

高寒草甸不同土地利用格局土壤 CO₂ 的释放量

曹广民,李英年,张金霞,赵新全(中国科学院西北高原生物研究所,西宁 810001)

摘要:分析高寒草甸不同土地利用格局下土壤 CO₂ 的释放量大小表明,在植物生长季的 5~9 月,土壤 CO₂ 释放量大小排序为:金露梅灌丛草甸(1871.40g/m²)>矮嵩草草甸(1769.63g/m²)>退化金露梅灌丛草甸(1495.60g/m²)>退化矮嵩草草甸(1191.26g/m²);而在植物非生长季的 10 月到翌年 4 月,其土壤 CO₂ 释放量大小与植物生长季略有差异,表现出矮嵩草草甸(661.46g/m²)>金露梅灌丛草甸(550.90g/m²)>退化矮嵩草草甸(502.50g/m²)>退化金露梅灌丛草甸(384.50g/m²)的特点;全年内表现为矮嵩草草甸(2431.09g/m²)>金露梅灌丛草甸(2422.30g/m²)>退化金露梅灌丛草甸(1880.10g/m²)>退化矮嵩草草甸(1694.06g/m²)。高寒草甸地区不同土地利用格局土壤 CO₂ 释放数量的差异及季节变化,不仅与各利用格局的土壤生物活性及土壤物理化学性状有关,而且与气象条件(特别是温度)及其土壤冬季冻结期长短关系极为密切。

关键词:高寒草甸;土地利用格局;CO₂ 释放量

中图分类号:X511 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2001)06-06-0014

Values of Carbon Dioxide Emission from Different Land use Patterns of Alpine Meadow

Cao Guangmin, Li Yingnian, Zhang Jinxia, Zhao Xinquan(Northwest Plateau Institute of Biology, the Chinese Academy of Sciences, Xining 810001, China)

Abstract: The value order of carbon dioxide emission from different land use of alpine meadow was significantly with season changing. It was found that the *Potentilla fruticosa* shrub meadow (C, 1871.40g/m²) > *Kobresia humilis* meadow (A, 1769.63g/m²) > Degraded *Potentilla fruticosa* shrub meadow (D, 1495.60g/m²) > Degraded *Kobresia humilis* meadow (B, 1191.26g/m²) during growth season, A(661.46g/m²) > C(550.90g/m²) > B(502.50g/m²) > D(384.50g/m²) in rest period; and A(2431.09g/m²) > C(2422.30g/m²) > D(1880.10g/m²) > B(1694.06g/m²) for whole year, separately. This difference not only decided the soil microbial activity and soil characters, but also have the closely relationship to shortage of frozen period.

Key words: alpine meadow; land use patterns; values of carbon dioxide emission

陆地生态系统由于其面积巨大,碳循环过程复杂多样,致使对大气温室气体浓度的变化及作用过程错综复杂。为此人们对土壤温室气体,如 CO₂、CH₄、NO₂ 等的重要发生源给予了高度重视^[1,2]。不少研究者认为,全球大气中约有半数的 CH₄ 及 N₂O,30% 的 NO₂ 及 NH₄ 的温室气体来自土壤,土壤及土地利用是全球 75% 的 CH₄、50% 的 N₂O 及 NH₄ 等温室气体的主要来源^[3~6]。

CO₂ 是大气温室气体的重要组成部分,由于其强烈的温室效应倍受人们关注。青藏高原地域辽阔,高寒草甸又是分布的主要植被类型,其土壤有机质含量高达 10%~17%,区域常年处于低温、土壤潮湿的水分状况^[7]。过去人们普遍认为广布于青藏高原的高寒草甸

分布区气候寒冷,有利于土壤有机碳的积累,而不利于它的矿化分解,较多的得出高寒草甸地区是大气温室气体 CO₂ 汇的观点。然而随着全球气候变暖,有关报道认为,过去的冻原已从一个 CO₂ 净汇转化为向大气释放 CO₂ 的净源^[8~10]。L. Kwrganova 曾观测估算了俄罗斯北泰加潜育土和南泰加泥炭土土壤 CO₂ 年释放通

