

植物生长季退化草毡寒冻锥形土 CO₂ 释放特征^{*}

周党卫 曹广民^{**} 张金霞 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】 对中国科学院海北高寒草甸生态系统定位站地区退化草毡寒冻锥形土 CO₂ 释放的全天候连续观测结果表明,退化草毡寒冻锥形土 CO₂ 的释放有明显的日变化和季节动态,日最大释放速率出现于 12 00~14 00,最小释放速率出现于 6 00~8 00;植物生长季的最大振幅为 462.49 mg·m⁻²·h⁻¹(8月18日),最小振幅为 114.97 mg·m⁻²·h⁻¹(5月9日),CO₂ 释放速率白天大于夜晚.不同物候期 CO₂ 释放速率亦不同,草盛期>枯黄期>返青期.最大日均值为 480.76 mg·m⁻²·h⁻¹(8月18日),最小日均值为 140.77 mg·m⁻²·h⁻¹(5月9日).释放速率与气温、地表温度及土壤 5 cm 地温均呈显著或极显著相关关系,表明温度是决定 CO₂ 释放速率季节变化的首要因素.

关键词 退化 草毡寒冻锥形土 CO₂ 释放速率 季节变化 日变化

文章编号 1001-9332(2003)03-0367-05 **中图分类号** S151 **文献标识码** A

CO₂ flux characteristics from degenerated mat cryo-sod soil during plant growing period. ZHOU Dangwei, CAO Guangmin, ZHANG Jinxia, ZHAO Xinquan, ZHOU Xingmin (Northwest Plateau Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810001, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2003, 14(3): 367 ~ 371.

The carbon dioxide (CO₂) emission rate was studied in the degenerated mat cryo-sod soil covered with alpine *Kobresia humilis* meadow at the Haibei alpine meadow ecosystem research station, with CID-301ps CO₂ analytical instrument during plant growth period (May - Sep, in 1998). The results showed that the CO₂ emission rate had obvious daily variation and seasonal dynamics. The maximum rate of CO₂ emission appeared at 12 00 ~ 14 00, and the minimum rate appeared at 6 00 ~ 8 00. The max daily amplitude was 462.49 mg·m⁻²·h⁻¹, while the minimum daily amplitude was 114.97 mg·m⁻²·h⁻¹. The CO₂ emission rate varied with phenological periods, and the order was exuberance > withering > green up. The maximum daily average value was 480.76 mg·m⁻²·h⁻¹ (Aug. 18th), and the minimum daily average value was 140.77 mg·m⁻²·h⁻¹ (May. 9th). Correlation analysis showed that there was a significant relationship between CO₂ emission rate and air temperature, soil surface temperature and soil temperature in 5 cm, 10 cm, 15 cm, 20 cm, and 30 cm. Temperature was the dominant factor that affected the CO₂ emission rate in degenerated mat cryo-sod soil.

Key words Degenerated, Mat cryo-sod soil, CO₂ emission rate, Seasonal dynamic, Daily variation.

1 引言

CO₂ 是大气中最重要温室气体之一.其排放量大,温室效应强烈,对全球气候变暖的贡献作用约为 70%,远大于其它温室气体的增温作用^[7].当前大气中 CO₂ 以每年 1.5 mg L⁻¹ 速率增长,全球平均气温每 10 年将上升约 0.25℃,对人类生存的地球生态环境产生着深刻的影响.因此,近 50 年来,大气温室气体 CO₂ 浓度变化引起全球变暖的问题,成为人们最为关注的科学问题之一^[1,10,14].

土壤是大气温室气体重要发生源或汇^[4,11].广布于青藏高原的高寒嵩草草甸覆被下的草毡寒冻锥形土^[4]有机质含量高达 9.0%~13.0%,土壤水分常年保持在 35%~45%之间,植物生长季水热同期,为温室气体产生提供了丰富的物质基础和良好的季节环境条件.但是近 10 年来,随放牧强度的增加,作为冬春草场的高寒草甸退化面积急剧增加,草

毡表层土壤碳素贮量急剧减少,表层消失殆尽.然而,关于草毡寒冻锥形土土壤 CO₂ 释放规律研究较少^[19,18,19,21],对过度放牧作用下退化草毡寒冻锥形土土壤 CO₂ 释放特征报道更为罕见.本实验于 1998 年植物生长季进行了退化草毡寒冻锥形土土壤 CO₂ 释放特征的研究,旨在进一步深入探讨退化高寒草甸生态系统碳素循环及揭示青藏高原独特生态环境下 CO₂ 释放规律及其影响因素,为准确估算 CO₂ 释放强度提供科学依据.

