

高寒矮嵩草草甸大气-土壤-植被-动物系统碳素储量及碳素循环

张金霞, 曹广民, 周党卫, 胡启武, 赵新全

(中国科学院西北高原生物研究所, 青海 西宁 810001)

摘要:对高寒矮嵩草草甸生态系统中大气-土壤-植被-动物分室碳素储量及碳素循环进行了研究,结果表明,草毡寒冻锥形土土壤库 0~30cm 碳素储量为 247.30 t C/hm²。土壤 CO₂ 平均释放速率 70.94±54.76 kg/(hm²·d),年释放量为 6.630 t C/(hm²·a),比退化草地 4.620 t C/(hm²·a) 释放量高。植物包括根系总固碳量为 4.648 t C/(hm²·a),动物亚系统中,藏系绵羊个体同化的碳素为 7.562 kg C/(hm²·a)(成年羊),作为畜产品迁出生态系统。生态系统初级生产固碳量占每年土壤 CO₂ 释放量的 70.16%,占生长季土壤 CO₂ 释放量的 96.43%,退化草地土壤 CO₂ 释放量比初级生产固碳量要低。认为高寒矮嵩草草甸生态系统土壤是大气温室气体 CO₂ 的小的排放源。

关键词:矮嵩草草甸; 草毡寒冻锥形土; 碳素储量; 碳素循环

The carbon storage and carbon cycle among the atmosphere, soil, vegetation and animal in the *Kobresia humilis* alpine meadow ecosystem

ZHANG Jin-Xia, CAO Guang-Min, ZHOU Dang-Wei, HU Qi-Wu, ZHAO Xin-Quan
(Northwest Plateau Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810001, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(4): 627~634.

Abstract: Qing-Tibet Plateau is the highest land in the world as well as one of the most sensitive regions to global change. In order to discover its role in global warming, the carbon storage and carbon cycle were conducted at the Haibei Alpine Meadow Ecosystem Research Station, Chinese Academy of Sciences for three years (1998~2000). CO₂ concentration was tested with CID-301PS photosynthesis apparatus. The *Kobresia humilis* alpine meadow ecosystem was divided into four compartments: atmosphere, plant, soil

基金项目:国家重点基础研究专项经费资助项目(G1998040800);中国科学院知识创新工程资助项目(KSCX2-01-07);国家自然科学基金资助项目(30070147);中国科学院海北高寒草甸生态系统定位站基金资助项目

收稿日期:2001-09-28; **修订日期:**2002-10-30

作者简介:张金霞(1942~),女,河北人,研究员,主要从事化学生态学和物质循环方面的研究工作。

致谢:感谢美国 F. Dickinson University Professor Judy H. Manton 和高原生物研究所特聘加拿大教授萧亦雄博士对全文的指正。

Foundation item: This work was supported by grants from the Special Funds for Major State Basic Research of China (G1998040800), Knowledge Innovation Project of the Chinese Academy of Sciences (KSCX2-01-07), the National Natural Sciences Foundation of China (30070147) and project of Haibei Alpine Meadow Research Station of the Chinese Academy of Sciences

Received date: 2001-09-28; **Accepted date:** 2002-10-30

Biography: ZHANG Jin-Xia, Professor, engaged in chemical ecology and elements cycle.

Thanks for American F. Dickinson University Professor Judy H. Manton and Canadian professor Andrew Tsiao revising the paper.

and animal. The CO₂ concentration was measured only in the air of plant canopy (20 cm above the ground). In soil compartment, organic carbon storage, physical and chemical properties of soil were assayed at 0~10 cm, 10~20 cm and 20~30 cm in Mat Cryic Cambisols soil. Moreover, the CO₂ releasing rate and amount were also measured. The results indicated that the carbon storage was 247.30 t C/hm² in 0~30 cm soil depth and the average emission rate of carbon dioxide of soil was 70.94 ± 54.76 kg/(hm² · d). The emission quantity of CO₂ was 6.63 t C/(hm² · a) from soil, but it appeared negative in winter. It was higher than that in degraded areas (4.62 t C/(hm² · a)). The fixed carbon of the plant was 4.648 t C/(hm² · a) calculated through analysis of the biomass and content of carbon of plant aboveground and underground. We further calculated the result of carbon metabolism moving out of ecosystem and released into the atmosphere of every mature Tibetan sheep through an analysis of the content of protein, fat and hydrocarbon. The carbon assimilated by Tibetan sheep was 7.562 kg C/(hm² · a) transferred out from this ecosystem as livestock products. The fixed carbon by animal compartment occupied a small part in the ecosystem. It could be neglected. The total amount of fixed carbon was 70.16% of the annual soil emission and covered 96.43% of that in the plant growing season. So the carbon balance could be calculated in the alpine meadow ecosystem. According to the formula, the result of net productivity of the ecosystem was below zero. The carbon released from the soil was more than that of primarily net productivity. It may suggest that the greenhouse gas CO₂ was a small releasing source in the alpine meadow ecosystem.