基金项目:国家重点基础研究专项经费项目(GI998040800);中国科学院知识创新项目(KSCX2-1-07);国家自然科学基金项目(30070147);中国科学院北海高寒草甸生态系统定位站基金项目
作者简介:曹广民(1964~),男,大学本科,副研究员,主要从事草地生态系统物质循环的研究。

收稿日期:2001-02-26

量,分别为 0.5~9.42t/hm²(C),并得出它们均为大气温室气体 CO₂ 源的结论^[5].那么青藏高原高寒草甸区土壤对大气温室气体的贡献,人类活动对高寒草甸土壤温室气体 CO₂ 释放影响过程等尚缺乏定量的认识.为此笔者于 1998~1999 年进行了高寒草甸不同土地利用格局土壤 CO₂ 释放量的研究工作.

1 材料与方法

1.1 研究样地

实验样地设置在中国科学院海北高寒草甸生态系统定位站(海北站)实验区.海北站地处青藏高原东北隅,祁连山北支冷龙岭东段南麓的大通河河谷,101°19'E 37°37'N,海拔 3200 m.地区年平均气温 -1.7℃,最暖的 7 月平均气温 9.8℃,最冷的 1 月平均气温 -14.8℃;多年平均降水量 580 mm 左右,降水主要集中在暖季的 5~9 月,占年降水量的 80%,冷季 10 月~翌年 4 月仅为年降水量的 20%.该地区地带性植被多为寒冷中生多年高寒矮蒿草甸(土壤湿度较低的滩地、阳坡)和金露梅灌丛草甸(滩地、阴坡)为主要建群种的植被类型.植被分布均匀,植株低矮、密集、覆盖度大,牧草生长低矮,初级生产力低等.洪积~冲积物(滩地)坡积~残积(坡地)及古冰水沉积母质在不同水热条件下,受植被改造发育多有寒冻锥形土的大量分布.土层浅薄,有机质含量丰富.

研究选择了高寒矮蒿草甸及高寒灌丛草甸 2 种不同的植被类型,每种植被类型又选择轻牧与重牧 2 种放牧强度处理.

其中,矮蒿草甸实验地土壤为草毡寒冻锥形土,系冬春季放牧草场.轻牧设置于当年产羔羊放牧地段,放牧多在春季牧草返青初期进行,放牧强度轻,植物优势种有矮蒿草(*Kobresia humilis*)、羊茅(*Festuca ovina*)、垂穗披碱草(*Elymus nulanus*)、线叶龙胆(*Gentiana farreri*)、矮火绒草(*Leontopodium naum*)、早熟禾(*Poa sp.*)、麻花苣(*Gentiana straminea*)、雪白萎陵菜(*Potentilla nivea*)、美丽风毛菊(*Saussurea superba*)、二柱头薹草(*Scirpus distigmaticus*)、小蒿草(*Kobresia pygmaea*)、苔草(*Carex sp.*)等,植被盖度 95%以上.土壤草毡表层发育良好,没有发生剥蚀脱落现象,鼠类活动较轻.重牧设置于成年羊冬春长期放牧地段,多年重度放牧,草场严重退化,其植被优势种以杂草类为主,如棘豆(*Oxytyle sp.*)、摩玲草(*Morira chinensis*)、囊吾(*Ligularia irgariae*)、矮火绒草、麻花苣等居多,植被盖度为 20%~50%,个别地段甚至降到 50%,禾草类很少.土壤草毡表层剥落殆尽,鼠类活动猖獗,地表鼠丘比比皆

是,部分地段形成大片的次生裸地,经风力剥蚀沙砾化,成为“黑土滩”.

