

文章编号: 1007-0435(2006)02-0165-05

草毡寒冻雏形土有机质补给、分解及大气 CO₂ 通量交换

李英年¹, 王勤学², 杜明远³, 赵 亮¹, 徐世晓¹,
唐艳鸿², 于贵瑞⁴, 赵新全¹, 古 松¹

(1. 中国科学院西北高原生物研究所, 青海西宁 810001; 2 日本国立环境研究所, 日本筑波 3050053;
3 日本农业环境技术研究所, 3058604; 4 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要: 调查草毡寒冻雏形土生物量及土壤有机质, 利用涡度相关技术观测该区域作用层与大气 CO₂ 通量。结果表明: 地下 90% 生物量集中于 0~ 10 cm 的表土层, 年总净初级生产量约 935.0 g/m²; 土壤有机质含量在 6.401~ 7.060% 之间; 净 CO₂ 通量呈明显的日变化和季节变化规律, 5 月中旬到 9 月底为 CO₂ 的净吸收 (780 g CO₂/m²), 其中以 7 月最高, 净吸收量明显高于非生长季的, 10 月到翌年 5 月初 CO₂ 的净排放量 (383 g CO₂/m²); 全年固定碳高达 397 g/m²。

关键词: 草毡寒冻雏形土; 草毡表层; 有机质; 生物量; 净初级生产力; CO₂ 通量

中图分类号: S812.1 文献标识码: A

A Study on Replenishment and Decomposition of Organic Matter in Mat-Cryic Cambisols CO₂ Flux Between Vegetation and Atmosphere

LI Ying-nian¹, WANG Qin-xue², DU Ming-yuan³, ZHAO Liang¹, XU Shi-xiao¹,
TANG Yan-hong², ZHAO Xin-quan¹, YU Gui⁴

(1. Northwest Institute of Plateau Biology, CAS, Xining 830001, China; 2 National Institute for Environmental Studies, 3050053, Japan;
3 National Institute for Agro-Environmental Science, 3058604, Japan;
4 Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100001 China)

Abstract: In Mat-Cryic Cambisols region, biomass of growing plants and soil organic matter (SOM) were investigated, and eddy covariance of CO₂ flux between vegetation and atmosphere was observed. The results suggested that 1) more than 90% of the underground biomass was concentrated in the soil layer of 0~ 10 cm, annual net primary production was about 935.0 g/m²; the content of SOM was ranged from 6.401% to 7.060%. 2) There was significant daily and seasonal variation in CO₂ flux of alpine meadow ecosystem. As for seasonal dynamic, it is net CO₂ influx (780 g CO₂/m²) from middle May to end of September, and monthly peak is July; net CO₂ influx volume exceed net CO₂ efflux (383 g CO₂/m²) from first October to May. Annual net CO₂ flux is 397 g/m².

Key words: Mat-Cryic Cambisols; Matric epipedon; Organic matter; Biomass; Net primary production; CO₂ flux

寒冻雏形土 (Cryic Cambisols) 过去多称高山草甸土。因温湿度差异又分为草毡寒冻雏形土 (Mat-Cryic Cambisols) 和暗沃寒冻雏形土 (Mol-Cryic Cambisols)。草毡寒冻雏形土多见于以嵩草 (*Kobresia*) 属为主要植被类群的平缓滩地或山地阳坡。寒冻雏形土由于温度低土壤潮湿不利于植物残体的分解, 在土壤表

层聚集了很高的土壤有机质。在气候发生变化, 这些未分解或半分解的有机物质将在碳通量交换过程中占重要的影响作用。本文就近期涡度相关法对 CO₂ 通量观测资料, 联系有关其它工作基础^[1-4], 对草毡寒冻雏形土土壤有机质的补给、时空变化、分解, 及其植被-大气 CO₂ 通量交换过程等给予分析报道。为中国陆地和

收稿日期: 2005-08-11; 修回日期: 2006-02-17

基金项目: 中国科学院知识创新工程重大项目 (KZCX1-SW-01-01A); 国家重点基础研究发展规划项目 (2002CB412501); 中日合作“以 21 世纪亚洲陆地生态系统碳管理为目标的综合碳收支研究”及中日合作“亚太地区环境创新战略计划 (APES)”

