

退化草地暗沃寒冻锥形土 CO₂ 释放的 日变化和季节动态*

张金霞 曹广民 周党卫 赵新全 周兴民

(中国科学院西北高原生物研究所, 西宁 810001)

摘要 采用CI-301PS红外 CO₂分析仪,测定了退化草地暗沃寒冻锥形土 CO₂排放速率。研究表明:(1)CO₂排放速率具有明显的日变化,日最大排放速率在 12:00~14:00 时出现,最低值出现于凌晨 4:00~8:00。白天大于夜晚。(2)植物生长季,CO₂释放速率有明显的季节变化和物候变化,日平均释放速率为(320.86 ± 130.49)mg/m²·h。CO₂释放速率的物候变异为草盛期 > 草枯黄期 > 草返青期。(3)CO₂释放速率的日变化进程主要受气温和地表温度制约,而季节动态与气温及 0~30cm 地温均呈极显著正相关关系。(4)退化草地上 CO₂释放速率较低。

关键词 CO₂释放速率,暗沃寒冻锥形土,气温,地温

中图分类号 S151

由大气温室气体浓度变化引起的全球气候变暖是目前最重要的全球性的环境问题之一,已引起科学家的普遍关注^[1~3]。大气温室气体浓度已发生全球尺度的变化,其中最重要的 CO₂已由工业化前的全球平均浓度 280mg/kg 上升到 1992 年 356mg/kg^[4],当前正以 1.5mg/kg 年速度增长,对人们生存的地球环境产生了深刻的影响。高寒灌丛广泛分布于青藏高原,是高原地带性与山地垂直地带性的主要植被类型^[5]。它具有适应高寒气候的生态特性。高寒灌丛草甸覆被下土壤为暗沃寒冻锥形土,由于其有机质含量丰富(7.0%~20.0%),它不仅是碳素的巨大储存库,也为温室气体 CO₂的产生提供了丰富的物质基础。近年来,由于过度放牧及人为活动的影响,使草场退化,严重影响了草地生产力。本研究的目标为高寒灌丛草甸对大气温室气体的贡献作用及过度放牧对其的影响。

1 材料和方法

1.1 试验样地

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, 海

* 国家重点基础研究项目(G1998040800)、中国科学院青藏高原研究项目(KZ951-A1-204、KZ95T-06)和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:1999-08-05;收到修改稿日期:2000-06-30

拔 3250m), 属典型的高原大陆性气候。一年仅有冷暖两季之分, 冷季漫长而寒冷。年平均气温 -1.7°C , 年降水 600mm 左右, 且集中分布于 6 至 9 月 (占全年降水的 70%), 植物生长季水热同期, 有利于牧草生长。

选择了广泛分布于山地阴坡和偏阴坡的高寒灌丛草甸为研究对象, 植物群落结构简单, 分灌丛和草本两层, 灌丛以金露梅 (*Potentilla fruticosa*) 为主要建群种, 杂有山生柳 (*Salix oritrapha*); 草本以线叶嵩草 (*Kobresia capillifolia*), 矮嵩草 (*Kobresia humilis*), 美丽风毛菊 (*Saussurea superba*), 雪白委陵菜 (*Potentilla nivea*) 等为主。试验是在重度放牧的样地进行, 放牧强度为 5.35 只/hm²羊, 牧草的利用率约为 60%, 放牧时间为 5 个月^[6], 由于过度放牧作用, 草场趋于退化, 植被盖度由 70% 降至 40% 左右, 地上生物量明显减少。土壤类型为暗沃寒冻锥形土。植物生长季, 影响土壤 CO₂ 释放的气候因子见表 1。

表1 海北站植物生长季气候状况

Table 1 Climate condition in growing season at Haibei alpine meadow ecosystem research station

项目 Item	5月 May	6月 June	7月 July	8月 Aug	9月 Sep.
气温 (°C)	5.2	8.9	10.6	9.2	6.3
地表温度 (°C)	9.7	13.9	14.9	14.1	10.8
降水 (mm)	63.7	127.0	85.2	123.2	48.6

