锡林河流域一个放牧羊草群落中 碳素平衡的初步估计

李凌浩¹ 李 鑫¹ 白文明¹ 王其兵¹ 闫志丹¹ 袁志友¹ 董云社²

(1 中国科学院植物研究所植被数量生态学重点实验室, 北京 100093)

(2 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘 要 野外调查与历史资料相结合, 对内蒙古锡林河流域一个放牧羊草(*Leymus chinensis*)草原群落的碳素贮量、主要流量和周转速度等进行了估计, 在此基础上对放牧情况下该群落的碳素收支进行了概算。结果表明: 1) 该群落中地上部净初级生产固碳量的两年平均值为 $78.2 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 根系碳素输入量的平均值为 $322.5 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 碳素输入总量为 $400.7 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; 2) 土壤净呼吸量为 $343.7 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 家畜采食量为 $49.7 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 动物(昆虫)采食量为 $14.7 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 地上立枯阶段的淋溶与光化学分解损失为 $3.2 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 碳素输出总量为 $411.3 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; 3) 该群落中碳素输出略大于输入, 净释放速率为 $10.6 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, $0 \sim 30 \text{ cm}$ 土壤中的碳素周转速率为 6.2% , 周转时间为 16 年。

关键词 放牧 羊草草原 碳素平衡 土壤呼吸 净初级生产 周转速率

SOIL CARBON BUDGET OF A GRAZED *LEYMUS CHINENSIS* STEPPE COMMUNITY IN THE XILIN RIVER BASIN OF INNER MONGOLIA

LI Ling-Hao¹ LI Xin¹ BAI Wen-Ming¹ WANG Qi-Bing¹ YAN Zhi-Dan¹ YUAN Zhi-You¹ and DONG Yun-She²

(1 Laboratory of Quantitative Vegetation Ecology, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China)

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

Abstract We present a soil carbon budget for a grazed *Leymus chinensis* steppe community in the Xilin River basin of Inner Mongolia based on historical data and current field measurements. The study site was situated in the southern part of the basin, approximately 1 265 m above sea level. The climate is temperate and semi-arid with a mean annual rainfall of 350 mm and annual mean temperature of 0.3°C . The dark chestnut soil profile is about 1 m in depth with a 10–20 cm thick humus layer, a pH of 7.4 to 8.3, and an organic C content of 1.53%–1.37% in the upper 0–20 cm layer. A grazed stand ($43^\circ32'58''\text{N}$, $116^\circ40'34''\text{E}$) outside the *L. chinensis* permanent plot of the Inner Mongolian Grassland Ecosystem Research Station was chosen as a sampling plot. Vegetation consisted mainly of *L. chinensis*, *Stipa grandis*, *Agropyron cristatum*, and *Cleistogenes squarrosa*, which accounted for 80% of the total aboveground biomass. The pasture has been grazed continuously for more than 40 years at a moderate stocking rate with about 2/3 of the above-ground biomass consumed annually.

Soil respiration, and aboveground biomass, and root biomass measurements were initiated May 31, 1998 and measured every ten days over two growing seasons until October 14, 1999. The alkali absorption method was used to measure soil respiration. Root respiration was evaluated indirectly by relating the amount of root biomass under the chamber to rates of CO_2 evolution. Aboveground biomass was measured in 10–25 cm diameter circular plots using the harvest method. The maximum biomass value measured during the growing season was taken as the annual net primary productivity (NPP). Root biomass was measured to 30 cm depth, and the root productivity was estimated using the annual increment of growth, as defined by Dahlman and Kucera. Food consumption by insects was determined using the cage–feeding method by using a series of cages with different insect population densities.

The annual average carbon input from aboveground biomass production was $78.2 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, and inputs from root biomass to 30 cm depth averaged $322.5 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$. The summed mean annual carbon input of shoot and root materials was approximately $400.7 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$. The annual amount of aboveground biomass consumed by insects averaged $14.7 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, and the carbon output by leaching or light-chemical oxida-

tion was $3.2 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$. The annual evolution rate of CO_2 from net soil respiration averaged $343.7 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$. Cattle consumption was $49.7 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$. The summed mean annual output was approximately $411.3 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ and a net carbon release of about $10.6 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ was calculated. Based on the soil organic carbon density of the field, the turnover rate of soil carbon in 0–30 cm depth was 6.2%, with a turnover time of 16 years.