2 研究地区与研究方法

2.1 研究地区概况

实验地设在中国科学院海北高寒草甸生态系统定位站,

^{*}国家重点基础研究发展规划项目(G1998040800)、国家自然科学基金项目(30070147)、中国科学院知识创新工程重大项目(KZCX1-SW-01-01)和中国科学院知识创新方向资助项目(KSCXZ-1-07).

^{**}通讯联系人. E-mail:Caogm@mail.nwipb.ac.cn.

2000-12-13 收稿,2001-03-19 接受.

地理位置为 37°29' ~ 37°45' N, 101°12' ~ 101°33' E, 海拔 3200 ~ 3400 m. 具有明显的高原大陆性气候特征, 冷季漫长而寒冷, 暖季短暂而湿润. 气温年较差较小而日较差悬殊, 太阳辐射强烈. 实验区年均气温 - 1.7 °C, 最冷月(1月)平均气温为 - 17.4 °C, 最热月(7月)9.6 °C, 全年 70% ~ 80% 的天数出现负温. 年降水量 618 mm, 主要集中于 6 ~ 8 月, 年蒸发量 1 200 ~ 1 458 mm.

高寒高草草甸植被以矮高草 (*K. humilis*) 为优势建群种, 总盖度达 90% 以上, 植被生长良好. 土壤草毡表层发育完整, 未发生剥蚀脱落, 鼠类活动较少, 地表鼠丘极为罕见. 退化高寒高草草甸植被优势种群发生演替, 矮高草为以棘豆 (*Oxytyle* sp.)、甘肃棘豆 (*Pedicularis kasuensis*)、摩拉草 (*Morira chinensis*)、囊吾 (*Ligularia uirgariae*)、矮火绒草 (*Leontopodium nanum*)、麻花苣 (*Gentiana farreri*) 等次优势种或伴生种杂草所取代, 盖度降至 20% ~ 50%. 个别地段甚至可降到 5% ~ 20%, 杂类草寥寥无几. 鼠类活动频繁, 地表鼠丘比比皆是, 土壤草毡表层和暗沃表层剥蚀脱落面积达 30%, 部分地段裸露土层, 经风力搬运形成沙砾化退化草场“黑土滩”. 本研究以分布于定位站地区的退化高寒高草草甸覆被下的退化草毡寒冻锥形土^[2]为研究对象.

2.2 研究方法

气体采用由玻璃纤维增强塑料制作的密闭箱进行收集. 收集箱分为箱体(高 300 mm, 内径 245 mm)与底座(高 100 mm, 内径 245 mm)两部分. 测定时, 将气体采集箱的底座埋入地下 5 cm, 四周用湿土密封填实, 剪去箱体内地表植物并清除地表凋落物. 箱体与底座间以水密封, 气体采用美国 CID 公司生产的 CF-301PS CO₂ 分析仪测定, 用闭路系统 Absolute 功能进行测定, 流速 0.5 L · min⁻¹, 以近地表植物冠层 CO₂ 浓度作为本底值, 测定箱体内 10 min 土壤 CO₂ 释放的浓度的增加量, 每次测定前用 374.42 mg · kg⁻¹ 标准 CO₂ 气进行仪器校正. 土壤 CO₂ 的释放速率由下式计算:

$$F = W \cdot dc / dt$$

式中, W 为箱体内气体经温度和压力校正后的质量流速 ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$); dc / dt 测定时间内箱体内 CO₂ 浓度的变化速率.