1.2 测定方法

气体采集箱是用特制的玻璃纤维增强塑料制作的密闭箱 (高 300mm, 内径 245mm)。测定时将箱体底座埋入地下, 剪去箱体内地表植物, 箱体和底座间以水密封。CO₂ 采用 CI-301PS 红外 CO₂ 分析仪, 以闭路系统 Absolute 功能进行气体浓度测定, 实验设置三个重复。测定箱体 10 分钟内土壤 CO₂ 释放的浓度值, 以近地面植物冠层大气 CO₂ 的浓度作本底, 采样速率 1min, 流速 0.5L/min。测定前用 374.42mg/kg 标准气对仪器进行校准, 该仪器用碱石灰进行零点校正, 采集气体以硅胶进行脱水。CO₂ 释放速率按 $F = Wdc/dt$ 计算。其中, F 为 CO₂ 释放速率 ($\text{molm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$); W 为箱体内气体经温度和压力校正后的质量流速 ($\text{mol/m}^2 \cdot \text{s}$); dc/dt 为测定时间内 CO₂ 浓度的变化速率。

实验测定频度为: 每月观测两次, 分别在 7 日和 22 日左右进行, 日测定频度为: 10:00、12:00、14:00、16:00、18:00、20:00、22:00、24:00 及次日 4:00、6:00、8:00、10:00。在每次测定 CO₂ 释放的同时, 测定气温和 0~30cm 不同土层的土壤温度, 在每个测定日同时采集 0~10cm、10~20cm、20~30cm、30~40cm、40~50cm 的土壤测定土壤水分。

2 结果与分析

2.1 退化暗沃寒冻锥形土 CO₂ 释放速率的日变化

退化暗沃寒冻锥形土 CO₂ 释放速率呈现明显的日变化进程 (图 1)。最大释放速率出现在 12:00~16:00 时, 最低值出现在 4:00~8:00 时左右, 植物生长季退化暗沃寒冻锥形土平均 CO₂ 释放速率的日变化进程与气温、地表温变化趋势相似, 从凌晨 6:00 CO₂ 释放速率逐渐增加, 到 14:00 达最大值, 随后又逐渐下降, 至次日凌晨 6:00 时又趋于最低值。退化暗沃寒冻锥形土 CO₂ 释放速率白天大于夜晚, 5 月 11 日、7 月 7 日、9 月 27 日 (8:00~18:00) CO₂ 释放速率平均值分别为 273.04mgm⁻²h⁻¹、798.47mgm⁻²h⁻¹、334.19mgm⁻²h⁻¹, 分别是夜晚 (20:00~6:00) 的 1.09 倍, 1.32 倍和 1.39 倍。退化暗沃寒冻锥形土 CO₂ 释放速

率日变化进程主要受气温和地表温度的制约,与 Steven^[7]所得研究结果相似。

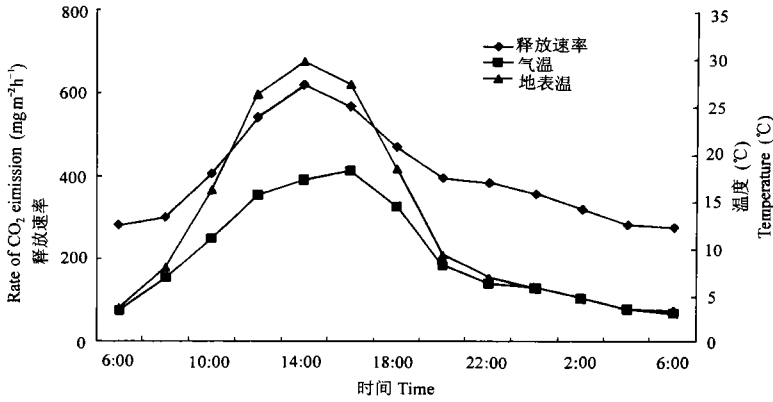


图1 退化草地暗沃寒冻维形土 CO₂释放速率的日变化进程

Fig.1 Course of diel variation in rate of CO₂ emission from Mollic-Cryic Cambisols on degraded grassland