高寒灌丛草甸实验地土壤为暗沃寒冻锥形土,系夏秋季放牧草场,在山地半阴坡地带.轻牧放牧强度为 2.25 只羊/hm²^[11],植物群落结构简单,主要以金露梅(*Potentilla fruticosa*)灌丛为主要建群种的植被类型,伴有山生柳(*Salix oritrapha*),草本以线叶蒿草(*Kobresia capilli folia*)、矮蒿草、美丽风毛菊、雪白萎陵菜等为主,植被盖度约为 70%,地表通常具有较厚的苔鲜层和枯枝落叶层,地表秃斑约为 5%,牲畜对牧草的利用率为 30%.重牧放牧强度为 5.35 只羊/hm²,植物群落与轻牧差异不大,但植被盖度降为 40%左右,地表秃斑约为 30%,牲畜对牧草利用率约为 60%.

1.2 测定方法

实验样地选择植被分布均匀、地势平坦的典型样点,首先剪去植物地上部分,清除地表凋落物及牛羊粪便等杂物.而后用小刀将土壤挖开一宽约 1 cm,深 5 cm,内径 24.5 cm 的圆形槽,再将由玻璃纤维增强塑料制作的密闭 CO₂ 收集箱底座(内径 245 mm、高 100 mm)镶入土壤中,外周用湿土填实密封.采用由玻璃纤维增强塑料制作的密闭箱(高 300 mm,内径 245 mm)进行气体收集,箱体与底座间用水进行密封(图 1).

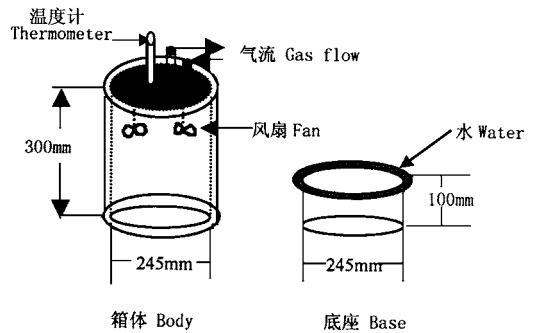


图 1 气体采集箱

Fig.1 Gas collected box

CO₂ 采用 CF-301 PS 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 d,用 374μL/L 标准 CO₂ 气(甘肃光明特种气体开发公司生产)校准仪器.空气中水汽用硅胶脱除.CO₂ 释放速率观测频率为:分别在每月 5 日和 20 日左右进行测定;日观测频率为当日的 10:00 开始,至次日 10:00 结束,每 2 h 重复进行定时观测,每个样点测定 10 min 内 CO₂ 释放累积值.

1.3 计算公式

土壤 CO₂ 释放速率计算公式:

$$f = 1 / A \cdot \rho V \Delta c / \Delta t$$

其中, f 为 CO_2 释放速率 [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]; ρ 为标准状况下箱体内 CO_2 的密度, V 、 A 、 h 分别为箱体体积、底面积和高; $\Delta c/\Delta t$ 为在测定时间内 CO_2 浓度的变化率.

1.4 资料统计与处理

由于受条件限制,不可能连续长时间进行土壤 CO_2 日、年释放量的测定,为此本文对土壤 CO_2 日释放量或年释放量采用积分法或模拟预测法来确定.其中,土壤日释放量以定点、定时测定的土壤 CO_2 释放通量结果为因变量,时间(h)为驱动变量,建立时间与土壤 CO_2 释放通量的一元四次多项式,并通过对时间($0 \sim 24\text{h}$)进行积分处理,得出土壤 CO_2 的日释放量.年释放量则以多个测定日的土壤 CO_2 日释放量为因变量,数量化影响温室气体释放的气象及土壤环境因子(降水、蒸发、日照、气温、 $0 \sim 30\text{cm}$ 地温等)为驱动变量,建立土壤 CO_2 的日释放量与环境因子间的多元非线性经验公式,以此经验公式,应用有关气象及土壤环境因子资料,反演计算出逐日土壤 CO_2 的日释放量,最后求累积得出土壤 CO_2 的年释放量.