实验在 1998 年 5 ~ 9 月进行, 在退化区随机取点, 每个实验样点设 3 个重复, 每次测定都另外选点. 观测频度为每月两次, 分别在每月 3 日和 18 日左右进行. 日观测频度为: 每间隔 2 h 测定一次, 昼夜测定 12 次. 在测定 CO₂ 释放量的同时测定大气温度和 0 ~ 30 cm 的不同土层温度、箱体温度. 在每个测定日同时采集 0 ~ 50 cm 各层土壤, 测定土壤水分.

3 结果与分析

3.1 退化草毡寒冻锥形土 CO₂ 释放速率的日变化

在植物生长季对退化草毡寒冻锥形土 CO₂ 释放速率连续观测结果表明, CO₂ 释放速率呈现明显的周期性变化. 最大释放速率出现在 12 00 ~ 14 00. 最小释放速率出现在 6 00 ~ 8 00, 与王在模等^[18]测定结果相似. 生长季退化草毡寒冻锥形土全

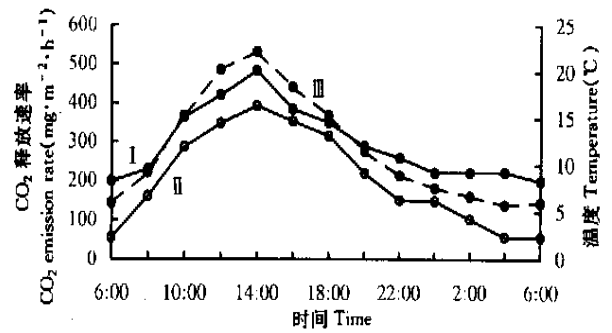


图 1 退化草毡寒冻锥形土 CO₂ 释放速率的日变化进程

Fig. 1 Daily variation of CO₂ emission rate from degenerated mat cryosod soil.

. 释放速率 CO₂ emission rate; . 气温 Air temperature; . 地温 Soil surface temperature.

部观测 CO₂ 日平均释放速率日变化进程见图 1.

由图 1 可见, 退化草毡寒冻锥形土 CO₂ 释放速率的日变化进程为: 6 00 ~ 14 00, 土壤 CO₂ 释放速率逐渐增加, 其变化速率为 32.34 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$; 14 00 以后则呈现缓慢下降趋势, 变化速率为 16.17 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 至次日凌晨又趋于最低点. 这种变化曲线与 Sveussou 等的研究结果相一致^[14, 16, 18, 19], 即日变化呈正弦曲线型. 在整个植物生长季, 白天 CO₂ 的日平均 CO₂ 释放速率为 309.43 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 夜间为 216.40 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 白天是夜间的 1.43 倍. 同时气温和地表温日变化呈正弦曲线型, 与 CO₂ 的日变化趋势一致. CO₂ 释放速率与气温、地表温和 5 cm 地温的相关系数分别为 0.9608、0.9891 和 0.6538, 均达极显著或显著水准, 而与 20 cm、30 cm 地温呈显著负相关, 相关系数分别为 - 0.7304 和 - 0.5882. 说明土壤表层温度是影响土壤 CO₂ 释放的主要因子, 深层土壤温度对 CO₂ 释放日变化贡献很小. 矮高草草甸中无论优势种或伴生种均为多年生植物, 根系主要分布于 0 ~ 10 cm 土壤表层, 大多数土壤动物及微生物也主要分布于此层, 代谢活动强, 是土壤 CO₂ 的主要来源. 白天温度逐渐增高时, 植物根系与微生物呼吸与代谢也随之增强. 夜晚土壤温度逐渐降至零下, 生物代谢减弱很快, CO₂ 释放相应降低.

3.2 不同物候期 CO₂ 释放速率的比较

高寒草甸植物生长季一般划分为返青期(5月初 ~ 6月底)、草盛期(7月初 ~ 8月底)和枯黄期(9月)3 个物候期. 不同物候期的退化草毡寒冻锥形土 CO₂ 释放速率变化也很明显(图 2). 草盛期, 退化草毡寒冻锥形土 CO₂ 释放速率平均为 388.4 ± 117.46 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 最大释放速率为 806.88 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ (8月18日), 最小释放速率为 178.52 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$.