Key words: *Kobresia humilis*; alpine meadow; Mat Cryic Cambisols; carbon storage; carbon cycle

文章编号:1000-0933(2003)04-0627-08 中图分类号:Q948.1 文献标识码:A

温室气体浓度升高引起全球气候变暖,特别是 CO₂、CH₄和 N₂O 增高显著,在 20 世纪 40 年代后期至 80 年代中期,其幅度分别 30%、145%、15%,目前增长率仍与 80 年代类似^[1]。气候变暖对陆地碳循环具有重要的影响。陆地生态系统是大气温室气体的源或库^[2,3],有研究表明由于气候变化导致陆地生态系统净吸收大量 CO₂^[4,5],在北半球中高纬度地区,森林生态系统是大气 CO₂ 的汇^[6],但近十几年来,研究表明陆地生态系统是大气温室气体的源^[7]。草地生态系统被认为是碳的源和汇基本平衡^[8]。在过去 20a 中,冻原将由一个 CO₂ 的净汇转化为向大气排放 CO₂ 的净源^[9]。在草地和干旱地区仍是一个碳的净源^[10]。也有学者认为草地是一个碳的净汇^[11,12]。草原牧场储存了世界活的和死的生物总碳量的 26%。在北极冻源地区,碳储量的范围是 16~94 kgC/m³^[13]。

被称为世界第三极的青藏高原有 10 a 左右为特征尺度的气候变化,是最早出现气候异常的地区之一,高原地区海拔越高升温愈明显。因而青藏高原是全球气候变暖的敏感区域,也是全球大气温室气体的启动区^[14]。因此,研究青藏高原对全球大气温室气体的贡献和影响,具有极其重要的意义。

高寒矮蒿草草甸广布于青藏高原东部,约占青藏高原面积的 33%,是高原地带性与山地垂直地带性的主要植被类型,也是青藏高原主要的放牧草场。高寒矮蒿草草甸植被下的草毡寒冻雏形土有机质含量极为丰富(7%~16%),是碳素的巨大储存库。高寒草甸碳素储量是多少?高寒草甸究竟是大气温室气体的源还是汇?是当前急待研究的生态学前瞻课题。该项研究主要对高寒矮蒿草草甸生态系统碳素储量及其碳素循环作以详细研究。为高寒草甸生态系统对大气温室的贡献作用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地区的环境状况

试验设置在中国科学院海北高寒草甸生态系统定位站(37°29'~37°45'N,101°12'~101°33'E,3250 m),该站位于青藏高原东北隅的祁连山谷地。属典型的高原大陆性气候,生态环境严酷。太阳辐射强,日照充足,但热量低,温度变化剧烈,气温年温差(20~26℃),日温差(14~17℃),冷季干冷而漫长,暖季温润而短暂,年平均气温为-1.9℃。绝对最高气温<25℃,绝对最低气温可降至-37℃。20 世纪 80 年代平均气

温较 1957~1996 年 40a 平均气温偏高 0.3℃,海北站地区气温升高趋势比全国乃至全球升温更明显,近年来以 0.062℃/a 趋势升温^[15]。年平均降水 618mm,主要集中于夏季(5~9 月份),占年降水的 80%左右。植物生长季,雨热同期,有利于植物生长。

研究区域土壤类型为草毡寒冻雏形土。土壤季节冻融变化和昼夜融冻交替明显,土壤微生物活动微弱,以致死亡根系和枯枝落叶难以分解积累于土壤表层,形成根系盘根错结的草毡表层。此类土壤物质风化程度较弱,有机物质及全量养分含量丰富。未退化草毡寒冻雏形土的草毡表层发育良好,没有发生剥蚀脱落,鼠类活动很少,地表鼠丘罕见。退化草地植被优势种群严重退化,其植被演替为杂类草。鼠类活动频繁,草毡表层严重剥蚀,植被盖度降至 30%~50%,更甚者可降至 5%~20%,土层裸露退化为“黑土滩”。

青藏高原高寒草甸区域植物生长期短促,草丛低矮,生物量低,该实验选择了高寒矮嵩草草甸植被类型。高寒矮嵩草草甸是长期适应于高寒生态环境而形成的耐寒中生植物,植物群落以矮嵩草(*Kobresia humilis*),羊茅(*Festuca ovina*),垂穗披碱草(*Elymus nutans*),早熟禾(*Poa* sp.),恰草(*Koeleria cristata*),藏异燕麦(*Helictotrichon tibeticum*),小嵩草(*K. pygmaea*),苔草(*Carex* sp.),二柱头草(*Scirpus distigmaticus*),麻花苣(*Gentiana straminea*),线叶龙胆(*Gentiana farreri*),矮火绒草(*Leontopodium nanum*),雪白萎陵菜(*Potentilla nivea*),美丽风毛菊(*Sacssurea superba*)建群。草质营养丰富,热值含量较高,是青海省主要的牧草资源。

