使土壤的碳氮含量降低 18%~35%^[8];割草会使草地生态系统碳氮平均每年减少近 1%^[9];而农田向草场的转化则会明显增加对大气碳的固定,使土壤中有机碳每年以 0.54 mg/h·m² 增加^[10].CO₂ 倍增会明显影响植物叶片气孔密度^[11,12]和草原群落物种演替^[13],进而引起群落光

收稿日期:2003-06-23;修订日期:2003-11-05

基金项目:国家重点基础研究发展规划项目(2002CB412503);中国科学院知识创新重大项目(KZCX1-SW-01-04);中国科学院地理科学与资源研究所知识创新项目(CXIOG-E01-03-01)

作者简介:李明峰(1967~),男,汉族,硕士,山东嘉祥人,主要从事草原和农田生态系统温室气体及全球变化研究. E-mail: mlflee1001@sina.com.cn.

* 通讯作者 e-mail: dongys@igsnrr.ac.cn

合速率的改变;CO₂浓度的升高还通过氮利用改变植物与微生物之间的相互作用,减缓有机质的分解速率^[14]。总之,CO₂浓度的升高都会明显改变碳氮循环的特征和强度。但就草地碳氮循环文献来看,有关草原土壤CO₂排放通量与土壤碳氮含量之间的相关关系的研究报道甚少。本文就以温带最典型的、最具有代表性的内蒙古锡林河流域的干旱-半干旱草原为研究区域,地处国际地圈-生物圈计划(IGBP)陆地样带——中国东北陆地生态系统样带(NECT, Northeast China Transect)内,通过对该区域的草原土壤碳氮分布特征的研究,探讨草地CO₂排放通量变化与土壤碳氮含量之间的相关关系,对进一步了解碳氮元素的环境生物地球化学循环特征,揭示自然或人为引起的全球变化的机制和规律有重要意义。

1 材料与方法

1.1 研究地点

研究区域位于内蒙古锡林郭勒盟境内锡林河流域(43°26′~44°39′N,115°32′~117°12′E),地势东南高,西北低,属中温带半干旱草原气候。成土母质以第四系和第三系沉积物为主,土壤类型主要为栗钙土。区内主要为贝加尔针茅草原、羊草草原、大针茅草原、克氏针茅草原、羊茅(*Festuca ovina*)草原等5个群系,其中克氏针茅草原属典型草原中的干旱类型又称干草原;贝加尔针茅草原为草甸草原,贝加尔针茅、线叶菊(*Fili folium sibiricum*)为主要建群种。本文就以贝加尔针茅草原、羊草草原、大针茅草原和克氏针茅草原等4种草原群落为研究对象(生境特征见表1),其中羊草草原和大针茅草原为中国科学院内蒙古草原生态系统定位站的围栏试验样地,降水量基本相同,但水分状况羊草草原略好于大针茅草原^[15]。

1.2 采样与分析

1.2.1 CO₂ 通量

表 1 锡林河流域 4 种草原群落的主要生境特征

Table 1 The major ecologic niche character of four grassland communities in Xinlin River Basin

草原群落	贝加尔针茅草原	羊草草原	大针茅草原	克氏针茅草原
海拔/ m	1300 ~ 1500	1200 ~ 1300	1100 ~ 1200	900 ~ 1100
地形	丘陵与高台地	低丘、台地、塔拉	低丘、台地、塔拉	平原及山前洪积扇
土壤	黑钙土	暗栗钙土	典型栗钙土	淡栗钙土
1 月平均气温/ °C	- 19.9	- 20.0	- 19.5	- 19.5
7 月平均气温/ °C	18.0	18.3	19.1	21.1
年平均气温/ °C	- 1.4	- 0.3 ~ 1	- 0.3 ~ 1	1 ~ 2
≥10 °C 积温/ °C	1600 ~ 1800	1800 ~ 2000	1800 ~ 2000	2000 ~ 2300
干燥度	0.1	0.9	1.1	1.9
年降水量/ mm	> 450	350 ~ 450	350 ~ 450	250 ~ 350
可能蒸散率	0.2	0.9	1.2	2.0
代表植物群系	贝加尔针茅、线叶菊、羊草、杂类草	羊草、大针茅、冰草等旱生密丛禾草	大针茅、杂类草	克氏针茅、冷蒿