2 结果与讨论

2.1 不同土地利用格局土壤 CO_2 的年释放量

高寒草甸不同土地利用格局的条件下,土壤 CO_2 年累积释放量及其年内累积过程差异较大(图 2、表 1).由图 2 和表 1 可以看到,在植物生长季的 5~9 月,不论是退化的或不退化的矮蒿草草甸,还是退化的或不退化的金露梅灌丛草甸,土壤 CO_2 累积释放量明显高于非生长季的 10 月到翌年 4 月,一般高出 2~4 倍,表现出高寒草甸地区在植物生长季内有着很强的土壤 CO_2 排放量,非生长季土壤 CO_2 排放甚至出现负排放;从不同植被类型来看,暗沃寒冻锥形土的金露梅灌丛分布区,土壤 CO_2 年累积释放量一般较寒冻锥形土的矮蒿草草甸地区高,年内约高 $177.25\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,其中植物生长季较非生长季偏高明显;同时还看到,不退化植

被状况下,其土壤 CO_2 年释放量较退化草地高.在 4 个不同土地利用格局处理的样点,土壤 CO_2 年累积释放量表现出,矮蒿草草甸 > 金露梅灌丛草甸 > 退化金露梅灌丛草甸 > 退化矮蒿草草甸;植物生长季土壤 CO_2 累积释放量为金露梅灌丛草甸 > 矮蒿草草甸 > 退化金露梅灌丛草甸 > 退化矮蒿草草甸;植物非生长季土壤 CO_2 累积释放量为矮蒿草草甸 > 金露梅灌丛草甸 > 退化矮蒿草草甸 > 退化金露梅灌丛草甸.

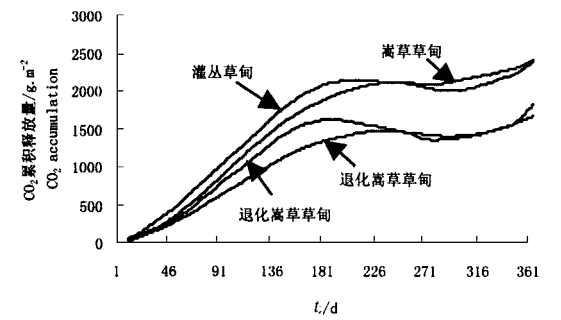


图 2 高寒草甸不同土地利用格局土壤 CO_2 累积释放量
Fig. 2 Accumulation values of soil CO_2 emission in different land use from alpine meadow

由图 1 还可看出,4 种不同土地利用格局下,土壤 CO_2 释放累积曲线均有一个土壤 CO_2 累积释放低谷区,金露梅灌丛草甸(包括退化)谷值约出现在离 5 月 1 日测定日的第 180d 左右,约对应应在 10 月下旬,而矮蒿草甸(包括退化)的出现谷值约出现在离初期测定日的第 220 天左右,约对应于 12 月上旬,表明金露梅灌丛草甸地区出现时间较矮蒿草甸区提早 40d 左右.

4 种不同土地利用格局的高寒草甸,从影响土壤温室气体 CO_2 产生及排放的物质基础(土壤有机质)、温室气体的主要生产者(微生物)、以及土壤温室气体释放路径的通畅程度(孔隙度)等环境要素来看,除孔隙度外,上述环境因素均表现出在金露梅灌丛(退化与非退化)区域大于矮蒿草草甸(退化与非退化)区域,同时