1.2 研究方法

- 该项研究将高寒矮嵩草草甸生态系统分为大气、土壤、植被、食草动物 4 个分室。
- (1)大气分室 在测定土壤 CO₂排放的同时测定了近地表 20 cm(未剪去地表植物)的 CO₂浓度。
- (2)土壤分室 土壤分室碳素储量 测定了高寒矮嵩草草甸 0~10 cm,10~20 cm,20~30 cm,30~40 cm,土壤有机碳含量及碳酸钙含量,以不同土壤深度的容重计算出土壤碳素的总储量。
- 1997~1999 年用 CID-301PS 光合作用测定仪的 Absolute 功能进行测定,仪器与箱体间采用密闭回流式连接方法。实验设置 3 个重复,每次测定前 1 天,用标准 CO₂ 气校准仪器。进行土壤温室气体 CO₂ 的排放规律测定^[16]。同时测定了土壤的理化性质(表 1)。土壤有机碳含量用重铬酸钾氧化-外加热法,全氮用半微量开氏法,全磷用硫酸-高氯酸消解-钼锑抗比色法测定。
- (3)植被分室 测定了植物地上和地下生物量,地上分别测定了绿色植物、立枯和凋落物的生物量,并分别测定了植物各部分的有机碳含量。根据植物地上和地下根系及立枯和凋落物的生物量及碳含量计算得到植被分室的碳储量。
- (4)动物分室 将以往动物组测定的藏系绵羊采食量^[17],排泄量^[17],呼吸量^[18]及藏系绵羊出栏的平均体重和其各部位的蛋白质、脂肪和碳水化合物的含量,按下式计算藏系绵羊出栏时平均个体碳含量:

$$C = \text{蛋白质} \times 53\% + \text{脂肪} \times 76\% + \text{碳水化合物} \times 47\%$$

将其个体碳含量乘以不同的放牧强度计算得到其储量。利用各分室的储量及其生物循环特征计算得到流通量。

表 1 草毡寒冻雏形土的基本理化性状

Table 1 Chemical and physical properties of the Mat Cryic Cambisols									
土壤深度		容重 Bulk	孔隙度	有机碳	无机碳	胡敏酸	富啡酸	全氮	全磷
Soil depth	pH	density	Porosity	Organic	Inorganic	H. A.	F. A.	Total N	Total P
(cm)		(g/cm ³)	(%)	carbon (%)	carbon(%)	(g/kg)	(g/kg)	(%)	(%)
0~10	8.0	0.88	59.4	7.27	0.50	4.41	5.44	0.532	0.094
10~20	8.5	1.19	44.2	3.32	4.09	5.14	1.92	0.331	0.091
20~30	8.7	1.16	55.7	2.65	5.65	5.14	1.92	0.271	0.086
30~40	8.7	1.25	58.2	2.20	3.18	1.39	1.19	0.214	0.077

2.1 大气中 CO₂ 的浓度

瓦里关山测定的距地表 10 m 大气 CO₂ 年平均浓度为 $360.5 \pm 3.07 \text{ mg/kg}^{[19]}$, 高寒矮蒿草甸近地表 20 cm 测定数据平均为 $399.88 \pm 22.50 \text{ mg/kg}$, 比大气 CO₂ 浓度年平均高 39.38 mg/kg , 在植物生长季较大气 CO₂ 浓度高出 60.05 mg/kg (5~10 月份平均)。

2.2 土壤库碳素

2.2.1 草毡寒冻雏形土土壤中碳素储量 土壤中总碳量是有机碳和无机碳量的总和, 大部分有机碳存在于土壤有机质部分, 而无机碳则主要在碳酸盐矿物中。土壤有机质在碳素循环中具有重要的作用, 它是大气中 CO₂ 的主要来源, 并且也是受气候和大气 CO₂ 浓度变化影响的碳库。高寒矮蒿草甸覆被下的草毡寒冻雏形土, 根系是土壤有机碳的主要来源。根系生物量近似地上生物量的 8 倍^[20], 这是高寒地区多年生植物适应其生态环境的主要特征。由于草毡表层的形成, 表土层根系生长补给和死亡分解间数量不平衡而引起草毡状有机物质的大量聚积。因而使其有机质含量极为丰富, 草毡寒冻雏形土有机碳含量为 $6.65\% \pm 0.65\%$, 且随土壤剖面深度的增加而递减。退化草毡寒冻雏形土有机碳含量比正常土壤的含量要低, 土壤表层损失 0.050 t C/hm^2 。深层土壤有机碳损失不明显。草毡寒冻雏形土中有机碳 (0~30cm) 为 128.7 t C/hm^2 , 无机碳为 118.6 t C/hm^2 , 总碳储量为 247.3 t C/hm^2 或 46.86 kg/m^3 , 与冻原的碳储量 $16\sim94 \text{ kg/m}^3$ 相比^[13], 高寒草甸地区碳的储量在中间范围。