(1) 采样分析 样地群落CO₂排放通量的测定采用静态暗箱法,采样箱用8 mm厚黑色不透明的有机玻璃制成(以避免观测过程中光合消耗CO₂的影响),底面积40 cm×50 cm,采样箱高度为30 cm。选择各样地中最具有代表性的样点,将采样箱埋入地下3~5 cm并将箱外夯实,使采样箱达到密闭状态。处理完毕,静置约30 min,以减少人为活动的扰动引起的误差。采气时盖住箱盖(箱盖装有空气搅拌小风扇、温度计和采气三通阀),将采样各部件连接好,检查系统气密性,确认没有漏气现象后,调节三通气阀,开始抽气,同时按下秒表计时,用医用针管抽取5~6次,观测时间为21 min,每间隔7 min抽取观测箱内气体1次,取样时间分别为0.7、1.4、2.1 min,

并记下取气时的采样箱内的温度。将所采的气体样品运回实验室利用LI-COR6252型CO₂红外线分析仪直接测定,测定是通过12 V直流密封气泵抽出气袋中的气体进入CO₂分析仪,气体通过CO₂分析仪完成CO₂浓度分析。CO₂采样大约每15 d观测1次。2001年6~9月,分别对草甸草原、大针茅草原、羊草草原、干草原的CO₂排放通量进行了7次观测。

(2) 通量计算 CO₂通量指单位时间单位面积观测箱内该气体的质量变化,一般正值表示气体从土壤排放到大气,负值表示气体从大气流向土壤或土壤吸收消耗大气中的该气体,用公式表示为:

$$F = \frac{\Delta m}{\Delta t} \cdot D \frac{V}{A} = hD \frac{\Delta m}{\Delta t}$$

式中, F 为气体通量[$\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$], V 为观测箱的容积, A 为观测是周围的土壤面积, 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), $\Delta m/\Delta t$ 是气体在观测时间内浓度随时间变化的直线斜率, h 为观测箱高度.

1.2.2 土壤碳氮含量

(1) 样品采集 在贝加尔针茅草原、羊草草原、大针茅草原和克氏针茅草原 4 种草原群落中有代表性的区域,测定 CO_2 通量的同时用土钻在该区域打约 20 个 100cm 深的钻孔,分别按 0~10cm、10~20cm、20~30cm、30~50cm、50~70cm、70~100cm 等不同层次取土壤混合样约 1kg,挑去其中的草根石块,风干分装,然后运回实验室测定其碳氮含量.大约每 30d 取土 1 次.2001 年 6~9 月对相应的草原土壤土体在 0~10cm、10~20cm、20~30cm、30~50cm、50~70cm 和 70~100cm 等不同层次的土壤有机碳、全氮进行了 4 次分析测定.从对土壤的有机碳和全氮的测定值来看,土壤有机碳、全氮含量季节变化不大(标准方差: $C < 0.05$; $N < 0.0003$).

(2) 样品分析 风干土壤样品用玛瑙碾钵磨碎过 100 目筛待测.全 N 的测定:开氏法测定,标样(GSS-1)测定值与标准值基本吻合,相对标准偏差(RSD) 1.04%,准确度 99.64%,误差 -0.36%.有机碳的含量用重铬酸钾容量法测定,标样测定值相对标准偏差(RSD) 3.64%,分析的准确度及精密度均为满意,土壤标样测定值置信区间 1.81 ± 0.08 (标准值置信区间 1.80 ± 0.13),置信度 95%.