h⁻¹ (8月3日). 返青期, CO₂ 释放速率平均值为 220.19 ± 86.22 mg · m⁻² · h⁻¹, 其中最大值为 592.69 mg · m⁻² · h⁻¹ (6月19日), 最小值为 101.21 mg · m⁻² · h⁻¹ (5月9日). 枯黄期 CO₂ 释放速率的平均值为 261.86 ± 76.65 mg · m⁻² · h⁻¹, 最大值为 439.66 mg · m⁻² · h⁻¹ (9月3日), 最小值为 125.75 mg · m⁻² · h⁻¹ (9月23日). 不同物候期退化草毡寒冻锥形土 CO₂ 释放速率的大小顺序为草盛期 > 枯黄期 > 返青期.

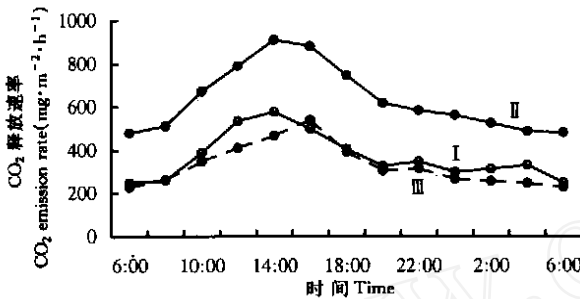


图2 不同物候期退化草毡寒冻锥形土 CO₂ 释放速率的物候变化
Fig. 2 Daily variation of CO₂ emission rate in different phenological periods from degenerated mat cryo-sod soil.
· 返青期 Green up; · 草盛期 Exuberance; · 枯黄期 Withering.

3.3 退化草毡寒冻锥形土 CO₂ 释放速率季节变化

由图3可以看出,退化草毡寒冻锥形土 CO₂ 释放速率呈明显的季节变化. 在生长季中,最高值出现在8月下旬,为 806.88 mg · m⁻² · h⁻¹ (8月18), 最低值为 101.21 mg · m⁻² · h⁻¹ (5月9). 生长季土壤 CO₂ 释放速率的范围为 276.27 ± 85.64 mg · m⁻² · h⁻¹, 较正常草毡寒冻锥形土测定结果^[18] (451 ~ 807 mg · m⁻² · h⁻¹) 及 Svensson 等^[16] 在地处亚北极圈的挪威 Hardangervidda 定位站测定结果 (410 mg · m⁻² · h⁻¹) 低, 比在正常放牧下的草毡寒冻锥形土测定值 (441.72 mg · m⁻² · h⁻¹) 较小^[21]. 同时,退化草毡寒冻锥形土 CO₂ 释放速率从5月份牧草返青开始, 随温度升高而逐渐增大, 至8月下旬出现峰值, 随后迅速下降. 其与日均温及土壤 5 cm 地温变化趋势一

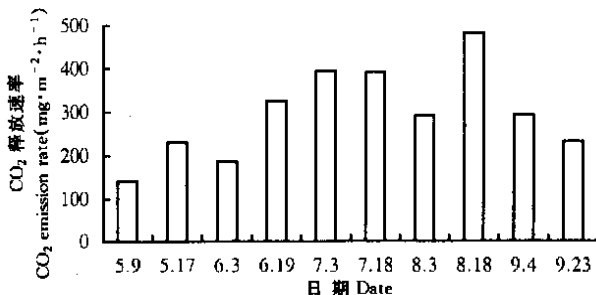


图3 退化草毡寒冻锥形土 CO₂ 释放速率的季节变化
Fig. 3 Seasonal changes of CO₂ emission rate from degenerated mat cryo-sod soil.

致, 相关系数分别为 0.9279 和 0.9541, 均达到极显著相关水平.