2.2 退化草地暗沃寒冻维形土土壤 CO₂释放速率的物候进程

不同物候期退化草地暗沃寒冻维形土 CO₂释放速率不同(图2)。牧草返青期(5~6月)、草盛期(7~8月)和草枯黄期(9月),其土壤 CO₂释放速率的平均值分别为 278.83mgm⁻²h⁻¹、562.03mgm⁻²h⁻¹和 414.93mgm⁻²h⁻¹,即草盛期 > 枯黄期 > 返青期。

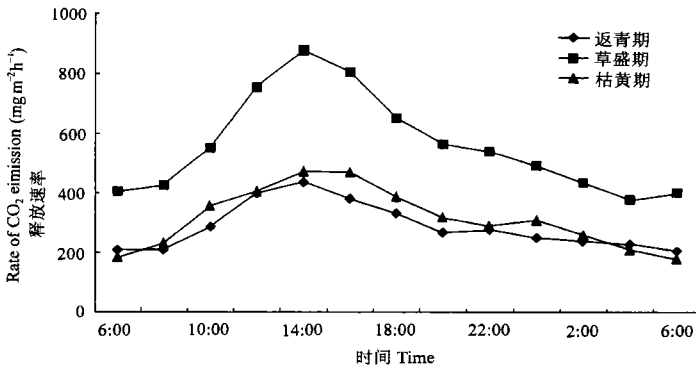


图2 不同物候期退化草地暗沃寒冻维形土 CO₂释放速率的日变化

Fig.2 Diel variation in rate of CO₂ emission in different phenological periods from Mollic-Cryic Cambisols on degraded grassland

图2显示了不同物候期退化暗沃寒冻维形土土壤 CO₂平均释放速率的日变化进程。各物候期峰值均出现在 14:00 时,同时草盛期日变幅较高,返青期和枯黄期较低。不同物候期退化暗沃寒冻维形土 CO₂释放速率与气温、地表温均呈极显著相关关系(表2)。

不同物候期 CO₂释放速率用新多极差(LSR)方法进行差异显著性测定(表3),草盛期与返青期,草盛期与枯黄期都达到差异显著水准(P<0.05),而枯黄期与返青期未达到差异显著水准。草盛期与返青期达到极显著差异(P<0.01),与枯黄期则未达到极显著差异。

表2 退化草地暗沃寒冻锥形土土壤 CO₂释放速率与环境因子的相关关系Table 2 Relationship between rate of CO₂ emission and environment factor in Mollic-Cryic Cambisols on degraded grassland

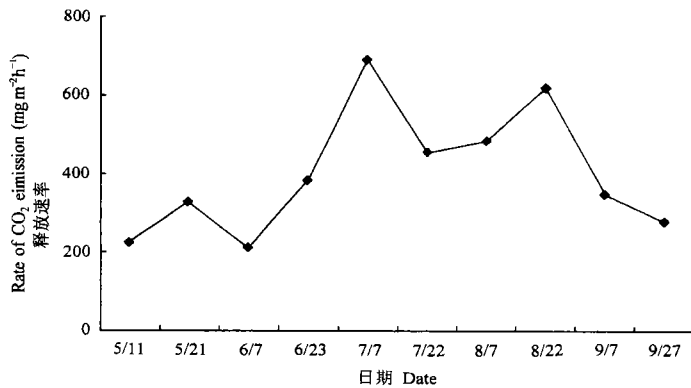
物候期 Phenophase periods	CO ₂ 释放速率 Rate of CO ₂ emission (mg/m ² ·h)	平均气温 Average temperature (°C)	平均地表温度 Average soil surface temperature (°C)	与气温的相关系数 Correlation with air temperature <i>r</i>	与地温的相关系数 Correlation with soil surface temperature <i>r</i>
草返青期	287.83	7.3	10.2	0.9334**	0.9547**
草盛期	562.03	12.1	16.5	0.9709**	0.9799**
枯黄期	314.93	6.9	9.5	0.9617**	0.9266**