2 结果与讨论

2.1 CO_2 排放通量与土体中碳氮分布的关系

2001 年 6 月 22 日分别对贝加尔针茅草原、羊草草原、大针茅草原和克氏针茅草原 4 样地草原土壤土体在 0~10cm、10~20cm、20~30cm、30~

50cm、50~70cm 和 70~100cm 等不同层次的土壤有机碳、全氮进行了测定.表 2 可以看出 6 月 22 日观测时 4 块样地主要环境因子具有相对一致性,特别是贝加尔针茅草原、大针茅草原和羊草草原.表 3、表 4 对各样地 CO_2 排放通量分别与土体 0~10cm、10~20cm、20~30cm、30~50cm、50~70cm 和 70~100cm 等不同层次的土壤有机碳、全氮含量之间进行的相关分析,相关系数(R)几乎均在 0.8 以上,可见其相关程度很高,说明在环境因子相对稳定的条件下,土壤有机碳和全氮含量直接或间接地决定 CO_2 排放通量变化.究其原因这是由于土壤中的有机质(有机碳)分解的最终产物主要就是 CO_2 ^[16],且有机质含量高的土壤,能为生物生长提供更多的营养物质,各种土壤生物活动相对活跃,呼吸作用也随之加强^[17],所以在温度和土壤水分相对稳定的情况下,土壤有机碳的含量就成了决定土壤 CO_2 排放通量变化的至关重要的因子^[18,19].表 4 中 CO_2 排放通量之所以分别与土体不同层次全氮含量之间呈高度正相关,主要由于氮是氨基酸、蛋白质、核酸、核苷酸和辅酶以及叶绿素的重要组成元素,氮营养状况不同的叶的光合速率与 RuBP 羧化酶活性密切相关, RuBP 羧化酶总活性随叶片氮含量的增加而线性增高^[20],光呼吸通过 RuBP 羧化酶催化氧化 RuBP 产生释放 NH_3 和 CO_2 ^[21];同时,根吸收一个 NO_3^- 分子协同吸收 2 个 H^+ ,维持 H^+ 梯度的 ATP 主要由线粒体呼吸作用提供,故呼吸作用增强^[22];根吸收的 NO_3^- 可以储存在根细胞液泡内或随蒸腾流输送到地上部,可在根细胞还原为 NH_4^+ ,通过同化反应将 6-磷酸葡萄糖氧化为 6 个 CO_2 ^[22];另外,研究还表明土壤的 C/N 具有相对稳定性^[14],且土壤呼吸与反硝化作用有很好的正相关关系^[23,24].故全氮含量高会明显增加草原群落的 CO_2 排放,使土壤全 N 含量与 CO_2 排放通量呈高度正相关关系.

表 2 观测草原样地的主要环境因子的相对一致性

Table 2 The relatively sameness of major environmental factors of grasslands

样地名称	土壤类型	气温/℃	地温/℃			土壤水分/% (0~20cm)
			0cm	5cm	10cm	
贝加尔针茅	黑钙土	21.5	27.3	20	16.4	13.7
大针茅	典型栗钙土	24.5	27.9	21.2	18.9	10.9
羊草	暗栗钙土	24	27.9	20.1	17.5	12.6
克氏针茅	淡栗钙土	32.3	44.7	30.1	27	5.9

2.2 草原土壤中碳氮分布

土壤是各自然地理要素长期综合作用的产物.

锡林河流域由于局部自然要素的差异形成了不同类型的土壤,从贝加尔针茅原、羊草草原、大针茅草原、

克氏针茅草原,土壤类型由黑钙土、暗栗钙土、典型栗钙土、淡栗钙土也随之发生变化.本次实验对土体不同层次的有机碳、全氮含量测定分析还发现(表3、4),土壤0~10cm、10~20cm、20~30cm、30~50cm、50~70cm和70~100cm土壤有机碳、全氮含量随深度的增加而递减,且70%以上集中在0~30cm土层中(羊草草原超过80%).其原因主要是由于干旱和半干旱草原地区,地上生物量较小,植物体死亡后形成粗腐殖质积聚于地表,经微生物分解进入土壤;且地下生物量比地上生物量大得多,主要是发达的根系,集中在0~30cm土层中,死亡后直接在土壤中被微生物分解形成土壤有机质,故土壤的有机碳、全氮表现出向深处递减的趋势,说明草原土壤的土壤有机碳、全氮主要是来自地表有机质的

分解.Lavado^[25]等的实验也证明地表的凋落物是影响土壤有机碳、全氮在土体中分布的关键因子.从4种草原土壤有机碳和全氮的总含量来看,贝加尔针茅草原、大针茅草原、羊草草原、克氏针茅草原依次减少,而从表1知,贝加尔针茅草原、大针茅草原、羊草草原、克氏针茅草原的年降水量逐渐减少,蒸发量和干燥度大致为渐增.因为草地碳循环直接与该地区年降水量和季节分配相关联,决定有机质的分解速率^[26];尽管大针茅草原与羊草草原降水差不多,但大针茅草原蒸发量略大于羊草草原,大针茅在土壤中的根密度要大于羊草,故有机质分解后在土体中积聚的碳氮也相对较高.从也表明降水量、蒸发量和干燥度是影响土壤中有有机碳、全氮分布的重要因子.