由图4可见,在整个植物生长季,气温和土壤温度 0 ~ 24 范围内, CO₂ 释放速率与 5 cm 土壤温度及大气温度的关系可用 $F = Ae^{Bt}$ 表示, 其中, F 为 CO₂ 释放速率, t 为温度, A, B 均为常数, 拟合得: $F = 154.03e^{0.06964t_a}$, $r^2 = 0.7341^{**}$, $n = 120$ (其中 t_a 为气温); $F = 87.549e^{0.1074t_s}$, $r^2 = 0.7179^{**}$, $n = 120$ (其中 t_s 为 5 cm 土壤温度). 均达到极显著相关水平, 与 Kucera^[8] 在高草草原拟合 $\ln CO_2 = -1.66 + 2.20 \ln(T + 10)$, $R^2 = 0.89$ 结果相一致. 这说明密苏里高草草原与青藏高原退化草毡寒冻锥形土可能有相同的释放机制, 温度均为影响土壤呼吸的主要限制因子. 根据公式可估算出 CO₂ 在退化草毡寒冻锥形土中的释放速率.

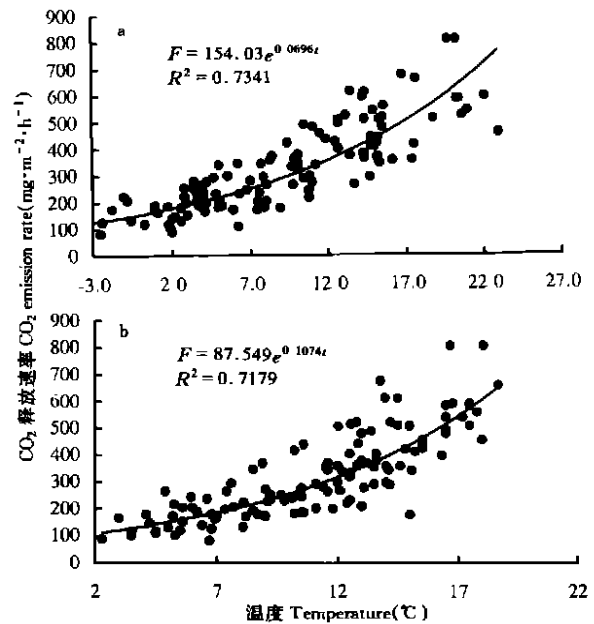


图4 退化草毡寒冻锥形土 CO₂ 释放速率与温度关系
Fig. 4 Relationship of CO₂ emission rate and temperature in degenerated Mat cryo-sod soil.
a) 气温 Air temperature; b) 5 cm 土温 Temperature at 5 cm soil layer.

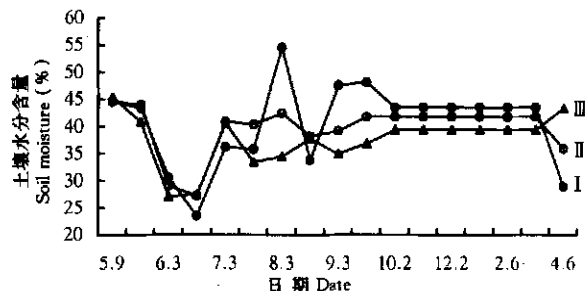


图5 退化草毡寒冻锥形土土壤水分季节变化
Fig. 5 Seasonal changes of soil moisture in mat cryo-sod soil.
· 0 ~ 10 cm; · 10 ~ 20 cm; · 20 ~ 30 cm.

由图 5 可以看出,整个生长季土壤表层水分变化较小(除 6 月份约为 30%外)。相关分析表明,土壤表层湿度与 CO₂ 释放速率季节变化不相关,说明在季节动态中水分不是 CO₂ 释放速率变化的制约因子。6 月初和 8 月初 CO₂ 释放速率出现低谷值,可能是由于天气影响(6 月初冰雹,8 月初小雨)导致气温下降,进而影响到微生物及根系活性。其原因有待于进一步研究。

4 讨 论

4.1 天气状况对退化草毡寒冻锥形土 CO₂ 释放速率的影响

天气状况对退化草毡寒冻锥形土 CO₂ 释放速率的影响非常显著。如草盛期的 8 月 18 日和枯黄初期的 9 月 4 日,由于天气变化,土壤 CO₂ 释放速率并不依日变化进程规律而变化(表 1)。多云和阴天主要影响到大气压力,随着天气由晴转为多云或阴天,往往伴随着水蒸气压力升高,影响土壤空气扩散。在降雨情况下,土壤气孔被封闭,通气性受到影响。土壤 CO₂ 气体不易产生或产生后溶于水,扩散路径增长,且 CO₂ 在水中的扩散系数很低(1.777×10^{-5}),使土壤气体和大气不易进行交换。天气变化也影响地温,从而影响到微生物活性和根系的呼吸。在晴天,气温和地温升高,微生物数量和活性增强,土壤有机碳氧化作用加强,且大气湍流增强,土壤温室气体释放速率也较大。