草毡表层中有机土壤物质按分解程度可分为交织盘结的活根和未分解的或分解程度很低的有机土壤物质和处于不同分解阶段的半分解的有机土壤物质, 分解程度很高或由微生物合成的腐殖物质 3 部分组成。表 2 显示出草毡寒冻雏形土的有机物质各部分组成的储量及剖面分布。从表 2 可见, 活根、死根及粗有机物主要集中于 0~10 cm 土壤表层中, 而腐殖物质在剖面中变化不明显。腐殖物质在总有机物中占有相当比重 (87.9%), 腐殖物质与活根加死根及粗有机物的比值随剖面深度增加而增加, 说明随剖面深度加深, 相对稳定的腐殖物质在有机物中的比重增加。

表 2 草毡寒冻雏形土有机物质储量及剖面分布

Table 2 The storage and profile distribution of organic matter in Mat Cryic Cambisols					
深度 Depth(cm)	活根 Live root (kg/m ²)	死根及粗有机物 Dead root and hemist(kg/m ²)	腐殖物质 Humic matter (kg/m ²)	有机物质总量 Total O. M (kg/m ²)	腐殖质/活根+死根 Ratio of humic and roots
0~10	2.09	0.731	6.125	8.946	2.17
0~20	0.24	0.317	7.395	7.952	13.28
20~30	0.11	0.026	3.378	3.514	24.84
30~50	0.09	0.015	6.757	6.862	64.35
剖面总量 Total profile amount	2.53	1.089	23.66	26.914	
占有机物总量% Ratio to total O. M.	9.4	4.05	87.91		

* 此数据为 1999 年海北高寒草甸生态系统定位站的综合观测场数据 The data was collected in comprehensive observation place in Haibei Alpine Meadow Ecosystem Research Station in 1999

2.1.2 土壤碳素的释放 草毡寒冻雏形土土壤 CO₂ 的释放具有明显的日变化和季节动态^[16], 以植物生长旺季 7~8 月份释放量最高 (图 1), 符合植物在 7~8 月份光合产量最高的特点。冬季释放速率最低^[21]。CO₂ 的释放与气温和地温呈极显著的相关关系^[16]。植物活体生物量与土壤 CO₂ 的释放具有极显著的正相关关系 ($r^2=0.8619 \ n=10$)。植物生长季土壤 CO₂ 的释放平均为 $0.109 \pm 0.044 \text{ t/(hm}^2 \cdot \text{d)}$, 在非生长季仅为 $0.024 \pm 0.001 \text{ t/(hm}^2 \cdot \text{d)}$ 。全年平均释放 $0.071 \pm 0.055 \text{ t/(hm}^2 \cdot \text{d)}$ ^[15]。

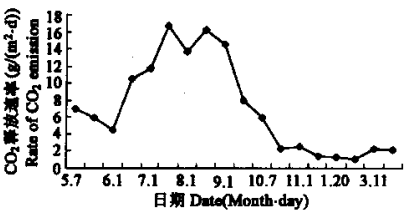


图 1 草毡寒冻雏形土土壤 CO₂ 释放的季节动态

Fig. 1 Seasonal variation of CO₂ emission from Mat Cryic Cambisols

表 3 列出了高寒矮嵩草草甸及退化矮嵩草草甸土壤 CO₂ 的释放的最大值和最小值,在植物非生长季,土壤呈现出了负释放,说明此时土壤吸收大气中的 CO₂。高寒矮嵩草草甸出现负排放的时期可持续 39d。退化矮嵩草草甸土壤 CO₂ 出现负排放的时期可持续 62d 有余^[21]。因而使其年释放量有显著的差异。草毡寒冻雏形土 CO₂ 的释放通量以表 4 表示^[21]。

2.2 植被系统中的碳素

高寒草甸生态系统对矮嵩草草甸地上净生产量进行了长期监测。该文利用王启基 1980~1993 的初级生产资料,其平均值为 3.420±0.519 t/(hm²·a)^[22],与 1999 年测定数据 3.290 t/(hm²·a)比较接近。计算了植物地上部分碳储量为 1.265±0.189tC/(hm²·a),相当于吸收 4.640tCO₂/(hm²·a),加上当年凋落物中的碳量 0.396 t C/(hm²·a),植物地上部分总的碳储量为 1.662 t C/(hm²·a)。