表3 样地土体不同层次有机碳含量分别与CO₂ 通量之间的相关分析¹⁾

Table 3 Correlation Analysis between CO₂ fluxes and the content of organic carbon in different soil layers

样地	有机碳/ %						CO ₂ 通量
	0~10cm	10~20cm	20~30cm	30~50cm	50~70cm	70~100cm	/ mg·(m ² ·h) ⁻¹
贝加尔针茅	2.88	2.29	1.71	1.29	1.04	0.52	316.8
大针茅	1.62	1.26	0.99	0.79	0.47	0.25	218.9
羊草	1.68	1.16	1.24	0.45	0.19	0.15	189.4
克氏针茅	0.97	0.79	0.69	0.51	0.31	0.18	78.8
相关系数(R)	0.960	0.942	0.924	0.853	0.803	0.827	

1) CO₂ 排放通量包括土壤呼吸、植物暗呼吸和凋落物分解排放,其中通量取7次的平均值;表4同

表4 样地土体不同层次全氮含量分别与CO₂ 通量之间的相关分析

Table 4 Correlation analysis between CO₂ fluxes and the content of total nitrogen in different layers of soils

样地	全氮/ %						CO ₂ 通量
	0~10cm	10~20cm	20~30cm	30~50cm	50~70cm	70~100cm	/ mg·(m ² ·h) ⁻¹
贝加尔针茅	0.2687	0.204	0.166	0.1327	0.1048	0.0545	316.8
大针茅	0.1835	0.1493	0.1089	0.0877	0.0594	0.0256	218.9
羊草	0.1748	0.1253	0.0775	0.0471	0.0272	0.0162	189.4
克氏针茅	0.1111	0.0878	0.0745	0.0535	0.0337	0.0217	78.8
相关系数(R)	0.989	0.987	0.896	0.855	0.848	0.782	

3 小结

(1) 锡林河流域不同样地群落的CO₂ 排放与其土壤中不同层次的有机碳和全氮含量呈高度正相关,相关系数(R)几乎都在0.8以上,说明土壤有机碳和全氮含量直接或间接地决定CO₂ 排放通量变化.

(2) 锡林河流域草原土壤不同层次的有机碳和全氮含量随深度增加递减,其中70%以上集中在0~30cm土层中(羊草草原超过80%),说明它们主要是来自地表有机质的分解;

(3) 土壤有机碳和全氮的总含量从草甸草原、大针茅草原、羊草草原、干草原依次减少,说明年降水量、蒸发量和干燥度是影响土壤有机碳、全氮分布的重要因子.

参考文献:

[1] Chameides W L, Perdue. Biogeochemical Cycles [M]. London: Oxford University Press, 1997. 115~136.
[2] Falkowski P, Scholes R J, Boyle E, et al. The Global Carbon Cycle: A Test of Our Knowledge of Earth as a System[J]. Science, 2000, 290: 291~295.
[3] Scholes R J, Noble I R. Storing Carbon on Land[J]. Science, 2001, 294: 1012~1013.