表 1 不同天气状况下的 CO₂ 释放速率

日期 Date (month, date)	时间 Time	天气状况 Weather state	地表温度 Soil surface temperature (°C)	5 cm 地温 Soil tempera- ture at 5 cm soil layer (°C)	释放速率 Rate in CO ₂ flux (mg·m ⁻² · h ⁻¹)
8.18	10 00	晴 Sunny	16.8	12.8	516.03
	12 00	多云 Cloudy	21.5	13.8	511.89
	14 00	晴 Sunny	26.0	16.7	806.87
	16 00	阴 Cloudy	24.6	18.1	457.69
	18 00	晴 Sunny	20.0	18.7	559.62
9.4	10 00	晴 Sunny	13.9	8.9	369.34
	12 00	多云 Cloudy	12.0	10.6	439.66
	14 00	阴 Cloudy	14.0	11.6	372.06
	16 00	中雨 Middle rain	11.9	11.6	344.79
	18 00	小雨 Little rain	12.0	11.6	293.23

4.2 温度对土壤 CO₂ 释放速率的影响

土壤 CO₂ 的释放作用是土壤微生物分解有机质和根系呼吸作用的共同结果。因此,凡能影响微生物活性、数量及根系新陈代谢的因子,均会对退化草毡寒冻锥形土 CO₂ 的释放速率产生影响。植物生长季(5~9 月)将土壤 CO₂ 的日平均释放速率与日平均气温、地表温度及 5、10、20 和 30 cm 地温进行回归分析,结果表明,土壤 CO₂ 释放速率与气温、地表

温度、5 cm 地温均呈显著正相关关系。说明退化草毡寒冻锥形土的 CO₂ 释放速率的日变化动态主要受 5 cm 以上土壤温度影响,深层土壤贡献不明显。而土壤 CO₂ 季节平均释放速率与平均气温、地表温度及 5、10、20 和 30 cm 地温回归分析结果表明,退化草毡寒冻锥形土 CO₂ 释放速率的季节动态与平均气温、地表温度和土壤 30 cm 以上各层均呈现出极显著相关关系,其相关系数分别为 0.928、0.934、0.954、0.926、0.883 和 0.883。这说明在季节动态中,30 cm 以上各层对土壤 CO₂ 的贡献作用都很大。这种差别可能是由于在日变化中,地表层温度升高较快,微生物及土壤酶活性较高。温度向下传递慢,导致 10 cm 以下各层有较大滞后性。因此,在季节动态中表现出 10 cm 下层地温对 CO₂ 释放速率影响也较大。其原因有待于进一步研究。

气温、土壤温度不但影响微生物类群的数量,而且影响到微生物活性。微生物细胞活动能力与温度有关。在植物生长季,气温增高,降水也较高,水热同期适合于微生物活动,也有利于植物根系生长。朱桂茹等^[22]研究表明,各种植被下的各种土壤微生物数量高峰期均出现在 7~9 月;纤维素分解作用的高峰期也出现在 7 月下旬~9 月中旬,分解率达 24.25%~53.22%^[9];王启兰等^[17]对退化草甸土壤中的真菌生物量研究表明 0~10 cm 土壤中的菌丝生物量较高,而 10~20 cm 土壤层的生物量较低。可能是由于鼠类为害、过牧情况下,植被受到破坏,而土壤沙质含量较高,有机质含量和根系分泌物较少,限制了微生物活动。杨涛等^[20]研究表明,退化草甸土中呼吸作用与细菌和真菌的数量相关性显著($r^2 = 0.9990$ 和 0.9936),其与草甸土呼吸作用与土壤脲酶和过氧化物酶的活性均为显著相关,而与蔗糖酶相关性较差。可见温度影响土壤 CO₂ 释放主要是通过影响土壤中的微生物数量和活性而起作用。