** $P < 0.01$ 表3 不同物候期土壤CO₂排放速率的LSR法比较Table 3 Comparison of rate of CO₂ efflux by LSR method in the different phenophase periods

物候期 Phenophase periods	释放速率均值 Rate of CO ₂ emission	差异显著性 Statistical difference	
		5%	1%
草盛期	14.0	A	a
枯黄期	8.0	B	ab
返青期	7.1	B	b

2.3 退化草地暗沃寒冻锥形土 CO₂释放速率的季节动态

植物生长季5~9月,土壤CO₂释放速率有明显的季节变化(图3),整个生长季呈双峰双谷曲线,最大峰值698.66mgm⁻²h⁻¹出现在7月7日;第二峰值618.44mgm⁻²h⁻¹出现在8月22日;双谷值出现在6月7日和7月22日;整个生长季最低值为212.83mgm⁻²h⁻¹(6月7日);植物生长季退化暗沃寒冻锥形土CO₂平均释放速率为(320.86 ± 130.49)mgm⁻²h⁻¹。8月7日测定结果(12.33gm⁻²d⁻¹)与Seiko在休闲地11.1gm⁻²d⁻¹结果相近,较大豆地的CO₂排放值低^[7]。而较美国Alaska冻原的释放速率高^[8]。生长季日最大振幅585.4mgm⁻²h⁻¹(8月7日),最小振幅203.81mgm⁻²h⁻¹(5月11日),整个生长季测定日CO₂排放速率与当天的平均

图3 退化草地暗沃寒冻锥形土 CO₂释放速率的季节动态Fig.3 Seasonal dynamic in rate of CO₂ emission from Mollic-Cryic Cambisols on degraded grassland

气温、0~30cm各层平均地温均呈极显著相关水准(表4)。表明CO₂排放的季节动态同样受气温及各土层温度控制。

表4 植物生长季土壤CO₂排放速率与气温、地温的相关分析

Table 4 Correlation analysis of rate of CO₂ emission to air temperature and soil temperature in growing season

温度 Temperature (°C)	回归方程 Regression equation	<i>r</i>
大气温度	$y = -43.27 + 47.41x$	0.8398**
0cm地温	$y = -85.01 + 37.44x$	0.8495**
5cm地温	$y = -148.83 + 47.14x$	0.8385**
10cm地温	$y = -121.0 + 47.19x$	0.8419**
15cm地温	$y = -99.96 + 49.29x$	0.8541**
20cm地温	$y = -77.32 + 50.48x$	0.8472**
30cm地温	$y = -30.80 + 47.44x$	0.8231**

2.4 不同天气状况对CO₂释放速率的影响

天气状况对CO₂释放速率有一定影响。6月7日是整个生长季的最低值,6月7日和7月22日的天气状况列于表5。

表5 不同天气状况下的CO₂释放速率

Table 5 The rate of CO₂ emission under different weather conditions

日期 Date	时间 Time	天气状况 Weather state	气温(°C) Air temperature	地表温度(°C) Soil surface temperature	CO ₂ 释放速率(mgm ⁻² h ⁻¹) Rate of CO ₂ emission
6月7日	10:00	大雨	6.1	8.4	196.31
	12:00	大雨	15.8	26.5	362.05
	14:00	晴	17.8	27.0	345.55
7月22日	16:00	晴	18.4	28.5	712.40
	18:00	大雨	12.4	17.0	581.64
	20:00	小雨	10.4	12.8	363.33