表 1 高寒草甸土壤 CO_2 的年释放量/ $\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$

Table 1 Annual values of soil CO_2 emission from alpine meadow

植被(Vegetation)	生长季	非生长季	全年
	(Growth season)	(Non growth season)	(Annual)
矮蒿草草甸(<i>Kobresia humilis</i> meadow)	1769.63	661.46	2431.09
退化矮蒿草草甸(Degraded <i>Kobresia humilis</i> meadow)	1191.26	502.80	1694.06
金露梅灌丛草甸(<i>Potentilla fruticosa</i> shrub meadow)	1871.40	550.90	2422.30
退化金露梅灌丛草甸(Degraded <i>Potentilla fruticosa</i> shrub meadow)	1495.60	384.50	1880.10

还表现有非退化的草甸大于退化的草甸地区(表 2.表 3).从理论上来说,其土壤 CO₂ 年释放量也应呈同样趋势变化,但实际上为矮蒿草草甸 > 金露梅灌丛 > 退化金露梅灌丛草甸 > 退化矮蒿草草甸.

表 2 影响高寒草甸土壤 CO₂ 释放的土壤性状¹⁾

Table 2 Soil characteristics effecting soil CO ₂ e mission from alpine meadow								
深度 Depth/ cm	容重 Capacity/ g·cm ⁻³				孔隙度 Porosity/ %			
	A	B	C	D	A	B	C	D
0 ~ 10	0.8806	0.9777	0.5683	0.9429	64.33	59.01	69.67	61.84
10 ~ 20	1.1929	1.0909	0.9764	0.9874	47.10	58.91	59.92	51.42
20 ~ 30	1.1559	0.9793	0.9787	1.0909	55.77	61.89	53.96	51.49
有机质 O. M. / %								
深度 Depth/ cm	A		B		C		D	
0 ~ 10	11.88 ±1.19		8.18 ±0.86		14.47 ±3.44		12.08 ±3.37	
10 ~ 20	5.51 ±0.56		6.95 ±1.29		9.40 ±0.86		9.07 ±1.73	
20 ~ 30	4.41 ±0.48		5.46 ±1.26		6.61 ±0.45		6.37 ±0.58	

1) A:矮蒿草草甸 *Kobresia humilis* meadow; B:退化矮蒿草草甸 Degraded *Kobresia humilis* meadow; C:金露梅灌丛草甸 *Potentilla fruticosa* shrub meadow; D:退化金露梅灌丛草甸 Degraded *Potentilla fruticosa* shrub meadow.

表 3 高寒草甸土壤(0 ~ 10cm)主要微生物群的季节动态^{1)[12,13]}

Table 3 Seasonal dynamic of soil microorganism (0 ~ 10cm) in alpine meadow								
月份	纤维素分解菌 ×				真菌生物量 ×			
	10 ³ /cell·(g·d) ⁻¹				10 ⁻⁴ /g·(g·d) ⁻¹			
	A	B	C	D	A	B	C	D
5	3.59	6.22	7.90	-	10.50	9.4	13.8	13.15
6	8.32	7.38	11.95	-	15.21	12.6	20.01	19.27
7	18.04	7.63	13.04	-	15.90	14.47	19.52	18.09
8	21.68	8.24	21.37	-	16.61	15.29	17.66	18.46
9	13.53	5.17	18.72	-	15.24	11.91	16.66	17.83
10	6.98	1.50	7.60	-	11.70	10.30	15.30	16.10
11	3.49	1.31	4.75	-	11.10	9.75	13.50	14.10

1) A,B,C,D 符号意义同表 2

表 4 土壤 CO₂ 累积释放量差异性检验(t-检验)¹⁾

Table 4 T test to accumulation volumes of soil CO ₂ e mission								
生长季 Growth season			非生长季 Nonr-growth season			全年 Annual		
B	C	D	B	C	D	B	C	D
14.40 ³⁾	5.52 ³⁾	3.09 ³⁾	8.99 ³⁾	4.11 ³⁾	5.04 ³⁾	15.49 ³⁾	0.15	5.80 ³⁾
	16.68 ³⁾	6.01 ³⁾		0.77	1.72 ²⁾		15.49 ³⁾	5.93 ³⁾
		7.80 ³⁾			3.04 ³⁾			7.63 ³⁾

1) A,B,C,D 符号意义同表 2 2) t_{0.05} = 1.65 3) t_{0.01} = 2.35

强度的变化) 微气候条件及其高寒草甸牧草在其生长过程中的有关生理过程的关系极为密切^[16].