4.3 土壤水分对 CO₂ 释放速率的影响

杨涛等^[20]研究表明,在杂类草甸土中,呼吸作用与嫌气固氮作用相关性显著($r^2 = 0.9942$);与碳化作用的相关性次之($r^2 = 0.9550$)。土壤 CO₂ 释放速率与土壤全氮量、pH、代换量、有机质、速效钾和水解物均有显著相关。这表明水分可通过影响微生物及根系物质代谢或土壤酶活性而影响土壤呼吸。退化草毡寒冻锥形土在植物生长季土壤水分测定结果表明,5~9 月 0~10 cm 土壤含水量在 36.74%~59.79%之间,海北高寒草甸生态系统定位站地区年均降水量为 618 mm,在植物生长季节同时降雨量

也较高,土壤水分充足,完全满足微生物和植物根系的代谢需要。因此,土壤 CO₂ 释放速率与土壤水分在植物生长季节未达到相关水准,水分没有成为土壤呼吸的限制因子。在土壤含水量不成为限制因素的条件下,土壤呼吸与土壤温度呈正相关^[5,8,12,13]。而在水分含量成为限制因子的干旱、半干旱地区,水分含量与温度可能共同起作用^[6]或水分成为主要限制因子^[3,4]。

4.4 放牧强度对 CO₂ 释放的影响

青藏高原地区地势高亢,气候寒冷,生长季短,植物生长缓慢,生物量低。近年来,由于经济发展的需要,牧民盲目增加载畜量,致使草场退化严重。观测点周围的草地已经严重退化,植被稀少,许多地区土地裸露,形成黑土滩。经测定土壤有机碳总量约为 6%,较正常轻牧区低 2%~6%,地上生物量为正常放牧草地的 11.46%,地下生物量也少。在植物生长季退化草地 CO₂ 释放速率也较正常草地减小 137.47 mg·m⁻²·h⁻¹^[22]。过度放牧已严重影响土壤有机碳的累积,改变土壤结构、质地和肥力,土壤微生物数量和种类降低,因此影响到土壤的碳素循环。使土壤向大气释放的 CO₂ 可能较正常草地少^[22],但是土壤表层损失的有机碳的去向仍值得进一步研究。目前,对于退化草地的治理主要是进行封育、减轻放牧或进行人工草地等。通过这些措施控制放牧强度,促进植被恢复,调节土壤碳平衡,可能是调节青藏高原地区温室气体排放的有效途径。

4.5 根系呼吸对土壤 CO₂ 释放速率的影响

根系呼吸也是影响土壤 CO₂ 释放的一个重要因素,Silvola 等^[15]的研究结果表明,根系呼吸可占到土壤呼吸的 10%~40%,有时超过 60%^[8]。这与测定地的环境和植被有很大关系。但土壤中植物根系与微生物间关系密切。退化草甸土根系在土壤呼吸中的贡献作用有待进一步研究。

参考文献

- Bertram O. 1996. Modeling the influence of hydrological processes on spatial and temporal patterns of CO₂ from an arctic tundra catchment. *Arctic Alpine Res*, **28**(3):318~327
- Chinese Soil Taxonomy Research Group, Institute of Soil Science, Academia Sinica and Cooperative Research Group on Chinese Soil Taxonomy. 1995. Chinese Soil Taxonomy (Revised Proposal). Beijing: China Agricultural Science and Technology Press. (in Chinese)
- Cui X-Y (崔晓勇), Chen S-Q (陈四清), Chen Z-Z (陈佐忠). 2000. CO₂ release from typical *Stipa grandis* grassland soil. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), **11**(3):390~394 (in Chinese)
- Duxbury JM, Harper LA, Mosier AR. 1993. Contributions of agroecosystems to global climate change. In: Rolston DE ed. *Agricultural Ecosystem Effects on Trace Gases and Global Climate*