由表4可知,下雨使气温和土壤温度降低,使微生物数量和活性数受到抑制。由于下雨,水分占据了土壤空隙,土壤气体不易产生或产生后易溶于水中,并且CO₂在水中的扩散常数很低(1.77×10^{-5} cm/s),使土壤气体和大气难于进行交换。7月22日16:00、18:00、20:00时测定的CO₂释放速率均较7月7日低,6月7日每点测定值均低于5月21日测定值,而6月7日各测定时间的温度较5月21日相应的温度值都高。

2.5 放牧作用对高寒灌丛草甸CO₂释放速率的影响

放牧作用使CO₂释放速率降低,本区测定CO₂的排放速率轻牧为(11.56 ± 3.92)gm⁻²d⁻¹(⁽¹⁾),而重牧条件下,高寒灌丛草甸CO₂排放速率则为(10.05 ± 3.96)gm⁻²d⁻¹,轻牧和重牧情况下CO₂释放速率经F检验,达显著差异($P < 0.05$)。

(1) 曹广民等未发表资料,1999

3 讨 论

土壤中 CO₂的产生主要依赖于土壤中有有机物质的数量及矿化速率、土壤微生物类群的数量及活性、土壤动物及植物的呼吸作用。CO₂排放实际上是土壤中生物代谢和生物化学过程等所有因素的综合产物。因此,能影响土壤生物学过程及生物化学反应速率的因素都影响土壤 CO₂释放速率。环境条件,植被状况和气象因子如气温、土壤温度、降水、气压、风速等都影响 CO₂排放。高寒草甸生态系统定位站地区年均气温为 -1.7℃。最热的7月份平均气温也小于 10℃,最冷的一月份平均气温 -15℃。植物生长季短,仅有 145 天左右。暗沃寒冻锥形土土壤有机质含量丰富 189.46t/hm²(0~10cm)为微生物提供了丰富的能源。

3.1 温度对土壤 CO₂释放的影响

温度不仅影响微生物细胞的物理反应及化学反应速率,而且对环境中的物理化学特征也有影响。如土壤容积、压力、氧化还原电位、扩散、布朗运动、粘度表面张力和水结构。微生物细胞的活动是受热力学定律所控制。土壤有机质在微生物参与下分解成简单的有机化合物,有一部分进一步矿化成 CO₂、NO₂、N₂、NH₃、CH₄、H₂O 等。该矿化过程受温度的控制。CO₂排放速率的日均值与气温、地表温度呈强烈的相关关系(表 6)。

表6 CO₂ 排放速率与气温、地表温度的相关关系

Table 6 The correlation coefficient of rate of CO₂ emission with air temperature and soil surface temperature

日期	气温	地表温度	日期	气温	地表温度
Date	Air temperature	Soil surface temperature	Date	Air temperature	Soil surface temperature
5月11日	0.951**	0.961**	7月22日	0.952**	0.950**
5月21日	0.881**	0.921**	8月7日	0.894**	0.916**
6月7日	0.899**	0.913**	8月22日	0.940**	0.955**
6月23日	0.621*	0.709**	9月7日	0.948**	0.922**
7月7日	0.872**	0.908**	9月27日	0.884**	0.853**

除 6 月 23 日 CO₂排放速率与气温呈显著相关外,其余所有点与气温地表温度都表现出极显著相关关系。温度是影响微生物数量及活性的主要因子,地表温度直接受太阳辐射影响,白天增热,夜晚散热,随气温的变化而变化。微生物数量及活性也正是表层最高,有机质矿化受温度影响而波动,因而表现出 CO₂排放速率与温度的高度相关性。CO₂排放速率与气温和地表温度极好的相关性,也进一步说明土壤 CO₂的排放主要是地表的贡献作用。并且随土层深度递减^[8,9]。