作者简介: 李英年 (1962-), 男, 青海乐都人, 副研究员, 主要从事生物气象、全球变化研究, E-mail: ynli@nwipb.ac.cn

近海生态系统碳收支研究提供基本参数,对了解高寒草甸生态系统碳源碳汇功能,准确评估青藏高原高寒草甸在全球气候变化中的作用,及人类活动对高寒草甸植被-大气CO₂释放过程等提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究地区自然概况

本研究在中国科学院海北高寒草甸生态系统定位站(海北站)(37°29′~37°45′N, 101°12′~101°23′E)进行,地形开阔,海拔3200~3600 m。气温极低,无明显四季之分,仅有冷暖二季之别,年均气温-1.6℃,7月和1月平均气温为10.8℃和-15.8℃;年均降水量580 mm,主要集中于5-9月,占全年的80%,10-翌年4月降水极少。相对无霜期约25 d左右,在7月仍可出现霜冻、结冰、降雪(雨夹雪)等天气现象^[5]。山地阳坡多以矮蒿草(*Kobresia humilis*)草甸为主;山地阴坡和滩地多为金露梅灌丛(*Fornation dasiphora Fruticosa*)草甸;山地阳坡为小蒿草(*Kobresia pygmaea*)草甸;植被低矮,初级生产力较低等^[6,7]。土壤为洪积-冲积物、坡积-残积及古冰水沉积母质,土层浅薄,有机质含量丰富^[5]。

1.2 研究材料

1.2.1 2001年9月开始,在海北站3类高寒草甸植被类型区陆续安装植被-大气间能量与物质通量的涡度相关技术设备。利用三维超声风速温度计(CSAT3,

Campbell Scientific Ltd, USA)和快速响应红外CO₂/H₂O分析仪(IRGA, Li7500, Li-Cor Inc., Lincoln, Nebraska, USA),直接测定三维风速、湿度、温度和CO₂浓度的平均值和瞬时脉动值,以及其它微气象要素等自动观测输出数据。

1.2.2 在不同生长期测定植物地上、地下生物量,以及植物种类组成。地上、地下生物量在每月15日和30日前后3 d内测定,随机选择6~10个50 cm × 50 cm的样方,用剪刀齐地面剪下装入纸袋;地下生物量在上述样方内再随机选择25 cm × 25 cm的二级样方,按0~10、10~20和20~40 cm³个层次,用铁铲和切刀分层取出后及时筛选分检,洗根归袋,尔后在恒温65℃的烘箱中,烘干至恒重后称重(g/m²)。在每月中旬,取回土壤样分析有机质等的动态变化量。

1.2.3 研究资料主要取自2002和2003年土壤有机质,2003年地上、地下生物量和近地层大气CO₂通量,以及2003年有关微气象观测资料。

2 结果与分析

2.1 草毡寒冻锥形土地上、地下生物量特征

高寒草甸植物在日均气温稳定通过0℃时即可萌动发芽,届时20 cm以下土层仍为冻土。当日均气温稳定通过5℃时植物旺盛生长,低于5℃时停止生长。2003年测定结果(表1),地上生物量自4月下旬起缓慢积累,在6-8月水热条件良好,干物质积累迅速,9月初达到最高并保持一段平稳期后逐渐下降。

表1 矮蒿草地上、地下生物量季节变化(g/m²)(2003)

	深度(cm) Depth (cm)	日期(日/月) Date(d/m.)									
		15/5	30/5	15/6	30/6	15/7	30/7	15/8	30/8	15/9	30/9
地上 Above ground	—	23.15	40.86	102.5	168.3	227.8	276.2	334.6	324.1	323.4	319.1
地下 Under ground	0~10	1353.2	1579.3	1575.6	1663.6	1011.9	1190.9	1240.9	1541.0	1495.4	1695.8
	10~20	98.3	135.8	94.5	150.1	114.6	186.3	133.1	130.4	98.9	145.3
	20~40	72.0	71.5	61.5	83.0	224.0	78.2	163.0	79.5	49.5	84.5
	0~40	1523.5	1786.8	1731.7	1896.7	1350.5	1455.4	1537.1	1750.9	1643.8	1925.6