- Change. ASA Spec. Publ. 55. ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI. 1~18
- Edwards NT. 1975. Division S—Forest and range soils: Effects of temperature and moisture on carbon dioxide evolution in a mixed deciduous forest floor. *Soil Sci Soc Amer Proc*, **39**:361~365
- Garrett HE and Cox GS. 1973. Carbon dioxide evolution from the floor of an oak-hickory forest. *Soil Sci Soc Amer Proc*, **37**:641~644
- Houghton J. 1998. Trans. Dai X-S (戴晓芬), et al. 1994. Global Warm. Beijing: Meteorology Press. 28 (in Chinese)
- Kucera CL, Kirkham DR. 1971. Soil respiration studies in tallgrass prairie in Missouri. *Ecology*, **52**(5):912~915
- Li J-Z (李家藻), Zhu GR (朱桂茹), Yang T (杨涛), et al. 1982. Studies of carbon dioxide evolution and cellulose decomposition in soils at the Haibei research station of alpine meadow ecosystem. In: Xia W-P (夏武平) ed. *Alpine Meadow Ecosystem*. Lanzhou: Gansu People's Press. 162~173 (in Chinese)
- Ouyang Y, Boersma L. 1992. Dynamic and diurnal exchange between soil and atmosphere. Model simulation. *Soil Sci Soc Am J*, **56**:1702~1710
- Raich WJ, Schlesinger WH. 1992. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tullus*, **44B**:81~99
- Reiners WA. 1968. Carbon dioxide evolution from the floor of three Minnesota forests. *Ecology*, **49**:470~483
- Reinke JJ, Adriano DC, McLeod KW. 1981. Effects of litter alteration on carbon dioxide from a south carolina pine forest floor. *Soil Sci Soc Am J*, **45**:620~623
- Seiko O, Shuichi H. 1995. Daily and seasonal changes in carbon dioxide concentration and flux in an andisol. *Soil Sci*, **160**(2):117~124
- Silvola J, Alm J, Ahlholm U. 1992. The effect of plant roots on CO₂ release from peat soil. *Suo*, **43**:259~262
- Svensson BH, Veum AK, Kjølvi SK. 1975. Carbon losses from tundra soils. In: Wielgolaski FE, ed. *Fennoscandian Tundra Ecosystems 1. Plant and Microorganisms*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag. 279~286.
- Wang Q-L (王启兰), Li J-Z (李家藻). 1991. Determination of fungal biomass in soil of different vegetations of alpine meadow ecosystem. In: Xia W-P (夏武平) ed. *Alpine Meadow Ecosystem*. 3. Beijing: Science Press. 267~272 (in Chinese)
- Wang Z-M (王在模), Yue Y-Z (乐炎舟), Zhang J-X (张金霞). 1982. Preliminary studies on respiratory intensity of alpine soil. *Alpine Meadow Ecosystem*. Lanzhou: Gansu People's Press. 174~183 (in Chinese)
- Wen Y-P (温玉璞), Tang J (汤洁), Shao Z-Q (邵志清), et al. 1997. A study of atmospheric CO₂ concentration variations emission from the soil surface at Mt. Waliguang Quarterly. *J Appl Meteorol* (应用气象学报), **8**(2):129~136 (in Chinese)
- Yang T (杨涛), Jiang W-P (姜文波), Sun X-C (孙希春), et al. 1989. Studies on respiration of soils under different vegetations of the alpine meadow. *Acta Pedol Sin* (土壤学报), **26**(2):186~192 (in Chinese)
- Zhang J-X (张金霞), Cao G-M (曹广民), Zhou D-W (周党卫), et al. 2001. CO₂ emission of mat cryo-sod soil in the Haibei alpine meadow ecosystem. *Acta Ecol Sin* (生态学报), **21**(4):544~549 (in Chinese)
- Zhu GR (朱桂茹), Li J-Z (李家藻), Yang T (杨涛), et al. 1982. Microbiological studies in soils at the Haibei research station of alpine meadow ecosystem 1. Seasonal changes of the number and constitution of the main groups of soil microorganism. In: Xia W-P (夏武平) ed. *Alpine Meadow Ecosystem*. Lanzhou: Gansu People's Press. 144~161 (in Chinese)

作者简介 周党卫,男,1974年生,硕士,助理研究员,主要从事全球变化的研究,发表论文5篇。Tel:0971-6153387, E-mail:dangweizhou@sina.com