Carbon budgets for each of the two years, 1998 and 1999, were quite different. A net carbon release of $75.1 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ was detected in 1999, while a net carbon accumulation of $54.1 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ occurred in 1998. By comparing carbon cycling patterns between 1998 and 1999, it was evident that the difference between years arose primarily from differences in root production and soil respiration between the two years. Severe drought in 1999 and record high rainfall in 1998 caused a difference in root *NPP* by as much as $220.5 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$. The root *NPP* accounted for about 73% ~ 85% of the total carbon input in the community, indicating the importance of the belowground biomass in estimating the carbon budget for this ecosystem. Soil respiration seemed to be less sensitive to drought, with only about a 22.5% decrease in 1999 whereas root *NPP* decreased by about one half in 1999. Our results indicated that drought, a frequent occurrence in this region, could change this ecosystem from a sink to a source for atmospheric CO_2 . The degree to which this grassland could become a source of CO_2 appeared to depend also on the stocking rate.

Key words *Leymus chinensis* steppe, Carbon balance, Soil respiration, Turnover rate, *NPP*, Grazing

草原生态系统在全球碳循环中起着重要的作用,对全球主要草原生态系统碳素平衡及其影响因子的广泛深入研究对于精确估计全球碳收支极为关键(Ojima *et al.*, 1993)。温带草原土壤中碳素贮量巨大,土地利用变化和人类活动影响剧烈,是对全球碳循环影响较大的系统,具有格外重要的意义(Raich & Tufekcioglu, 2000; Hanson *et al.*, 2000)。这方面的早期工作主要集中在对某些草原群落碳循环的局部环节的研究上,如对土壤呼吸、*NPP* 和凋落物分解等的单一测定。通常是选择没有放牧影响的、处于稳定状态的群落,并假设群落处于碳素平衡状态,去推演碳循环的其它不容易获得的参数,如根系呼吸占土壤总呼吸的比例以及土壤中碳素的周转速度等(郭继勋, 1994; Behera & Pati, 1986; Coleman, 1973; Kucera & Kirkham, 1971; Singh & Gupta, 1977)。20 世纪 90 年代初期以来,采用先进的测定手段,如涡动相关法(Eddy correlation measurement)和改进的 IRGA 法等,对温带草原土壤表面的 CO_2 交换动态进行长期定位观测,以判定这些生态系统是大气 CO_2 的源还是汇。如 Norman 等(1992)和 Kim 等(1992)在北美第一国际卫星地表气候观测计划实验样区(FIFE)所开展的研究。近年来,国际上通过野外实验和模型模拟,重点研究气候与土地利用变化及 CO_2 浓度升高对草原生态系统土壤中碳素贮量的可能影响(Ojima *et al.*, 1993)。

羊草(*Leymus chinensis*)草原是广泛分布于欧亚温带草原区东部的一种地带性植被类型。内蒙古锡林河流域的放牧羊草草原,其植被特征和利用方式对于我国温带典型草原具有广泛的代表意义。作者

曾对该流域一个放牧羊草群落的土壤呼吸、地上/地下生物量、生产力、家畜采食量等进行了连续两年的实地测定(李凌浩等, 2000; 2002; Li *et al.*, 2002)。基于这些实测数据,结合张爱国等(1992)对昆虫采食以及崔晓勇等(2000)对样方数据转换等的研究结果,本文对该放牧群落的碳素贮量、主要流量和周转速度等进行了估计,并对放牧情况下该群落的碳素收支进行了概算。

