

文章编号: 1000-0240(2007)06-0940-07

高寒湿地生态系统土壤有机物质补给及地-气 CO₂ 交换特征

李英年¹, 赵亮¹, 赵新全¹, 王勤学², 张发伟^{1,3}

(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, 筑波 3050053, 日本;
3. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 海北高寒湿地植物地上、地下生物现存量较高, 2004 年海北高寒湿地植物净初级生产力为 $1\ 799.7\ \text{gC} \cdot \text{m}^{-2}$ 。由于家畜对湿地植物采食量低, 每年将有大量的枯黄植物残留于地表, 表现出地上、地下生物量以及苔鲜均成为土壤有机物质的补给源。由于区域温度低, 积水严重, 对植物残体分解缓慢, 导致湿地土壤有机质含量很高, 形成了厚达 2 m 左右的泥炭层。观测结果表明, 海北高寒湿地净生态系统 CO₂ 交换量具有明显的季节变化, 年内 4 月和 10 月存在两个 CO₂ 释放高峰期, 夏季的 7 ~ 8 月为一个强吸收期, 全年来看为一个巨大的碳源。2004 年净生态系统年碳交换量为 $76.7\ \text{gC} \cdot \text{m}^{-2}$ 。计算结果表明, 植被的呼吸消耗量每年为 $1\ 199.8\ \text{gC} \cdot \text{m}^{-2}$, 其植物总固碳量为 $2\ 999.5\ \text{gC} \cdot \text{m}^{-2}$, 而土壤呼吸为 $1\ 876.4\ \text{gC} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

关键词: 高寒湿地; 植物生长过程; 净初级生产力; 季节变化; 碳通量

中图分类号: S154.4 **文献标识码:** A

0 引言

温室气体浓度不断增加引发全球变暖, 成为生态、环境等研究领域的重大问题之一, 由此对陆地生态系统碳循环研究引起了高度的重视^[1]。湿地生态系统作为陆地生态系统的重要组成部分, 尽管仅约占地球表面积的 1%, 但其存储着地球陆地碳总量的 15%^[2]。因此, 研究湿地生态系统的碳循环对于深入、细致认识全球碳循环具有重要意义。目前, 关于湿地生态系统碳源/汇的问题还没有有一致性结论, Bridges^[3]认为全球的大部分湿地生态系统是碳汇; Heinsch *et al.*^[4]通过两年的研究发现, 在 Texas 的湿地生态系统是碳源, 而且主要受水分供应的影响; Brix *et al.*^[5]则认为芦苇湿地生态系统为碳汇, 但是由于 CH₄ 温室效应的影响, 改变了其源汇的功能。

青藏高原的高寒湿地是长期适应高寒气候环境

所特有的植被类型, 主要分布在土壤通透性差的河畔、湖滨、盆地以及坡麓潜水溢出和高山冰雪下缘等地带, 也多分布在岛状冻土的边缘^[6-9]。高寒湿地是青藏高原草地畜牧业生产、水土保持以及调节动植物食物链等生态功能的重要环境场所。但湿地因所处的地理环境特殊, 放牧利用率低, 每年有大量的植物以枯枝落叶和腐植根系的形态残留于土壤表面。夏季因温度条件限制, 土壤过湿且嫌气性强, 使残留的有机物体难以分解, 从而导致湿地具有很厚的泥炭层, 这些泥炭层在全球气候的暖干化影响下, 势必将释放大量的痕量气体, 加速温室气体的浓度。然而, 有关高海拔湿地的碳源/汇功能则报道较少。因此, 观测研究高寒湿地植物生产力对土壤有机质的补给以及地-气 CO₂ 净交换, 对进一步研究高寒草甸生态系统的能量流动和物质循环等将提供可靠的科学依据。2003 年开始, 中国科学院海北高寒草甸生态系统定位站(海北站)开展了包

收稿日期: 2007-01-12; 修订日期: 2007-07-29

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"亚太地区环境创新战略计划(APEIS)"资助

作者简介: 李英年(1962—), 男, 青海乐都人, 高级工程师, 1987年毕业于北京气象学院, 主要从事生物气象研究工作。

E-mail: ynli@nwipb.ac.cn

括藏嵩草 (*Kobresia tibetica*) 沼泽化草甸-高寒湿地等 3 种不同植被类型生态系统地-气 CO₂ 和水热通量, 以及常规气象和植物生物量长期定位观测. 本文利用 2004 年生物量及地-气 CO₂ 通量资料, 讨论了海北高寒湿地土壤碳素的输入状况以及地-气 CO₂ 交换量变化特征, 揭示高寒湿地 CO₂ 交换过程以及源/汇功能.