土壤 CO₂排放速率的季节动态与气温,地温(0~30cm)都表现出极显著的相关关系(表 4)。白天土壤表层吸收太阳辐射能,逐渐向下层传递热量。受土壤热传导及热容量的影响,土壤下层温度最高峰值与最低值滞后于表土层,土壤下层温度变化不如表层剧烈,温度的季节动态主要受土壤各层日均温变化的影响,土壤各层温度的变化直接制约了微生物活性和生化反应速率,因而 CO₂排放的季节动态与气温和各土层温度都表现了强烈

的相关性。

以上说明热量条件在高寒地区是增强土壤中生命活动及提高反应速率的主要因素。因而在高寒地区热量条件对 CO_2 排放速率较其他环境因素更敏感。这与有机氮矿化之研究结论一致^[10]。

3.2 土壤微生物对 CO_2 排放的影响

高寒灌丛覆盖下的暗沃寒冻锥形土有机质含量极为丰富,为微生物提供了丰富的物质源泉。在高寒灌丛草甸地区土壤微生物总生物量和 CO_2 释放速率有良好的相关性,各种微生物数量的高峰期及纤维素分解的高峰期均出现在 7~9 月^[11]。真菌生物量的季节动态也是 7~8 月达最高值^[12],与 CO_2 排放速率一致。

在植物生长季,5 月份牧草返青,气温逐渐回升,土壤冻层内水分开始融化并向地表迁移,保持了土壤水分,这时根系分泌物也逐渐增多。死根生物量在牧草返青期开始增加,到 6 月份达最高值,为微生物提供了足够的能源。随着气温的增高,土壤温度也升高,土壤中生物代谢活性增强,土壤 CO_2 排放也增强,7 月至 8 月达高峰值。8 月下旬以后气温下降,地温也随之降低,9 月份随气温和地温降低微生物数量也减少, CO_2 释放速率急剧下降。

3.3 植被对 CO_2 排放的影响

陆地生态系统碳素循环的主要形式是通过光合作用固定大气中的 CO_2 ,绿色植物将 CO_2 与水反应转化生成具有确定结构和丰富多样的有机化合物,即形成初级生产力。大气中的 CO_2 不断地得到由土壤有机质不断分解所释放出来的 CO_2 的补充。暗沃寒冻锥形土土壤 CO_2 释放速率与植物地上部分活体重的季节动态呈极显著正相关关系, $r = 0.9007$, $P < 0.01$ 。说明 CO_2 排放与植物体新陈代谢强度关系极为密切。植物根系的呼吸强度直接影响 CO_2 的释放速率。根系生物量愈大,其呼吸强度也愈大。有研究表明泥炭土中根系呼吸占 CO_2 总排放量的 10%~40%^[13]。高寒灌丛地区根系呼吸有待于进一步研究。

3.4 水分对 CO_2 释放的影响

土壤水分不仅影响生物体的有效水分,也影响土壤通气状况及可溶物质的本质和数量、渗透压和 pH 等。实验区暗沃寒冻锥形土水分含量(34.4%~75.0%,0~10cm)与 CO_2 释放速率呈极显著相关关系($r = 0.7682$, $P < 0.01$)。但因水分在该区较充足,并不像温度对植物生长及 CO_2 释放表现的非常敏感。

3.5 不同放牧强度对 CO_2 释放的影响

在不同放牧强度下,植物地上生物量随放牧强度的增加而减少,优良牧草也减少,高原鼯鼠的新土丘数明显增加^[6]。放牧强度不同,使草地退化程度也不同。草地退化后,使其土壤肥力降低,土壤微生物数量和微生物种类也降低。草地退化使土壤生化活性降低,从而影响到土壤的碳素循环^[14]。退化草地的植物生物量及地下根系生物量都较低。因而退化暗沃寒冻锥形土 CO_2 释放速率较低。

综上所述,土壤 CO_2 排放速率主要受土壤有机物质的数量、微生物类群的数量及活性和根系生物量的制约。环境因子,主要为热量和水分条件,是通过影响土壤生物学过程及生物化学反应速度,从而影响土壤 CO_2 的排放。因此,土壤 CO_2 排放表现出对温度的强烈依赖性。放牧强度增大,人为活动干扰致使土壤退化, CO_2 释放速率明显减低。