造成上述不同结果的原因在于: ①植物生长季 2 种退化草场,由于草场退化严重,植物根系减少,土壤容重增加,总孔隙度及通气孔隙度减小,频繁降水,常常造成土壤积水,影响土壤气体的排放,因此总释放量均小于未退化草场. ②灌丛草甸分布于山地阴坡,其土壤进入冻结状态的时间较早,冻结深厚,冻结期维持时

间长,而滩地矮蒿草草甸地区相对较弱,因此,冬季金露梅灌丛草甸地区土壤对大气 CO₂ 的吸收量高于蒿草草甸,虽然在植物生长季其土壤 CO₂ 释放量居于首位,但年释放量略低于蒿草草甸. ③退化矮蒿草草甸在 4 种不同土地利用中,其土壤 CO₂ 产生的物质基础、温室气体的生产者的数量、土壤温室气体释放路径的通畅程度均最差,因此其土壤 CO₂ 年释放量也最小.

2.2 不同土地利用格局土壤 CO₂ 释放的季节动态

高寒草甸不同土地利用格局的土壤 CO₂ 释放,其季节动态基本有相同的变化趋势(图 3). 由图 3 看出,从牧草返青期 5 月初至 8 月上旬,随气温升高,降水增加,土壤有机质分解加速,土壤 CO₂ 释放处于上升时期,8 月上旬达年释放峰值,随后随气候条件的变劣逐

渐下降,至 1 月 13 日左右,该期温度(包括气温及地温)最低,土壤 CO₂ 释放也在年内达最低,以后随温度的逐步升高而又逐渐上升,表现出一定的周期性变化过程,但在 4 种不同土地利用类型间所出现峰值及谷值存在有显著的差异(表 5).

在不同土地利用格局的土壤 CO₂ 释放的周期变化过程中,11 月上旬至翌年 2 月中旬为土壤 CO₂ 负排放,即土壤处于对大气 CO₂ 的吸收时期,其持续时间长短,在 4 种不同土地利用类型之间差异较大,维持天数存在有矮蒿草草甸(39d) < 退化矮蒿草草甸(62d) < 金露梅灌丛草甸(85d) < 退化金露梅灌丛草甸(105d). 而在 2 月下旬到 10 月下旬间,为高寒草甸不同土地利用格局土壤 CO₂ 释放时期.