地下生物量随着季节变化呈现“N”型变化特征。以0~40 cm土层地下生物量最高,在9月底可达1925.6 g/m²,其中0~10、10~20和20~40 cm 3个层分别为1695.8、145.3和84.5 g/m²,分别占地下总生物量的88%、8%和4%。表明地下生物量主要集中于0~10 cm表土层。同时表明,地下生物量远比地上高得多,就0~40 cm比较,地下是地上部的5~8倍。

地下生物量季节变化所表现的升高-降低-升高的变化规律,与地上的生长旺盛与缓慢等直接相联系。表现在良好的气候时,地上部生长发育迅速,植物在进行光合作用及发生蒸腾过程的同时,要消耗大量的土壤

水分和能量,相应的要从根系得到一定的能量补充。相反,在生长的前期和后期因气温低,降水少,地上部生长受到抑制,而根系能较多地贮存能量,可满足其发育条件,有利根量的提高。特别是在生长后期到休眠初期地上部停止生长时,土壤仍保持较高的热量条件,根系仍在生长,根量有所增加。只有土温降到界限温度或频繁的冻融或稳定冻结时,根系则才停止生长,而不再累积甚至有所减少。

2003年地下年净初级生产量变化(地上与地下最高值和最低值之差的合计值)为909.9 g/m²,其中地下净生产量为575.2 g/m²,净生产量的周转率(地下

增加量与最高量的比值)为 0.2987。2002 年在同一地区, 地下净生产量为 598.0 g/m², 净生产量的周转率为 0.2817。初步表明, 高寒草甸植被年净初级生产量为 935.0 g/m², 其中地上 348.4 g/m², 地下 586.6 g/m², 地下周转率 0.2902。即在高寒环境, 受高草生物学特性的制约, 净光合产量的 63% 分配于地下(表 1)。

2.2 寒冻锥形土有机质的补给、含量及分解

在高寒草甸, 近地表层形成由活根和死根相互穿插交织成毡状的特殊根系层, 是土壤剖面构成的基本层次, 是高山独特成土过程中逐渐形成的产物, 依其物质构成、形态特征和分布部位称为草毡表层。草毡表层具有寒冻湿度特征^[7], 土壤动物少, 密度低, 作为有机物补给源的实际意义不大。区域大气湿度低, 多年平均绝对湿度 4.5 hPa 左右^[5], 苔鲜等生长受到抑制, 虽有较大面积的分布, 但作为土壤有机物补给源的作用下降。是优良的高寒草甸牧场, 放牧利用普遍, 地上部大多数被采食消耗, 其余的在频繁大风下易受风蚀损失, 或被吹至低洼区随径流带走, 对土壤有机质的补偿能力也较低, 只有少部分以凋落物归还土壤。植被属多年中生, 早中生短根茎密丛性高草属建群, 种类组成丰富, 植株低矮而稠密, 生草过程强烈, 根系发达, 是土壤有机物主要补给源。因此, 土壤有机物的补给主要依赖于根系。

如前所述, 草毡寒冻锥形土地下部分发育旺盛, 根系贮存量较多。因受高海拔的制约冬半年漫长而寒冷, 致使根系在冻结期不易矿化, 即使在夏半年, 也因地温不高和过份潮湿^[8](图 1)而分解较弱, 大部分死根保持原有外形与韧性长期贮留在近地表层。随着新

根茎在表层的生长和伸展, 在短密的茎节上萌生大量须状根系与原有的活根和死根相互交织, 形成覆盖于地表的毡状草皮层, 使表层因不同年龄的活根和保持原状的死根交织盘结, 草毡状有机土壤物质大量积存。层次中草毡状有机物质的数量和体积随着发育年龄增长而增加。提高了土壤有机质。

2002 和 2003 年测定结果, 寒冻锥形土在 5-10 月土壤有机质含量: 0~ 40 cm 在 6.401%~ 7.060% 之间, 0~ 10、10~ 20 和 20~ 40 cm³ 层次分别在 8.069~ 8.650、6.697~ 7.822 和 4.441%~ 5.116% 之间, 自表层向下趋减。在生长初期较高, 在生长旺盛期渐低(2003 年 7 月 15 日测定有误, 仅供参考), 8 月以后植物逐渐枯黄, 有机质含量逐步升高, 又处于积累状态(表 2)。