1 研究地点与方法

1.1 研究地点

研究地点设在内蒙古锡林河流域南部的一个放牧羊草草场内(43°32'58" N, 116°40'34" E)。该流域属大陆性温带半干旱气候,年平均气温(0.3 ± 1.0) °C,年降水量(347.0 ± 79.6) mm。海拔 1 200 ~ 1 250 m,暗栗钙土,土层深度 1 m 左右,腐殖层厚 10 ~ 20 cm。放牧强度中等,约 2/3 的地上生物量被家畜采食,践踏较严重。植物种类较少,以羊草、大针茅(*Stipa grandis*)、糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)、冰草(*Agropyron cristatum*)等旱生禾草为主(陈佐忠, 1988; 白永飞等, 2000)。于 1998 年 5 月中旬测定工作开始之前,在放牧群落典型地段设立 40 m × 40 m 的围封样地。该临时样地位于中国科学院内蒙古草原生态系统定位研究站羊草固定样地的北缘约 50 m,目的是可与羊草固定样地的有关数据进行比较。1999 年样地更换到附近的另一地点。

1.2 研究方法

野外测定于 1998 年 5 月 31 日开始,1999 年 10 月 14 日结束。两个生长季中,每隔 10 天进行 1 次

土壤呼吸、地上/地下生物量(*NPP*)及环境因子的综合测定。土壤呼吸采用碱液吸收法测定(Anderson , 1982) ,设置 8 ~ 10 个重复样点。采取根系生物量梯度上土壤呼吸变化趋势线外推法对根系呼吸占土壤总呼吸量的比例进行估计(Kucera & Kirkham ,1971)。地上生物量采用收获法 ,根系生产力采用生物量极差法(Dahlman & Kucera , 1965) ,根系生物量取样深度为 0 ~ 30 cm ,分 3 层(每隔 10 cm)取样。地上/地下生物量的取样面积、地点和重复次数与碱液吸收测定相同 ,均为直径 25 cm 的圆形 ,重复 8 ~ 10 次。小样方获得的生物量数据与标准样方(1 m × 1 m)比较具有很好的一致性(崔晓勇等 ,2000)。昆虫采食量数据采用张爱国等(1992)的研究结果。家畜采食量通过比较生长期结束时样地围栏内外的地上生物量存量获得。取样与测定方法的详细描述见相关文献(李凌浩等 ,2000 ;2002 ;Li *et al.* , 2002)。有关统计分析在 Excel 97 系统下完成。地上绿色部分和活根系的生物量 × 0.45 = 含碳量。

2 结果分析

2.1 碳素输入

图 1 给出了该放牧羊草群落中地上枝叶、根系和立枯生物量连续两年的季节变化情况。可以看出 ,地上绿色生物量在两个生长季均为比较规则的单峰型曲线 ,据此得出 1998 和 1999 年的地上部固碳量分别为 79.3 $\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 77.1 $\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。根据根系生物量极差法得出根系生产力在 1998 ~ 1999 年分别为 432.7 $\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 212.2 $\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。两个年度根系生产力的差别很大 ,主要是由于 1998 年的降水量(468.0 mm)要显著高于 1999 年(294.6 mm)。而地上生物量的差别却很小 ,具体原因有待于进一步研究。由图 1 可以看出 ,立枯的形成主要在秋季生长季结束时 ,并一直保持到第二年雨季开始之前 ,在 6 月下旬达到最低值。当然 ,在实际放牧情况下这条曲线是不存在的。根据以上数据 ,算得该群落碳素输入总量 1998 ~ 1999 年分别为 512.0 $\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 289.3 $\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,两年平均为 400.7 $\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。

2.2 碳素输出

通过对围栏内外生物量的比对测定 ,算得由家畜采食引起的地上生物量损失于 1998 ~ 1999 年分别为 52.9 $\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 46.4 $\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。张爱国等(1992)1987 ~ 1988 年在同一地点的实测结果 ,昆虫采食量平均为 14.7 $\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。温带草原群落

立枯阶段的雨水淋溶与光化学分解等造成的碳素损失约占净初级生产力的 4%(李凌浩等 ,1998)。根据上述数据对 3 个途径 1998 ~ 1999 年的碳素输出量的估计由表 1 给出。