1 研究区概括及研究方法

1.1 研究区概况

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谷(37°37' N, 101°19' E), 海拔 3 220 m, 具有明显的高原大陆性气候. 年均气温 - 1.7 °C, 降水量约为 580 mm. 夏季温暖多雨, 集中了全年降雨的 80%, 最暖的 7 月平均气温 9.8 °C. 冬季寒冷干燥, 最冷的 1 月平均气温 - 14.8 °C.^[9] 涡度相关法观测塔设在海北站东南 1.5 km 处的高寒湿地, 实验样地地势平坦开阔. 9 月初调查湿地植物群落结构发现, 中央地带植物种类组成少、结构简单, 植株较高, 以帕米尔苔草 (*Carex pamirensis* Marsh) 为主要植物建群种; 边缘区植物种类增加, 植株高度下降, 以藏嵩草为主. 群落由 25 种植物组成, 隶属 10 科 20 属, 植株高在 10 ~ 35 cm 之间.

海北高寒湿地外表景观不同季节截然不同. 春季(4 ~ 5 月)冰雪融化后, 消融水及时流走, 上游水因海拔高土壤仍处冻结状态不能及时补给, 湿地处于年内最为干燥时期, 上年度残留的枯黄植被较多. 日均气温 0 °C 时, 枯黄植被下面有萌动发芽的绿色植物, 牲畜涉入后觅食鲜嫩的植物幼苗, 而残留枯草因封冻水污染, 不被采食仍残留地表. 夏秋季上游水补给充分, 积水深厚, 植物生长繁茂, 牲畜难以涉入, 湿地基本处于不放牧时期, 残留的枯黄植物受适宜环境条件影响而分解, 但仍有大量枯黄植物经水浸泡倒伏残留在积水深处的土壤表面. 秋季后期到冬季阶段, 湿地地表水结冰, 并随时间的推移而加厚, 大量的植物被封冻而留存到次年.

1.2 研究资料及观测原理

1.2.1 气象要素及近地大气 CO₂ 通量观测与原理
数据观测来自涡度相关法观测系统和常规气象观测系统. 安装在 2.5 m 高度处的三维超声风速温度仪(CSA T3, Campbell Scientific Ltd, USA)和快速响应红外 CO₂/H₂O 分析仪(IRGA, LF7500,

LF3100A, Lincoln, Nebraska, USA), 可直接由测定的三维风速、CO₂ 浓度瞬时脉动值, 通过观测测量的协方差及订正得到 CO₂ 通量:

$$F_c = - \overline{w s} \quad (1)$$

式中: w 为垂直风速; ρ 为空气密度; s 为物质属性, 这里指 CO₂ 浓度; “ $\overline{\quad}$ ”表示物理量的瞬时脉动量; “ $\overline{\quad}$ ”表示一定时间段内的平均. 受停电等原因影响, 造成部分数据缺失, 采用线性内插方法查补订正. 另外, 有降水或有露水产生时, CO₂/H₂O 分析仪采集探头易形成水珠, 对通量观测产生一定影响, 导致数据出现较大的“野点”, 故在统计时剔除了该类数据, 并用 WPL 法^[10]对通量值进行修正.