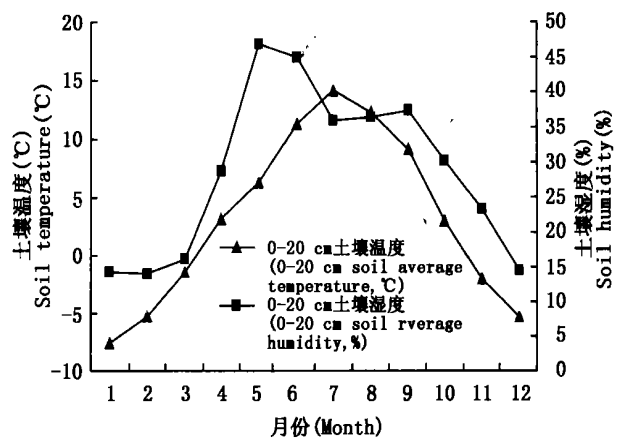


图 1 草毡寒冻锥形土湿度和温度月际分布(0~ 20 cm)

Fig. 1 Monthly variation of soil average humidity and temperature of *M at-Crylic Cam bisols* (0~ 20 cm)

表 2 矮高草草甸土壤有机质季节分布

Table 2 Seasonal variation of soil organic matter of alpine *Kobresia humilis* meadow

年 Year	深度(cm) Depth (cm)	日期(日/月) Date (d/m.)										平均 Average
		30/5	15/6	30/6	15/7	30/7	15/8	30/8	15/9	30/9	15/10	
2002	0~ 10	8.83		8.29		7.80		8.61		9.72		8.650
	10~ 20	7.55		7.25		7.28		7.18		7.85		7.822
	20~ 40	4.51		5.02		5.98		5.25		4.82		5.116
	平均 Average	6.96		6.85		7.02		7.01		7.46		7.060
2003	0~ 10	8.385		9.800		6.398		7.670		8.093		8.069
	10~ 20	7.215		7.100		5.138		6.455		7.557		6.693
	20~ 40	3.838		5.273		3.044		4.955		5.093		4.441
	平均 Average	6.479		7.391		4.860		6.360		6.914		6.401

据测定^[9], 草毡表层有机物分解的起始温度为 5 , 最适温度为 25 , 在 5 以下时温度效应很小, 至最适温度效应则急剧提高。根据海北站测定^[5] 10 cm 土壤 5 月上旬仅 4.5 , 6 月下旬至 9 月初保持 10 左右, 在 7 月也仅为 12~ 14 , 10 月上旬已降至 5 以下。故草毡表层保持生物学零点以上时间 < 150 d, 矿化时间短, 强度小。

影响有机物的分解不仅是温度或湿度, 更重要的

是相互匹配状况。培养实验表明^[9], 在理想的热量和水分条件(35 , 最大持水量 70%)下, 有机物矿化最强烈, 偏离该条件, 分解强度下降, 下降程度与偏离距离呈正相关。在自然条件下, 草毡表层年平均温度较低, 海北站资料显示^[5], 年均气温 - 1.7 , 0~ 320 cm 土层年地温垂直变化不大, 在 2 左右; 7 月平均气温和 10 cm 地温分别为 10.0 和 12.7 , 10 cm 日平均地温 > 10 的时间仅在 6-8 月, 离最适温度距离甚远。由

此认为, 温度是草毡有机物矿化的限制因素。草毡表层分布区水热同期, 暖季地温高, 降水多, 湿度大且常出现饱和水分状况^[8], 雨季后湿度下降, 通气状况获得改善, 但地温已降低。水热条件的这种不良配合有碍残根分解。