通过碱液吸收法在该群落中测得 1998 ~ 1999 年土壤呼吸总量分别为 305.6 $\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 237.0 $\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ (李凌浩等 ,2000) ,其中根系呼吸占土壤总呼吸的比例估计为 24%(李凌浩等 ,2002 ;Li *et al.* , 2002)。从土壤总呼吸量中扣除这一部分 ,得到土壤净呼吸量 1998 ~ 1999 年分别为 232.3 $\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 180.1 $\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。许多研究结果表明 ,由碱液吸收法得到的土壤呼吸量一般仅为其实际释放量的 60%(Norman *et al.* , 1992 ; Kucera & Kirkham , 1971 ; Coleman , 1973)。应用该系数进行转换 ,最终得到该群落中由净土壤呼吸释放的碳素总量 1998 ~ 1999 年分别为 387.1 $\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 300.2 $\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,两年平均为 343.7 $\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。

图 1 放牧羊草群落地上、地下生物量和立枯现存量的季节动态
Fig.1 Seasonal changes in above/below ground biomass and standing dead litter in the grazed *Leymus chinensis* steppe community between 1998 ~ 1999

2.3 碳素平衡估计

1998 ~ 1999 年放牧羊草群落中碳素的输入、输出与平衡情况由表 1 给出。结果表明 ,该放牧群落 1998 年表现为碳素净的累积 ,而 1999 年则为净的释放 ,范围在 + 54.1 $\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 至 - 75.1 $\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 之间。与作者在该地点羊草固定样地的类似分析结果相比 ,这一碳素累积或释放的幅度有些偏高(Li *et al.* , 2002)。误差主要来自对根系生产力测定的不够精确。由于长期以来一直缺少精确测定根系生产力的方法 ,这极大地限制了对自然生态系统中碳素收支(从而碳素源-汇关系)的精确估计。对 1998 年该群落根系生物量的测定结果有可能偏高 ,主要是由于对样点的选择不够随机(因测定土壤呼

吸处理的需要);而 1999 年根系生物量的测定结果有可能偏低。由图 1 可以看出,1999 年根系生物量的季节变化是一条双高峰曲线,由生物量极差法估计的结果实际上掩盖了第一个根系生长高峰期的生长量。此外,对昆虫采食量的估计也有可能偏高。需要指出的是,即使在这种情况下,上述碳素的累积与释放趋势仍然是明显的。

1998 年和 1999 年的碳收支差别非常大。通过对两年间该群落碳循环各个途径的比较会发现,这一差别主要来自根系生产力。1999 年的严重干旱和 1998 年的最高记录降水导致两年间根系生产力相差高达 $220.5\text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,根系 *NPP* 占该群落碳素输入总量的 73%~85%,表明根系在碳平衡中的重要意义。干旱对土壤呼吸的影响相对较小。由于干旱,1999 年根系生产力比 1998 年下降了 50% 以上,而土壤呼吸仅下降了 22.5%。1998 年是羊草样地 20 年来降水量最高的年份,而 1999 年则是降水量最低的年份,两年的数据恰恰反映了极端气候条

件下的碳收支概况。因此,得出上述结果确有其合理性。对两年的数据进行平均,将得到该群落更加合理的碳平衡估计(表 1,图 2)。由表 1 可知,两年的平均结果表现为 $10.6\text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 的净碳素释放。

这一结果的可靠性可以通过比较羊草固定样地内外的土壤有机碳贮量的差异进行验证。基本假设是 $\text{SOC}_{\text{inside}} - \text{SOC}_{\text{outside}} = (\text{CB}_{\text{inside}} - \text{CB}_{\text{outside}}) \times \text{围封时间}$ 。根据这一假设,自 1979 年以来羊草固定样地内外的土壤(0~30 cm)有机碳贮量的差值 = $(26.9\text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}(\text{Li et al.}, 2002) + 10.6\text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}(\text{本文})) \times 20\text{ a} = 750\text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}$ 。吕忠忠等(1992)、马兴旺¹⁾和李凌浩等(1998)对这一差值的实测结果分别为 $202\text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}(0\sim10\text{ cm})$ 、 $1\,245\text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}(0\sim20\text{ cm})$ 和 $477\text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}(0\sim20\text{ cm})$,平均 $\geq 641\text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}$,如果换算在 0~30 cm 土层,则至少在 $202\sim1\,245\text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}$ 之间。可以看出,两者之间比较接近。由土壤碳素贮量除以土壤净呼吸速度,得到 0~30 cm 土层碳素周转时间约为 16 年($5\,228\text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}/343.7\text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)。