表 3 草毡寒冻雏形土土壤 CO₂ 的释放的最大值和最小值

Table 3 Maximum and minimum values of CO₂ emission from Mat Cryic Cambisols

土壤类型 Soil types	日期 Date	最大值 Max values	日期 Date	最小值 Min values
		(g/(m ² ·d))		(g/(m ² ·d))
草毡寒冻雏形土 Mat Cryic Cambisols	8月6日 Aug. 6th	14.23	1月16日 Jan. 16th	-1.58
退化草毡寒冻雏形土 Degraded Mat Cryic Cambisols	8月10日 Aug. 10th	10.02	1月21日 Jan. 21st	-2.70

表 4 草毡寒冻雏形土土壤 CO₂ 的释放通量(t/(hm²·a))

Table 4 Annual amount of CO₂ emission from Mat Cryic Cambisols

土壤类型 Soil types	生长季 Growth season		非生长季 Rest period		全年 Whole year		占土壤库总储量(%) Percent of total storage in soil pool
	CO ₂	C	CO ₂	C	CO ₂	C	
草毡寒冻雏形土 Mat Cryic Cambisols	17.696	4.826	6.615	1.804	24.311	6.630	2.68
退化草毡寒冻雏形土 Degraded Mat Cryic Cambisols	11.913	3.249	5.028	1.371	16.941	4.620	1.87

立枯 绿色植物在生长期结束后仍直立于地上枯黄的植物。它们不再进行光合作用,除少量分解外,部分营养物质向地下转移,储存于根部。为来年植物生长提供养分来源。因此,立枯草中的营养成分均有所降低。矮嵩草草甸以 9 月份立枯的最大生物量乘以碳含量得到立枯中碳的储量为 1.108 t/(hm²·a),当年植物光合作用所固定碳的 12.48% 转移到地下根系部分或部分转化到根际土壤中。

凋落物 地上植物大部分茎叶为饲草动物所消耗,少数干枯植物落于地表,或有一些经风吹雨打,牲畜践踏脱落于地表的植物形成凋落物。凋落物生物量具有明显的季节波动,它的积累与分解直接影响碳素向土壤的归还动态。矮嵩草草甸凋落物以测定年凋落物的最大生物量减去上年的残留量为最大凋落物量乘以碳素含量为当年凋落物中的碳储量为 0.396 t/(hm²·a)。凋落物年分解率以 46.39% 计算^[23],其中 0.212 t/(hm²·a)归还于土壤中,0.184 t/(hm²·a)的碳分解掉,以 CO₂ 的形式排放于大气中。

高寒草甸生态系统中根系是土壤中主要的碳源,草毡寒冻雏形土有机物主要来源于植物地下器官,根系死亡后就地归还土壤。植物根系随植物生育期的不同有明显的季节变化,根系的生物量是动态的,死亡根系归还量也是动态的。高寒草甸地下净生物量以 6.620 t/(hm²·a) 计^[20],在根系中碳的储量为 2.983 t/(hm²·a)。以王启基等在定位站多年研究结果,活、死根的比例 7:3^[20],计算得出活根中的碳储量为 2.088 t/(hm²·a),死根中的碳量为 0.895 t/(hm²·a)。根系中每年固定的碳是地上部分的 2.37 倍。新死亡根系每年按 42.91% 分解^[23],则分解掉的碳素为 0.384 t/(hm²·a),归还于土壤中的碳素 0.511 t/(hm²·a)。植物地上地下归还量占土壤库碳素的 0.293%。

2.3 食草动物中的碳素

藏系绵羊是青藏高原主要的畜牧业品种之一,高寒草场历年来实行夏秋草场和冬春牧场轮牧。该研究选择的是冬春牧场放牧天数为 245d(10 月份~翌年 5 月份)。按出栏时羊体的平均体重(41.75 kg/只羊)及羊体各部位蛋白质、脂肪及碳水化合物的含量,计算出羊体各部位蛋白质、脂肪及碳水化合物的重量。用

动物分室给出的公式进一步计算出同化碳素量为 3.361kg C/只羊(成年羊)。作为畜产品迁出生态系统。若按 4 岁羊轻度放牧(2.25 只羊/hm²)计算,占初级生产的 0.598%,与牧草向藏羊种群营养层次的能量转化年度平均生态效率为 0.59% 相近^[24]。每只羊同化碳素量占其摄取量的 0.611%,而通过呼吸释放的碳素量为 0.077 t C/(hm²·a),占其摄取量的 25.01%,粪尿中的碳素除一部分分解,另外 50%作为燃料燃烧以外,其余粪尿中的碳素都返还到土壤中(0.020 tC/(hm²·a))。显然,动物亚系统中迁出系统之外的碳素占有很小的份额,排放到大气和返还到土壤中的碳素较多。大气-土壤-植被-动物系统碳素循环以图 3 表示。