2.3 草毡寒冻锥形土近地表层植被-大气 CO₂ 和湍流交换特征

张金霞等研究证实^[4], 在高寒草甸, 植物在非生长季土壤呼吸微弱甚至没有, 当温度略有提高时, 土壤有机质将加速分解。并且认为, 在高寒地区热量条件对于有机氮的矿化效应较气候相对温暖的地区更敏感。近年来随着气候的变暖, 以及放牧强度急剧增加等影响, 导致草场退化, 草毡表层剥落严重, 鼠类活动猖獗, 形成大面积“黑土滩”, 加速了土壤有机碳素的矿化作用。

1984 年李家藻报道^[1], 草毡寒冻锥形土土壤呼吸强度都有明显的季节性动态, 而且呼吸强度与土壤温度呈显著正相关, 与土壤水分则呈弱相关。在草毡状的剖面上, 有机物的剖面分配取决于根系生长分布的就地积累。张金霞等报道^[4], 草毡寒冻锥形土土壤 CO₂ 的释放在植物生长季和非生长季有显著的区别, 季节变化明显。生长季节比非生长季高很多, 以旺季的 7-8 月最高, 符合光合产量最高的特点, 以冬季释放速率最低。其释放速率与气温和地温呈极显著的相关关系, 同时植物活体生物量与土壤 CO₂ 的释放呈极显著正相关关系。

草毡寒冻锥形土, 根系是土壤有机碳的主要来源, 根量是地上生物量的 5~8 倍, 这是高寒地区多年生植物适应其生态环境的主要特征。2003 年 9 月土壤样品分析结果, 有机碳含量在 0~10、10~20、20~40 cm 分别为 4.42%、4.44%、3.77%, 随着土壤剖面深度的增加而递减。有机碳在 0~40 cm 为 130 tC/hm², 无机碳 120 tC/hm², 其总碳量为 250 tC/hm², 与冻原区的碳储存量 16~94 kg/m³ 相比^[4,10], 高寒草甸区碳储存量处在中间范围。

高寒草甸生态系统 CO₂ 通量呈现明显的日变化和季节变化规律。2002 年 1 月 17 日、4 月 15 日、7 月 14 日和 10 月 16 日 CO₂ 通量日变化情况, 该 4 日均为晴天, 部分日午后略为少云, 也可代表年内不同季节 CO₂ 日变化情况。结果以暖季日变化明显, 冷季日变化微弱。在暖季(7 月)CO₂ 通量远高于冷季(1 月)。暖季每日 CO₂ 通量峰值出现在 11:00~14:00 h, 而冷季出现在 14:00~15:00 h。由于高寒草甸分布区降水相对丰富, 土壤湿度高, 在夜间植被(地表)表面易结霜或结露, 以及在降水时, 均可受到水汽的影响, 常在 L I-7500CO₂/H₂O 红外分析仪上形成一定的积水、霜