表 1 1998~1999 年放牧羊草群落碳素的输入、输出与平衡
Table 1 Annual carbon input-output and budget in the grazed *Leymus chinensis* community

碳收支 Carbon budget	碳流量 Fluxes Carbon wt ($\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)	1998 年 Study year 1998	1999 年 Study year 1999	两年平均 Average of 1998~1999
输入 Inputs	地上部分 Shoots	79.3	77.1	78.2
	根系 Roots	432.7	212.2	322.5
	合计 Summed	512.0	289.3	400.7
	土壤净呼吸 Net soil respiration	387.1	300.2	343.7
输出 Outputs	家畜采食 Cattle consumption	52.9	46.4	49.7
	昆虫采食 Consumed by insects	14.7	14.7	14.7
	立枯损失 Standing-dead loss	3.2	3.1	3.2
	合计 Summed	457.9	364.4	411.3
平衡 Balance		+ 54.1	- 75.1	- 10.6

图 2 放牧羊草群落 0~30 cm 土壤中碳素的主要流量和贮量

Fig.2 Major reserves ($\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}$) and fluxes ($\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$) of carbon in the 0~30 cm soil layer of the grazed *Leymus chinensis* steppe communit

1) Ma, X. W.(马兴旺). 1994. Studies on organic-mineral complexes in degraded and recovering steppe soil. Master 's degree thesis of Agriculture Uni-versity of China. (in Chinese)

3 讨 论

对该群落碳素平衡影响较大的因素有两个,即年降水量和家畜放牧利用强度。降水量决定了群落 *NPP* 水平,特别是对根系生长的影响较大,但对土壤呼吸的影响远不如对 *NPP* 的影响。因此,降水量低的年份,碳素的输出有可能超过输入。锡林河流域 20 年降水量平均为 (347.0 ± 79.6) mm,其中约有半数年份的降水量在 300 mm 左右,与 1999 年(294.6 mm)相当。而像 1998 年这样高降水量的年份并不多见。因此有理由相信,该放牧群落的长期碳素动态是趋向于释放。

放牧对碳平衡的影响主要表现为对地上生物量的直接采食和对根系生长的间接影响。与羊草固定样地相比,长期放牧导致该群落地上生产力降低了约 1/2,根系生物量降低了 1/3,但对根系生产力的影响似乎不大(李凌浩等,2000;2002;Li *et al.*, 2002)。本研究的生产力数值是当年禁止放牧情况下测得的,实际上“边吃边测”情况下的现实生产力肯定要低许多。1999 年地上部生产力大于群落碳素净损失量的结果表明,即使在极端气候下,禁止放牧仍然可维持该群落碳素收支的平衡。在锡林河流域至少有 2/3 的草地超过该群落所处的放牧强度和植被保持状况,由此推断,该流域草地整体而言有可能是碳素释放源。对锡林河流域 40 年来土地利用变化对 3 000 km² 羊草草原土壤碳素贮量的影响的调查结果表明,放牧和开垦导致了约 12.4% 的土壤有机碳的损失,净损失量约为 590.6 gC·m⁻²,年释放速率为 14.8 gC·m⁻²·a⁻¹,稍稍高于本研究两年平均的测定结果(李凌浩等,1998)。对于群落水平碳素平衡以及整个流域水平的碳素源-汇关系的精确估计则有赖于土壤呼吸与根系生产力测定的更加先进的仪器和技术手段,而不能轻易得出结论。

考察该群落生物量组分与土壤呼吸之间的相关关系发现,地上活生物量与土壤总呼吸之间存在着显著的指数关系(图 3),而土壤呼吸与根系生物量间的关系不明显,主要是由于根系的双峰型生长节律。而地上生物量则综合地反映了温度、水分与土壤微生物活动的状况,并且与之同步变化。这种关系对于碳素循环的大尺度研究有着格外重要的意义。例如,由遥感资料可以估计出 *ANPP* 的格局,通过 *ANPP* 与土壤呼吸的关系模型,就可以对土壤呼吸进行遥感估计。这方面的研究将成为未来陆地生态系统碳素循环大尺度研究的重点。