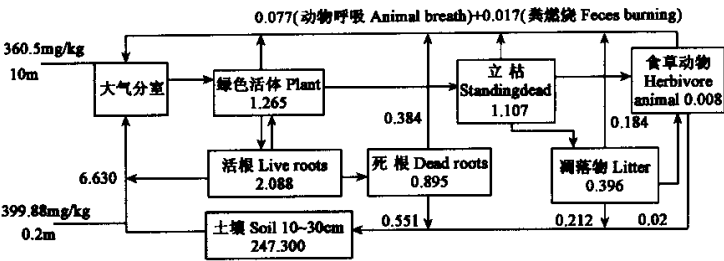


图 2 高寒草甸生态系统碳素循环

Fig. 2 The carbon cycle in alpine meadow ecosystem

植物地上部分和植物根系总固定碳素量为 4.648t/(hm²·a),为每年土壤 CO₂ 释放量的 70.10%。为植物生长季释放碳素量的 96.43%,植物生长季土壤 CO₂ 释放量基本与植物固定碳素量相当或稍有余。在植物非生长季,植物不再进行光合作用,土壤向大气净排放碳素(1.804t/(hm²·a))。动物亚系统通过呼吸排放到大气的碳素为 0.077 t C/(hm²·a)。

高寒草甸生态系统中碳平衡可以用下式表示:

$$NEP = NPP - RS$$

NEP 为高寒草甸生态系统的净生产; NPP 为高寒草甸生态系统的初级生产; RS 为土壤 CO₂ 释放量。

根据测定结果,NEP = 4.648 t C/(hm²·a)~6.630 t C/(hm²·a) = -1.982 t C/(hm²·a)

NEP 为负值,土壤排放 CO₂ 的量比初级生产固定碳素量要大。可以认为是大气温室气体小的排放源。在植物生长季 NEP = -0.181 t C/(hm²·a),土壤排放 CO₂ 的量比初级生产固定碳素量稍大,在植物非生长季土壤向大气净排放 CO₂。

植物地上部分固碳量占土壤库总碳量的 0.67%,根系净生物量中固定的碳占土壤库总碳量的 1.17%,土壤呼吸包括根系呼吸所释放的碳素占土壤库 2.68%。

3 讨论

高寒草甸生态系统由于气候恶劣,生态环境严酷,牧草生长期短,光能利用率低,致使初级生产力水平低下,因而限制了畜牧业生产。从整个生态系统分析,生态系统总排放量为 6.891 t C/(hm²·a),其中包括土壤释放量(包括根系呼吸),凋落物的分解量以及藏系绵羊的呼吸量。初级生产总固碳量 4.648 t C/(hm²·a),占生态系统排放量的 67.45%。显然,高寒草甸生态系统是大气温室气体 CO₂ 的排放源。而退化草地土壤释放的碳素为 4.620 t C/(hm²·a),比初级生产固定的碳素量稍低。可以认为退化高草草地是大气温室气体 CO₂ 的汇。从以上分析高寒矮高草草甸或退化草地无论是大气温室气体 CO₂ 的排放源或是汇,都是一个小源或小汇,即在平衡点附近呈较小的上下波动,因年际气候变化而有所不同。由于植物生物量受温度和水分驱动,年间变动较大。气温较高,水分条件较好的年景,植物初级生产力提高,则高寒矮高草草甸可能是大气 CO₂ 的汇,否则,有可能是大气温室气体 CO₂ 的排放源。

在植物非生长季,草毡寒冻锥形土土壤 CO₂ 呈现出负排放,说明了大气中此时 CO₂ 的浓度较土壤 CO₂ 的浓度高,土壤吸收空气中的 CO₂。高原上气候极为恶劣,由于气候状况和各种客观条件的限制,往往由于