参 考 文 献

1. Bertram Ostendorf. Modeling the influence of hydrological processes on spatial and temporal patterns of CO₂ soil efflux from an arctic tundra catchment. *Arctic and Alpine Research*, 1996, 28(3):318~327
2. Ouyang Y, Boersma L. Dynamic oxygen and carbon dioxide exchange between soil and atmosphere: I. Model development. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1992, 56:1695~1702
3. Pieter P. Tans, Peter S. Pakwin. 气候变化与二氧化碳永恒(译文). *Ambio*, 1995, 24(6):375~376
4. Houghton J T, MeraFilho L G, et al. *Climate Change 1994*. Cambridge University Press, 1998. 16~17
5. 张新时. 西藏高原植被的高原地带性. *植物学报*, 1978. 20(2):140~149
6. 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
7. Steven F, Chris T G, Cheng Weixin. Diurnal and seasonal patterns of ecosystem CO₂ efflux from upland Tundra in the foothills of the Brooks Range, Alaska, U.S.A. *Arctic and Alpine Research*, 1996, 28(3):328~338
8. Seiko O, Shuichi H. Diel and seasonal changes in carbon dioxide concentration and flux in an andisol. *Soil Sci.*, 1995, 160(2):117~124
9. Compbell J A, Frascarelli L. Measurement of CO₂ evolved from organic soil at different depths *in situ*, *Can. J. Soil Sci.*, 1981, 61:137~144
10. 乐炎舟, 张金霞, 王在模. 高寒草甸土壤有机氮矿化之研究. 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. 155~168
11. 朱桂茹, 李家藻, 唐诗声, 杨涛. 海北高寒草甸生态系统定位站土壤微生物各主要类群的组成及其数量变动. 高寒草甸生态系统第1集. 兰州: 甘肃人民出版社, 1982. 144~161
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. 高寒草甸生态系统第4集. 北京: 科学出版社, 1995. 169~178
13. Silvola J, Alm J, Ahlholm U. The effect of plant roots on CO₂ release from peat soil. *Suo* 1992, 43, 259~262
14. 龙章富, 刘世贵. 退化草地土壤农化性状与微生物生化活性的初步研究. *土壤学报*, 1995, 32(2):222~227

DIEL AND SEASONAL CHANGES OF CARBON DIOXIDE EMISSION FROM MOLLIC-CRYIC CAMBISOLS ON DEGRADED GRASSLAND

Zhang Jin-xia Cao Guang-min Zhou Dang-wei Zhao Xin-quan
Zhou Xing-min

(The Northwest Plateau Institute of Biology, The Chinese Academy of Sciences, Xining 810001)

Summary

Diel and seasonal changes of carbon dioxide emission from Mollic-Cryic Cambisols on degraded grassland were studied. The results indicated that: (1) Diel maximum rate of CO₂ efflux appeared at 12:00~16:00 and minimum at 4:00~8:00. Rate of CO₂ efflux in the daylight was greater than that in the night. (2) There were significant seasonal dynamic and phenophase changes in rate of CO₂ emission. Diel average rate of CO₂ emission was $320.86 \pm 130.49 \text{mgm}^{-2}\text{h}^{-1}$. Phenophase variation was exuberance > withering > green up. (3) Diel change course of rate of CO₂ emission was controlled by air temperature and soil surface temperature. However, the correlations between seasonal dynamic of rate of CO₂ emission and air temperature, soil surface temperature, and temperature of each layer of soil (5cm, 10cm, 15cm, 20cm, 30cm) were very significant ($P < 0.01$). (4) The rate of CO₂ emission from Mollic-Cryic Cambisols on the over grazing pasture is lower than that on the moderately grazing pasture.

Key words Rate of CO₂ emission, Mollic-Cryic Cambisols, Air temperature, Soil temperature