图 3 地上活生物量与土壤总呼吸速率间的相关关系

Fig.3 Relationship between live above ground biomass and soil respiration rate

Norman 等(1992)采用 LI-6200 封闭式气体交换系统法,通过对总光合速率、植物地上部暗呼吸和土壤微生物(包括根系)呼吸 3 个环节的比较,对北美温带草原某一无放牧地点(39°03' N,96°32' W)的碳素收支测定表明,该群落基本处于碳平衡状态,碳素净损失为每天 0.6 g CO₂·m⁻²,约为总光合速度的 2%。他们发现,高的碳素积累速率出现在太阳辐射较低、低温和相对干燥的日子。Kim 等(1992)在同一地点采用涡动相关法的研究结果表明,植被与大气之间净的 CO₂ 交换量的季节变异很大,当叶面积指数最大时,CO₂ 净交换达到峰值(12~18 g CO₂·m⁻²·d⁻¹)。在生长旺盛时期的每隔 1 个星期的测定数据平均,CO₂ 净吸收量为 5~18 g CO₂·m⁻²·d⁻¹,而在干旱的 3 个星期,该群落中 CO₂ 平均净的释放速度达到了 5 g CO₂·m⁻²·d⁻¹。因此基于短期测定数据对碳素收支的估计是需要格外慎重的。频繁的干旱能够使该群落由大气的碳汇变成碳源。除干旱持续时间和强度之外,植被所处的发育阶段对这种汇-源关系的转变影响更大。他们得出的结论是,该群落 1987 年是一个强的碳汇,在整个生长期的 6 个月(5~10 月),CO₂ 净吸收总量为 750 g CO₂·m⁻²,或 205 gC·m⁻²;而在 1989 年由于较长时间的春季干旱和 7 月份两个星期的干热风,该草原表现为弱的碳汇,在整个生长期的 6 个月(5~10 月),CO₂ 净吸收总量为 250 g CO₂·m⁻²,或 68.2 gC·m⁻²。Coleman(1973)在北美温带草原对一个恢复群落的碳素收支的研究结果表明,该地点的碳素表现为净的积累,约为 137.8 gC·m⁻²·a⁻¹。与上述研究的不同之处在于我们测定的群落是在长期放牧下。假如不扣除家畜和昆虫采食等的碳素输出而仅考虑土壤呼吸,则本研究群落 1998 年的碳素净积累为 124.9 gC·m⁻²·a⁻¹,而 1999

年基本处于碳平衡状态。因此与上述结果非常接近,并且对于干旱影响的结论也是高度一致的。对于该放牧群落,我们初步的结论是:在干旱(< 300 mm)和重度利用(2/3 采食)情况下,该群落处于碳素净释放状态,在干旱但无放牧或在正常降水量和轻度放牧(1/3 采食)情况下该群落处于碳素平衡状态,而在高降水年份和适度利用情况下则该群落处于碳素积累状态。