1.2.2 植物生长过程有关数据观测

植物生物量和枯枝落叶测定: 在植物生长期每月 15 日和月末最后一日随机选择 6 个 50 cm × 50 cm 的样方, 用收割法测定地上生物量; 地下生物量在经取过地上生物量的样方内再随机选择 25 cm × 25 cm 的二级样方 3 个, 垂直用铁铲和切刀分层取出 0 ~ 10 cm、10 ~ 20 cm 和 20 ~ 40 cm 土墩, 然后凉干, 再细心松散土壤, 用筛子筛选挑选出草根装入布袋, 分样冲洗干净. 所有样品置恒温控制在 65 °C 的烘箱, 烘干至恒重后称重, 单位取 g · m⁻². 因湿地积水多, 条件限制更深层次的地下生物量取样困难, 仅在 7 月中旬测定了 1 次. 文中植物净初级生产力分地上、地下两部分, 其中, 植被地上年年净初级生产力系 8 月到 9 月测定的地上最高生物量, 而地下年净初级生产力采用年内植物地下生物量测定的基础上, 利用周转量(地下最高值和最低值之差)法计算得出. 另外, 在植物生长期每周利用 LF3100A(LFCor, USA)测定 25 cm × 25 cm 样方的叶面积指数.

2 结果分析

2.1 高寒湿地植物净初级生产力及对土壤有机物质的补给

海北高寒湿地植物生长物候期发生时间段基本与矮蒿草草甸和金露梅灌丛草甸区基本相一致. 图 1 为海北高寒湿地植物地上生物量的季节变化动态, 表明在 5 月中旬已有少量的植物地上生物量积累, 6 月中到 7 月底生物量积累最快, 8 月到 9 月中旬生物量增长减缓并保持相对稳定, 9 月末达最高. 2004 年观测表明, 地上年净初级生产力 260.7

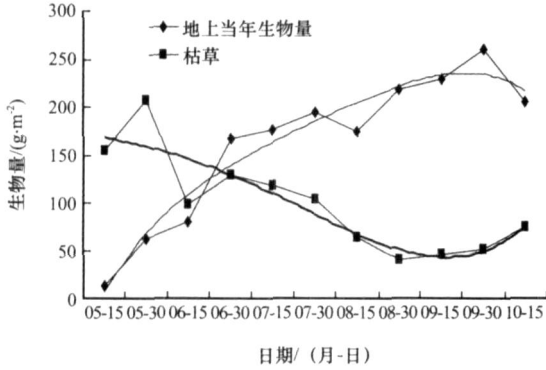


图 1 海北高寒湿地植物地上和枯草生物量变化 (光滑实线为 4 次项模拟效果)

Fig. 1 The variations of aboveground biomass and withered biomass in Haibei alpine wetland (the slick solid line is of the 4th fitted equation)

$g \cdot m^{-2}$, 比距离相近的矮嵩草草甸略低, 但比金露梅灌丛草甸地上生物量稍高。

由图 1 可以看出, 海北高寒湿地植物枯草的季节变化在植物生长的前后期高, 植物旺盛生长的 8 月末最低。这是因为冬季湿地结冰的同时也将上年度极大部分枯黄植物留存在地表, 春季解冻后, 牲畜采食因受到污染等影响, 大部分残留于地表, 导致春季出现很高的枯草量, 如 2003 年 5 月 30 日测定达近 $210 g \cdot m^{-2}$ 。春季后这些枯草随温度升高, 发生分解, 但很大部分在温度升高的同时, 水体浸泡后倒伏留存在湿地土壤表面中, 致使枯草逐渐降低。9 月以后受低温影响霜冻明显, 枯黄植物又逐渐增多。

由于湿地积水层厚, 侧渗明显, 地下生物量测定困难。限于条件我们在大多数时间采用挖掘法对湿地植物群落地下 0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm 分 3 层次的生物量进行测定, 仅在 2003 年 7 月 15 日测定了更深层次的生物量。从 2004 年测定的季节变化过程来看 (图 2), 高寒湿地地下生物量从 5 月开始逐渐升高, 6~7 月最高, 以后下降, 于 10 月达最低, 基本呈现一倒“U”型分布特征。因冬季湿地约在 50 cm 以下地温高于 $0^{\circ}C$, 致使植物根茎不被冻结而仍处于活的状态, 并在深层仍发生物质及能量的流动。另外, 从目前观测到 0~40 cm 湿地地下生物量看到 (图 2), 高寒湿地 0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm 层次地下生物量分别占 0~40 cm 整层的 43%、31% 和 26%, 这个比例明显不同于距离相近的高寒矮嵩草草甸地区。在矮嵩草草甸地区, 0~20 cm 层次地下生物量要占 0~40 cm