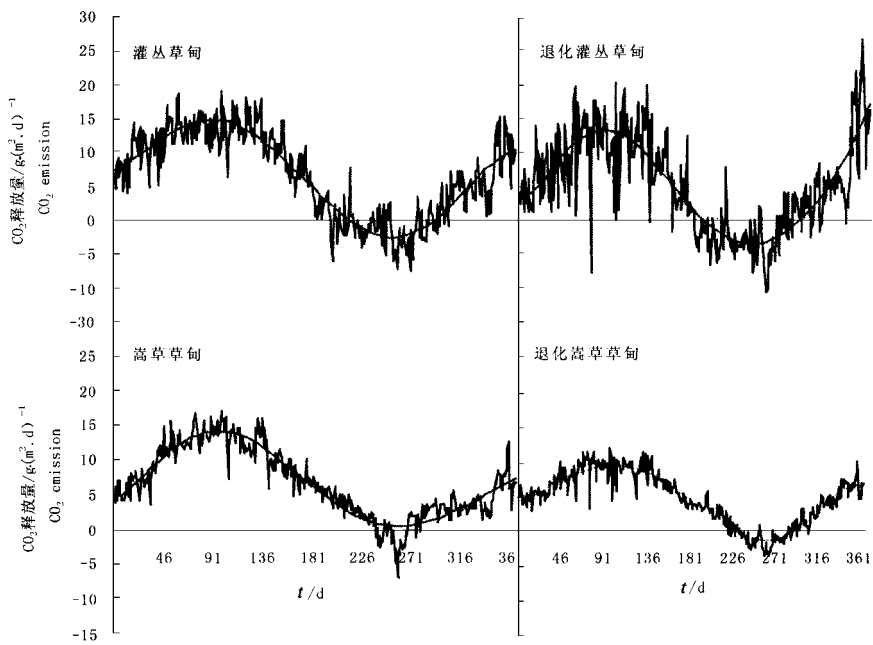


图 3 高寒草甸土壤 CO₂ 释放的季节动态

Fig. 3 Seasonal dynamic of soil CO₂ emission from alpine meadow

土壤 CO₂ 释放的周期性变化表明,土壤 CO₂ 释放速率与气候周期性波动密切相关.特别是地温条件,一般较深层地温,其年变化周期与地表温度及气温相联系,是由地表温度及气温的高低波动来决定,变化规律与地表温度的变化相似,但自上而下最高、最低出现时间(位相)滞后,年变化振幅(年较差)减小.海北站地区较深层地温月最高一般出现在 7 月以后的 8 月,而较深层地温最低出现时间视气温下降的时间迟早及降温幅度而定,也出现一定的滞后性,1998~1999 年冬季较深层地温最低出现在 1 月.从而可看出,土壤 CO₂ 释放

的周期变化刚好与地温的周期变化相重叠.这证实温度的变化与 CO₂ 释放的变化同步进行,表明在全球变暖的变化过程中,青藏高原高寒草甸分布区温度升高的条件将驱动土壤释放大量的 CO₂,成为一个 CO₂ 的释放源,对全球变暖将起到一定的推波助澜作用.

3 结语

高寒草甸地区植物生长季内,土壤 CO₂ 有着很强的排放量,但非生长季土壤 CO₂ 排放甚至出现负值排放.土壤 CO₂ 年累积释放量一般在暗沃寒冻锥形土的

表 5 高寒草甸土壤 CO₂ 释放最大值及最小值

Table 5 Peak and valley values of soil CO₂ emission from the alpine meadow

植被类型 Vegetation type	最大值		最小值	
	日期 Date	数值 values	日期 Date	数值 values
	/月-日	/g·(m ² ·d) ⁻¹	/月-日	/g·(m ² ·d) ⁻¹
矮蒿草草甸(<i>Kobresia humilis</i> meadow)	08-06	14.23	01-16	-1.58
退化矮蒿草草甸(Degraded <i>Kobresia humilis</i> meadow)	08-10	10.02	01-21	-2.70
金露梅灌丛草甸(<i>Potentilla fruticosa</i> shrub meadow)	07-29	15.05	01-09	-3.52
退化金露梅灌丛草甸(Degraded <i>Potentilla fruticosa</i> shrub meadow)	07-30	14.01	12-28	-4.36

金露梅灌丛分布区,较寒冻锥形土的矮蒿草草甸地区高,未退化植被状况下的较退化草地高.4种不同土地利用格局当中,土壤 CO₂ 年累积释放量表现有,矮蒿草草甸>金露梅灌丛草甸>退化金露梅灌丛草甸>退化矮蒿草草甸.表明不同利用格局下,土壤 CO₂ 年释放量差异明显,主要决定于各土壤生物活性、土壤理化性状,及其人类活动、微气候条件等影响.其原因在于,由于草场退化,土壤容重增加,总孔隙度及通气孔隙度减小,常可造成土壤表层积水,影响土壤气体的排放,使 CO₂ 释放量小于未退化草场.在阴坡的灌丛草甸地区,由于土壤较早进入冻结状态,冻结层深厚且维持时间长,冬季金露梅灌丛分布地区土壤对大气 CO₂ 的吸收量高于蒿草草甸,但在生长季仍有较高的土壤 CO₂ 释放量,但略低于蒿草草甸.