参 考 文 献

- Anderson, J. P. E. 1982. Soil respiration. In: Page, A. L. ed. Methods of soil analysis, part 2, chemical and microbiological properties. American Society of Agronomy Monographs, **9**: 831 ~ 871.
- Bai, Y. F. (白永飞) & Z. Z. Chen (陈佐忠). 2000. Effects of long-term variability of plant species and functional groups on stability of a *Leymus chinensis* community in the Xilin River basin, Inner Mongolia. Acta Phytocologica Sinica (植物生态学报), **24**: 641 ~ 647. (in Chinese with English abstract)
- Behera, N. & D. P. Pati. 1986. Carbon budget of a protected tropical grassland with reference to primary production and total soil respiration. Revue D'ecologie et de Biologie du Sol, **23**: 167 ~ 181.
- Chen, Z. Z. (陈佐忠). 1988. Physiographic and climatological features of the Xilin River basin. Research on Grassland Ecosystem (草原生态系统研究), **3**: 13 ~ 22. (in Chinese)
- Chen, Z. Z. (陈佐忠) & D. H. Huang (黄德华). 1988. A measurement to underground productivity and turnover value of *Aneurolepidium chinense* and *Stipa grandis* grassland, at the Xilin River valley, Inner Mongolia. Research on Grassland Ecosystem (草原生态系统研究), **2**: 132 ~ 138. (in Chinese)
- Coleman, D. C. 1973. Soil carbon balance in a successional grassland. Oikos, **24**: 195 ~ 199.
- Cui, X. Y. (崔晓勇), S. Q. Chen (陈泗清) & Z. Z. Chen (陈佐忠). 2000. CO₂ release from typical *Stipa grandis* grassland soil. Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报), **11**: 390 ~ 394. (in Chinese with English abstract)
- Dahlman, R. C. & C. L. Kucera. 1965. Root production and turnover in native prairie. Ecology, **46**: 84 ~ 88.
- Guo, J. X. (郭继勋). 1994. The decomposers sub-system in the *Leymus chinensis* steppe. Changchun: Jilin University Press. (in Chinese)
- Hanson, P. J., N. T. Edwards, C. T. Garten & J. A. Andrews. 2000. Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: a review of methods and observations. Biogeochemistry, **48**: 115 ~ 146.
- Kim, J., S. B. Verma & R. J. Clement. 1992. Carbon dioxide budget in a temperate grassland ecosystem. Journal of Geophysical Research, **97**: 6057 ~ 6063.
- Kucera, C. & D. Kirkham. 1971. Soil respiration studies in tall-grass prairie in Missouri. Ecology, **52**: 912 ~ 915.
- Li, L. H. (李凌浩), X. H. Liu (刘先华) & Z. Z. Chen (陈佐忠). 1998. Study on the carbon cycling of *Leymus chinensis* steppe in the Xilin River basin. Acta Botanica Sinica (植物学报), **40**: 955 ~ 961. (in Chinese with English abstract)
- Li, L. H. (李凌浩), Q. B. Wang (王其兵), Y. F. Bai (白永飞), G. S. Zhou (周广胜) & X. R. Xing (邢雪荣). 2000. Soil respiration of a *Leymus chinensis* grassland stand in the Xilin River basin as affected by over-grazing and climate. Acta Phytocologica Sinica (植物生态学报), **24**: 680 ~ 686. (in Chinese with English abstract)
- Li, L. H. (李凌浩), X. G. Han (韩兴国), Q. B. Wang (王其兵) & Q. S. Chen (陈全胜). 2002. Separating root and soil microbial contributions to total soil respiration in a grazed grassland in the Xilin River basin. Acta Phytocologica Sinica (植物生态学报), **26**: 29 ~ 32. (in Chinese with English abstract)
- Li, L. H., X. G. Han, Q. B. Wang & W. M. Bai. 2002. Soil carbon balance in a native temperate grassland in the Xilin River basin of Inner Mongolia. Acta Botanica Sinica (植物学报), **44**: 740 ~ 743.
- Lü, Y. Z. (吕贻忠), Y. P. Zhao (赵玉萍) & R. J. Xia (夏荣基). 1992. Characteristics of humus in chestnut soil at Xilin River valley, Inner Mongolia. Research on Grassland Ecosystem (草原生态系统研究), **4**: 171 ~ 179. (in Chinese)
- Norman, J. M., R. Garcia & S. B. Verma. 1992. Soil surface CO₂ fluxes and the carbon budget of a grassland. Journal of Geophysical Research, **97**: 18845 ~ 18853.
- Ojima, D. S., W. J. Parton, D. S. Schimel & J. M. O. Scurlock. 1993. Modeling the effects of climate and CO₂ changes on grassland storage of soil carbon. Water, Air and Soil Pollution, **70**: 643 ~ 657.
- Raich, J. W. & A. Tufekcioglu. 2000. Vegetation and soil respiration: correlations and controls. Biogeochemistry, **48**: 71 ~ 90.
- Singh, J. S. & S. R. Gupta. 1977. Plant decomposition and soil respiration in terrestrial ecosystems. The Botanical Review, **43**: 449 ~ 528.
- Zhang, A. G. (张爱国), H. C. Li (李鸿昌) & Y. L. Chen (陈永林). 1992. Studies of the food consumption and the damage to pasture caused by *Chorthippus dubius*. Research on Grassland Ecosystem (草原生态系统研究), **4**: 89 ~ 98. (in Chinese)

责任编辑:刘世荣 责任编辑:张丽赫