冻和结露现象, 从而对 CO₂ 通量日变化造成较大的影响, 致使日变化波动明显, 且变化极不平稳(图 2)。

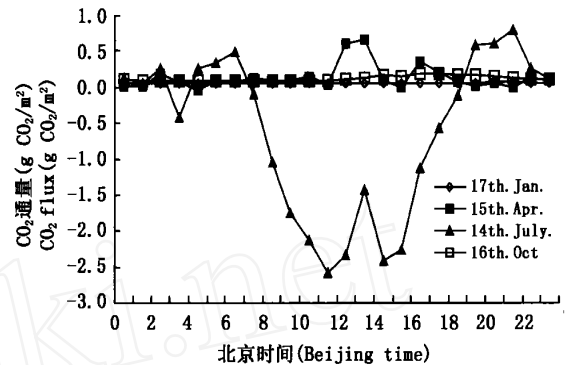


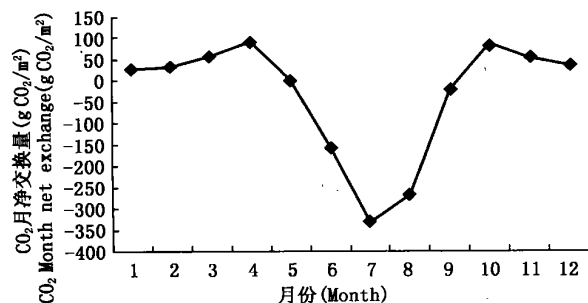
图 2 矮高草甸 CO₂ 通量季节日变化

Fig. 2 Seasonal variation of CO₂ flux of alpine *Kobresia humilis* meadow

从季节动态分析(图 3), 5 月中旬到 9 月主要为 CO₂ 的吸收, 其中以 7 月最高, 吸收量高达 332 g CO₂/m²。在 6 月到 8 月间净吸收为 757 g CO₂/m², 占全年的 90% 以上。6-8 月是植物生长旺盛期, 可积累 80% 的地上生物量, 验证了高寒草甸植物在短促的生长期间具有较高的净初级生产力, 这些特征与强光合有效辐射及白天温度高, 夜间温度很低, 甚至在最暖月日最低温降到 0 以下, 昼夜温差大, 有利于干物质积累有关。在 10 月到翌年 5 月初为 CO₂ 排放过程。在 4 月和 10 月出现较高的量值, 这可能与 4 月土壤季节冻土发生融化过程时, 土壤水分上下迁移, 以及在 10 月虽然天气已转冷, 但土壤表层开始冻结但较深层仍保持较高的温度, 也可使土壤水分随土壤温度梯度过程发生迁移, 水分的迁移对 CO₂ 通量产生较大的影响有关。2002 年全年固定 CO₂ 量高达 397 g/m², 明显高于其它地区草地类型^[11-14], 当然这是目前初步计算的结果, 有待进一步研究证实(图 3)。

3 讨论与结语

3.1 草毡表层区是多年生、旱中生短根茎密丛性嵩草属建群, 植物种类丰富, 低矮而稠密, 根系发达, 故土壤有机物的补给主要依赖于根系。具有寒冻温湿度特征, 加之过渡放牧, 其土壤动物和植物地上部分对土壤有机物补给源的实际意义并不大。草毡寒冻锥形土分布区根量比地上生物量高 5~8 倍。年净初级生产量 935.0 g/m², 其中地上 348.4 g/m², 地下 586.6 g/m², 地下净生产量的周转率为 0.2817。表明受嵩草生物学特性的制约, 净光合产量的 63% 左右分配于地下。

图 3 矮高草甸 CO₂ 通量年际动态Fig. 3 Annual variation of CO₂ flux of alpine *Kobresia humilis* meadow

3.2 草毡寒冻锥形土区的冬半年漫长而寒冷, 致使根系在冻结期不易矿化, 即使在夏半年, 也因地温不高和过分潮湿而分解较弱。根系外形清晰, 垂直分布厚度很少超过 10 cm, 其上无其它完整的覆盖层。层次中草毡状有机土壤物质的数量和体积随着发育年龄的增长而增加, 矿物质比例则相应减少, 但矿物成分及质地受土层的制约而变化较小。导致有机残体大量留存于近地表层, 有机质含量很高, 在 5-10 月, 0~40 cm 整层平均为 6.731%。同时表明, 在高海拔的高寒草甸地区植物非生长季土壤呼吸微弱甚至没有, 当该类地区温度略有提高时, 土壤有机质将加速分解。

3.3 草毡寒冻锥形土植被与大气 CO₂ 通量观测表明, 高寒草甸生态系统 CO₂ 通量呈现明显的日变化和季节变化规律。暖季 CO₂ 通量远高于冷季, 暖季每日 CO₂ 通量峰值出现在 11:00 h 左右, 而冷季则出现在 14:00~15:00。

3.4 5 月中旬到 9 月主要为 CO₂ 的吸收, 其中 7 月是最高月, 而 1-5 月初以及 10-12 月为 CO₂ 排放。在不放牧状态下 2002 年全年固定 CO₂ 量高达 397 g/m², 明显高于其他地区草地类型, 也表明高寒草甸区仍表现出碳处在沉积状态, 为一个较大的碳汇区域。

3.5 近年来对该生态系统碳通量进行系统、连续的观测, 无疑对青藏高原草地生态系统碳的源汇效应、碳循环的季节动态的了解至关重要。但由于高寒草甸是人为经营的生态系统, 放牧活动对该生态系统的物质循环过程起着举足轻重的作用, 因此, 高寒草甸生态系统碳循环过程中牲畜库的研究, 将是正确估计青藏高原高寒草甸生态系统碳收支状况的重要方面。