缺测或误测,使得日测定频次较少或减少时段划分不同等给日释放量估测带来误差。因此,曹广民和张金霞等应用一元四次多项式对两年的测定结果进行了拟合,并用积分法对草毡寒冻雏形土土壤 CO_2 释放量进行了估算^[16,25],发现负排放的时间可持续 39d,并在不同草甸利用格局中都有所表现^[21]。这可能与气象条件,特别是温度和水分的年变化有关。在夏半年(5~9 月份),草毡寒冻雏形土土壤的平均含水量为 36.0%。水分充足且水热同期,土壤微生物和根系等活性高,土壤向大气中释放 CO_2 活跃。在冬半年,由于气温降低,土壤冻结,且深度逐渐加深。例如 11 月份,土壤达到稳定冻结,最深可达 2m。冬季土壤水分向冻结层聚集,结成冰晶,使其土壤含水量较高。 CO_2 在水中的溶解度随温度升高而降低,在 0℃ 和 1 个大气压下 1L 水中溶 1.71L CO_2 ,而在 20℃ 1L 水仅溶解 0.88L CO_2 。在水中 CO_2 呈离子化状态,可能被积聚在冻土层中。测定 1 月份土壤 CO_2 排放最低,3、4 月份比 1、2 月份稍高。而 5 月份由于气温回升,土壤的冻融交替也比较明显,土壤的蒸发量随之增高,土壤的空隙度变大,有利于冻结层中积聚的 CO_2 的排放。高寒草甸气温最冷的元月份极值为 -21.7℃,土壤温度 5cm 最低为 -13.4℃,10cm 最低为 -12.1℃,20cm 最低为 -9.8℃,土壤温度滞后于气温,却没有气温变化剧烈。当土壤表层气温相当低时,土壤底层逐渐向上部传递热量。冬季由于气温很低,土壤温度相应较低。此时土壤微生物和根系呼吸基本停止,土壤空气中没有 CO_2 累积,致使土壤空气与大气基本处于平衡。此时,大气中的 CO_2 向土壤扩散,被土壤所固定,其机理有待于进一步深入研究。

References:

- [1] Houghton J T, Meira Filho L G, Callander B A, *et al.* *The science of climate change*, *Climate Change* 1995. Cambridge UK: Cambridge University Press, 1996. 467.
- [2] Christensen T R, Janasson S, Callaghan T V, *et al.* On the potential CO_2 release from tundra soils in a changing climate. *Applied Soil Ecology*, 1999, **11**: 127~134.
- [3] Oechel W C, Hastings S J, Vourlitis G L, *et al.* Recent change of arctic tundra ecosystems from a net carbon dioxide sink to a source. *Nature*, 1993, **361**: 520~523.
- [4] Yang X, Wang M X, Huang Y. Modeling study of terrestrial carbon flux response to climate change I. Past century. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, **22**(2): 270~277.
- [5] Dai A, Fung I Y. Can climate variability contribute to the "missing" CO_2 sink? *Global Biogeochem. Cycles*, 1993, **7**: 599~609.
- [6] Wang X K, Bai Y Y, OuYang Z Y, *et al.* Missing sink in global carbon cycle and its causes. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, **22**(1): 94~103.
- [7] Battle M, Bender M L, Tans P P, *et al.* Global carbon sinks and their variability inferred from atmospheric O_2 and $\delta^{13}\text{C}$. *Science*, 2000, **287**: 2467~2470.
- [8] Frank A B, Dugas W A. Carbon dioxide fluxes over a northern semiarid mixed-grass prairie. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, **108**: 317~326.
- [9] Lin E D, Li Y E. *Global climate changes and method of green house gases list design*. Beijing: Meteorology Press, 1997. 1~11.
- [10] Dennis S O. Modeling the effects of climatic and CO_2 changes on grassland storage of soil C. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1993, **70**: 643~657.
- [11] Matthias D, Christian K. Transient enhancement of carbon uptake in an alpine grassland ecosystem under elevated CO_2 . *Arctic and Alpine Research*, 1998, **30** (4): 381~387.
- [12] Steven F O, Chris T G, Cheng W, *et al.* Diurnal and seasonal Patterns of ecosystem CO_2 efflux From upland tundra in the foothills of the brooks range, *Arctic and Alpine Research*, 1996, **28** (3): 328~338.
- [13] Michaelson G J, Ping C L. Carbon storage and distribution in tundra soils of Arctic Alaska, U. S. A. *Arctic and Alpine Research*, 1996, **28** (4): 414~424.
- [14] Gao X Q. Preliminary analysis of climate changes in some regions of north part of Qinghai-Xizang Plateau in decade-year scale. In: Experts committee of Qinghai-Xizang ed. *Formation and Evolution, Environmental Changes and Ecosystem on the Tibetan Plateau*. Beijing: Science Press, 1994. 297~303.
- [15] Li Y N, Shen Z X. The study on tendency of air temperature changes of Haibei research station of alpine meadow ecosystem about lately 40 years. *Proceeding of Resource, Ecology and Environment Network*. 1999, **103**: 28~31.
- [16] Zhang J X, Cao G M, Zhou D W, *et al.* Carbon dioxide emission of Mat cryo-sod soil in the Haibei alpine meadow