高寒草甸不同土地利用格局的土壤 CO₂ 释放量,其季节动态基本有相同的变化趋势,基本表现出,8月高1月低的周期性变化,其周期性变化与气候周期性波动密切相关.特别是地温度条件,其变化规律与较深层地温变化趋势一致.也表明在全球变暖的过程中,青藏高原高寒草甸分布区温度升高的条件将驱动土壤释放大量的 CO₂,成为一个 CO₂ 的释放源.

参考文献:

1 Burton D L, Beauchamp E G. Profile nitrous oxide and carbon dioxide concentration in soil subject to freezin. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1994, **58**:115 ~ 122.

2 Duxbury J M, Harper L A, Moster A R. Contributions of agroecosystems to global climate change. In: D E Rolston et al. (ed.) *Agricultural ecosystem effects on trace gases and global climate change*. ASA Spec. Publ. 55. ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI. 19, 1 ~ 18.

3 Hudgens D E, Yavitt J B. Land-use effects on soil methane and carbon dioxide emission in forests near Ithaca, New York. *Ecoscience*. 1997, **4**(2):214 ~ 222.

4 Ivan J F, Yowhan S, Chuck R K, Lindsey E R, Mark B D. Soil carbon dioxide characteristics under different forest types and after harvest. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1993, **57**:1115 ~

1121.

5 赵其国.土壤与环境问题国际研究概况及其发展方向.土壤,1998, **30**(6):45 ~ 52.

6 Reicosky D C, Dugas W A. Tillage-induced soil carbon dioxide loss from different cropping systems. *Soil & Tillage Research*, 1997, **41**(1-2):105 ~ 118.

7 曹广民,李英年,鲍新奎.高山土壤持水特性的分析.土壤,1998, **30**(1):27 ~ 30.

8 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,1998.

9 Steven F O, Chris T G, Weixin Cheng et al. Diurnal and seasonal patterns of ecosystem CO₂ emission from upland tundra in the foothills of the Brooks range, Alaska, U.S.A. *Arctic and alpine research*, 1996, **28**(3):328 ~ 338.

10 Svensson B H, Veum A K, Kjølsvik S K. Carbon losses from tundra soils. In: Wielgolaski F E (ED): *Fennoscandian tundra ecosystems*. Part I: plant and microorganisms, Berlin Heidelberg; new York: Springer Verlag, 1975. 279 ~ 286.

11 刘伟,周立,王溪.不同放牧强度对植物及啮齿动物作用的研究.生态学报,1999, **19**(3):376 ~ 382.

12 王启兰,李家藻.高寒草甸不同植被土壤真菌生物量的季节动态.高寒草甸生态系统(4).北京:科学出版社,1995.169 ~ 178.

13 姜文波,王启兰,杨涛,耿博闻.高山草甸土纤维素分解的季节性动态.高寒草甸生态系统(4).北京:科学出版社,1995.183 ~ 187.

14 Terhune C L, Harden J W. Seasonal variations of carbon dioxide concentrations in stony, coarse-textured desert soils of southern Nevada, USA. *Soil science*, 1990, **151**(6):417 ~ 429.

15 Jones M H, Fahnestock J T, Walker D A, Walker M D, Welker J M. Carbon dioxide emission in moist and dry arctic tundra during the snow-free season: Responses to increases in summer temperature and winter snow accumulation. *Arctic and alpine research*, 1998, **30**(4):373 ~ 380.

16 Catherine blet, Charaudeau, Muller J, Laudelout H. Kinetics of carbon dioxide evolution in relation to microbial biomass and temperature. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1990, **54**:1324 ~ 1328.