3.6 有些研究证实, 近几十年来地面气候逐渐变暖, 其暖化强度随着海拔的上升而增大, 一种可能的机制是全球变暖过程中高原冰雪等陆面变化的反馈起到加强作用外, 与土壤呼吸强度明显加大, 在气候变暖的过程中释放大量的 CO₂、CH₄ 等痕量气体等原因有关。陆地植被是大气 CO₂ 重要的汇和源, 土壤和植被状况的任何变化, 都明显改变它们对大气 CO₂ 的吸收和排

放, 虽然在气候变化过程中, 植物对痕量气体的吸收和释放相应发生变化, 但气候暖化一般较早于植被和土壤的演替变化, 土壤和植被类型在气候变化进程中, 要有一定时间的适应过程, 方可达到其顶极植物群落和土壤类型, 表现出土壤和植被在气候暖化过程中, 本身的演替是缓慢和平稳的。因而可认为, 在全球变化过程中, 草毡寒冻锥形土土壤微生物活动加快, CO₂、CH₄ 等痕量气体的排放明显加大, 有可能使草毡寒冻锥形土分布地区由碳汇区转变成为土壤-植被 CO₂、CH₄ 等痕量气体的释放源地, 对大气温室效应的影响有着不可忽视的推动作用, 应给予加强研究。

参考文献

- [1] 李家澡, 朱桂如, 杨涛, 等. 海北高寒草甸生态系统定位站纤维素分解和土壤 CO₂ 释放的研究[A]. 见: 高寒草甸生态系统(1)[C]. 兰州: 甘肃人民出版社, 1982: 162-173
- [2] 李家澡, 朱桂如, 杨涛, 等. 高寒草甸植物的纤维素、根和枯枝落叶分解作用的研究[A]. 见: 高原生物学集刊(2)[C]. 北京: 科学出版社, 1984: 107-114
- [3] 王在模, 乐炎舟, 张金霞. 高山土壤呼吸强度之初步研究[A]. 见: 高寒草甸生态系统(1)[C]. 兰州: 甘肃人民出版社, 1982: 174-183
- [4] 张金霞, 曹广民, 周党卫, 等. 草毡寒冻锥形土土壤 CO₂ 释放特征[J]. 土壤学报, 2001, 39(2): 261-267
- [5] 李英年, 赵新全, 曹广民, 等. 海北高寒草甸生态系统定位站气候、植被生产力背景的分析[J]. 高原气象, 2004, 23(4): 558-567
- [6] 周华坤, 周立, 赵新全, 等. 矮高草甸植物种群物候学定量研究[J]. 草地学报, 2002, 10(4): 279-286
- [7] 李英年. 祁连山海北寒冻锥形土不同地形部位的地温状况及诊断特性[J]. 山地学报, 2001, 19(5): 408-412
- [8] 李英年. 高寒草甸分布区土壤水分动态的模拟研究[J]. 草地学报, 1998, 6(2): 77-83
- [9] 鲍新奎, 曹广民, 高以信. 草毡表层的形成环境和发展机理[J]. 土壤学报, 1995, 32(增刊): 45-52
- [10] Michaelson G J, Ping C L. Carbon storage and distribution in tundra soil of Arctic Alaska, U. S. A [J]. Arctic and Alpine Research, 1996, 28(4): 414-424
- [11] Hum J M, Knapp A K. Fluxes of CO₂, water vapor, and energy from a prairie ecosystem during the seasonal transition from carbon sink to carbon source[J]. Agric For Meteorol, 1998, 89, 1-14
- [12] Frank A B, Dugas W A. Carbon dioxide fluxes over a non-temperate, semi-arid, mixed-grass prairie, Agric[J]. For Meteorol, 2001, 108: 317-326
- [13] Hunt J E, Kelliher F M, McSeveny T M, et al. Evaporation and carbon dioxide exchange between the atmosphere and a tussock grassland during a summer drought[J]. Agric For Meteorol, 2002, 111: 65-82
- [14] Webb E K, Peaman G I, Leuning R. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapor transfer [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1980, 106, 85-1000

(责任编辑 孟昭仪)