- [4] Graetz . Changes in land-use and land cover : A global perspective [M] . London : Cambridge University Press , 1994 . 125 ~ 145 .
- [5] Raich J W , Schlesinger W H . The global dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate [J] . Tellus , 1992 , **44B** : 81 ~ 99 .
- [6] Watson R T , Marufu G , Zinyowera , Richard H Moss . The Regional Impacts of Climate Change : An Assessment of Vulnerability [M] . A Special Report of IPCC Working Group II , 1997 . 1 ~ 6 .
- [7] Smith Stanley D , Travis E . Huxman , *et al* . Elevated CO₂ increases productivity and invasive species success in an arid ecosystem [J] . Nature , 2000 , **408** : 79 ~ 81 .
- [8] Tiessen H J , Stewart W B , Bettany J R . Cultivation Effects on the Amounts and Concentration of Carbon , Nitrogen , and Phosphorus in Grassland Soils [J] . Agronomy Journal , 1982 , **74** : 831 ~ 835 .
- [9] Dickinson N M . Seasonal Dynamics and Compartmentation of Nutrients in a Grassland Meadow in Lowland England [J] . Journal of Applied Ecology , 1984 , **21** : 695 ~ 701 .
- [10] Conant R T , Paustain K , Elliott E T . Grassland Management and Conversion into Grassland : Effects of Carbon [J] . Ecological Applications , 2001 , **11**(2) : 343 ~ 355 .
- [11] Serna L , Fenoll C . Plant biology : Coping with human CO₂ emissions [J] . Nature , 2000 , **408** : 656 ~ 657 .
- [12] Kürschner W M . Leaf sensor for CO₂ in deep time [J] . Nature , 2001 , **411** : 247 ~ 248 .
- [13] Alward R D , Detling J K , Milchunas D G . Grassland Vegetation Changes and Nocturnal Global Warming [J] . Science , 1999 , **283** : 229 ~ 231 .
- [14] Hu S , Chapin F S , Firestone M K , Field C B , Chiariello N R . Nitrogen Limitation of Microbial Decomposition in a Grassland under Elevated CO₂ [J] . Nature , 2001 , **409** : 188 ~ 191 .
- [15] 王艳芬 , 陈佐忠 , Larry T T . 人类活动对锡林郭勒地区主要草原土壤有机碳分布的影响 [J] . 植物生态学报 , 1998 , **22**(6) : 545 ~ 551 .
- [16] Chapman S J , Thurlow M . The influence of climate on CO₂ and CH₄ emissions from organic soils [J] . Agricultural and Forest Meteorology , 1996 , **79** : 205 ~ 217 .
- [17] 刘绍辉 , 方精云 . 土壤呼吸的影响因素及全球尺度下温度的影响 [J] . 生态学报 , 1997 , **17**(5) : 469 ~ 476 .
- [18] Fang C , Moncrieff J B . A Model for soil CO₂ production and transport I : Model development [J] . Agricultural and Forest Meteorology , 1999 , **95** : 225 ~ 236 .
- [19] Priess J A , Koning G H J de , Veldkamp A . Assessment of interactions between land use change and carbon and nutrient fluxes in Ecuador [J] . Agriculture Ecosystems & Environment , 2001 , **85** : 269 ~ 279 .
- [20] Warren C R , Adams , Chen Z . Is photosynthesis related to concentrations of nitrogen and Rubisco in leaves of Australian native plants ? [J] . Australian Journal of Plant Physiology , 2000 , **27** : 407 ~ 416 .
- [21] 许大全 . 光合作用效率 [M] . 上海 : 上海科学技术出版社 , 2002 . 39 ~ 123 .
- [22] 吴平 , 印莉萍 , 张立平 . 植物营养分子生理学 [M] . 北京 : 科学出版社 , 2001 . 1 ~ 103 .
- [23] Kessel C van , Pennock D J , Farrell R E . Seasonal variations in denitrification and nitrous oxide evolution at the landscape scale [J] . Soil Science Society of America Journal , 1993 , **57** : 988 ~ 995 .
- [24] Chistensen S , Simkins S , Tiedje J M . Temporal patterns of soil denitrification : their stability and causes [J] . Soil Science Society of America Journal , 1990 , **54** : 1614 ~ 1618 .
- [25] Lavado R S , Sierra J O , Hashimoto P N . Impact of grazing on soil nutrients in a Pampean grassland [J] . Journal of Range Management , 1996 , **49**(5) : 452 ~ 457 .
- [26] Ojima D S . Workshop Summary Statement : Terrestrial Biospheric Carbon Fluxes —— Quantification of Sinks and Sources of CO₂ [J] . Water , Air and Soil Pollution , 1993 , **70** : 3 ~ 15 .