- ecosystem, *Acta Ecologica Sinica*, 2001, **21** (4): 544~549.
- [17] Pi N L. Energy dynamics of the population of sheep in alpine meadow ecosystem. I. Measurement of the daily food intake, faeces and urine of Tibetan sheep. In: Xia W P, ed. *Alpine Meadow Ecosystem*. Lanzhou: Gansu People's Publishing House, 1982. 67~72.
- [18] Zhao X Q, Pi N L. Studies on energy metabolism of ruminants III. Measurement of the metabolizable energy enquirement for the maitainance of Tibetan sheep. In: Northwest Plateau Biology Institute of CAS, ed. *The Proceedings of the International Symposim of Alpine Meadow Ecosystem*. Beijing: Science Press, 1989. 117~122.
- [19] Wen Y P, Tang J, Shao Z Q. Characteristic of atmosphereic carbon dioxide concentration variation and effect of soil surface emission at MT. Wa li Guan, *Quarterly Journal of Applied Meteorology*, 1997, **8**(2): 129~136.
- [20] Wang Q J, Yang F T, Shi S H. A prelimilary study on formation of belowground biomass in *Kobresia humilis* meadow, In: Northwest Plateau Biology Institute of CAS, ed. *The Proceedings of the International Symposium of Alpine Meadow Ecosystem*. Beijing: Science Press, 1988. 73~82.
- [21] Cao G M, Zhang J X, Li Y N, *et al.* Values of carbon dioxide emission from different land -use pattern of alpine meadow, *Environmental science*, 2001, **22** (6): 14~19.
- [22] Wang Q J, Wang W Y, Deng Z F. The dynamics of biomass and the allocation of energy in alpine *Kobresia* meadow communities, Haibei region of Qinghai Province, *Acta Phytocologica Sinica*. 1998, **22**(3): 222~230.
- [23] Li J Z, Zhu G R, Yang T. Studies on decomposition of plants of cellulose root and litter of the alpine meadow. *Acta Biologica Plateau Sinica*, 1984, **2**: 107~113.
- [24] Zhou L, Wang Q J, Zhao X Q. Studies on the optical structure of production for alpine pasturelands. I. The optimal structure of production to maximize the output energy of livestock products for the population of Tibetan sheep, In: Liu J K and Wang Z W, eds. *Alpine Meadow Ecosystem*. Beijing: Science Press, 1991. Fasc. **3**: 285~310.
- [25] Cao G M, Zhang J X, Zhao X Q, *et al.* Methods of estimating CO₂ emission from Mat Cryo-sod soil. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, **39**(2): 261~266.

参考文献:

- [4] 杨昕, 王明星, 黄耀. 地-气间碳通量气候响应的模拟 I. 近百年来气候变化. *生态学报*, 2002, **22**(2): 270~277.
- [6] 王效科, 白艳莹, 欧阳志云等. 全球碳循环中的失汇及其形成原因. *生态学报*, 2002, **22**(1): 94~103.
- [9] 林而达, 李玉娥. 全球气候变化和温室气体清单编制方法. 北京: 气象出版社, 1997. 1~11.
- [14] 高晓清. 青藏高原北部若干地点 10 年尺度气候变化的初步分析. 青藏高原形成演化、环境变迁与生态系统研究. 北京: 科学出版社, 1994. 297~303.
- [15] 李英年, 沈振西. 近 40 年海北高寒草甸生态系统定位站气温变化特征. 资源生态环境网络动态. 1999, **103**: 28~31.
- [16] 张金霞, 曹广民, 周党卫, 等. 草毡寒冻锥形土壤 CO₂ 释放特征. *生态学报*, 2001, **21**(4): 544~549.
- [17] 皮南林. 高寒草甸生态系统绵羊种群能量动态的研究. 高寒草甸生态系统 第 1 集. 兰州: 甘肃人民出版社, 1982. 117~122.
- [18] 赵新全, 皮南林. 反刍动物气体能量代谢研究. 高寒草甸生态系统国际学术讨论会论文集. 北京: 科学出版社, 1989. 117~122.
- [19] 温玉璞, 汤洁, 邵志清. 瓦里关山大气二氧化碳浓度变化及地表排放影响的研究. *应用气象学报*, 1997, **8**(2): 129~136.
- [20] 王启基, 杨福园, 史顺海. 高寒矮嵩草草甸底下生物量形成规律的初步研究. 高寒草甸生态系统国际学术讨论会论文集. 北京: 科学出版社, 1988. 73~82.
- [21] 曹广民, 张金霞, 李英年, 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.
- [22] 王启基, 王文颖, 邓自发. 青海海北地区高山嵩草草甸植物群落生物量动态及能量分配. *植物生态学报*, 1998, **22** (3): 222~230.
- [23] 李家藻, 朱桂如, 杨涛. 高寒草甸植物的纤维素、根和枯枝落叶分解作用的研究. *高原生物学集刊*, 1984, **2**: 107~113.
- [24] 周立, 王启基, 赵新全. 高寒牧最优生产结构的研究. 高寒草甸生态系统, 北京: 科学出版社, 1991, **3**: 285~310.
- [25] 曹广民, 张金霞, 赵新全, 等. 草毡寒冻锥形土壤 CO₂ 释放量估测方初探. *土壤学报*, 2002, **39**(2): 261~266.