的 90% 以上^[11], 从而可证实, 高寒湿地植物地下根系生长延伸深厚。测定表明, 在 6 月 15 日仅 0~40 cm 土层达 $10769.3 g \cdot m^{-2}$, 9 月 15 日最低为 $6563.4 g \cdot m^{-2}$, 即地下年周转量 (年净初级生产力) 为 $4205.9 g \cdot m^{-2}$, 明显高于距离相近的高寒矮嵩草草甸地区^[12]。

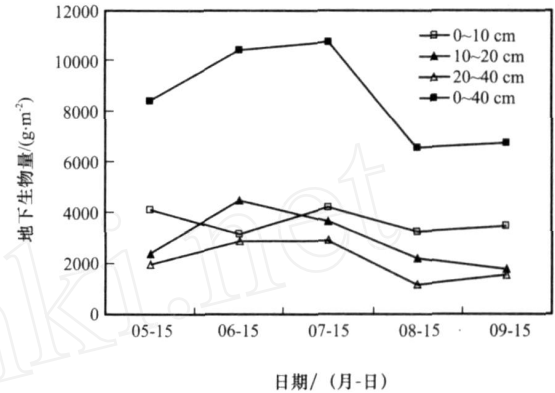


图 2 海北高寒湿地植物 0~40 cm 地下生物量变化
Fig. 2 The variations of 0~40 cm belowground biomass in Haibei alpine wetland

高寒湿地土壤发生过程中, 近地表层形成了由活根、死根以及植物残体遗留的特殊层, 是土壤剖面构成的基本层次, 也是植物残体在成土过程中逐渐形成的产物。高寒湿地具有寒冻温湿度特征^[13], 土壤动物少, 密度低, 作为有机物的补给源实际意义不大。区域植被因放牧利用率低, 极大多植物地上部生物量将留存于地表。植被又是多年中生、湿生的长根茎密丛性植物, 虽然植物种类组成简单, 但植株生长稠密、生草过程强烈, 根系发达, 又由于湿地土壤水分长期处于饱和或过饱和状态, 对苔鲜生长有利。为此认为, 在高寒湿地, 植物地上、地下生物量, 以及苔鲜均成为土壤有机物的主要补给源。同时, 高寒湿地因受高海拔条件制约, 冬半年漫长寒冷, 加之湿地土壤过湿, 嫌气性强, 致使植物残留物不易矿化。即使在夏半年, 也因地温不高和过分潮湿而分解较弱, 大部分死根保持原有外形与韧性长期贮留在近地表层。随每年植物倒伏地表累积, 以及根茎生长和伸展, 活根、死根和残留物相互交织, 覆盖于地表, 结果使各种不同年龄的活根、保持以及倒伏物交织磐结、有机物质大量积存。导致有很高的土壤有机质, 同时随着时间的推移, 形成了厚达 2m 左右的泥炭层。

2.2 高寒湿地近地层大气 CO₂ 交换特征

海北高寒湿地地-气 CO₂ 日交换量具有明显的

季节变化(图 3)，随时间变化在年内的 4 和 10 月分别存在两个 CO₂ 释放高峰期，夏季的 7~8 月则为一个强吸收期。年内基本表现出 1 月到 4 月日交换释放量逐渐加大，4 月形成年内的第 1 个高释放期，5 月释放量降低，6 月下旬开始转为吸收，7~8 月其吸收量达最大后逐渐降低；9 月中旬出现由吸收转为释放，且释放速率明显加大，10 月进入年内第 2 个较强的 CO₂ 释放期，11 月以后 CO₂ 释放量又降低，且平稳变化至翌年 3 月。

物理过程或苔鲜作用有时产生微弱的 CO₂ 吸收，但被较强的 CO₂ 释放过程所掩盖；4 月天气转暖，日均气温上升，土壤呼吸加快，CO₂ 释放明显，导致在 4 月出现高的释放过程。以后随温度升高到 5 以上，植物生长加快，CO₂ 则逐渐从释放转为吸收，在植物生长旺盛期的 7~8 月吸收量远远大于土壤释放而达最大。进入 9 月末，植物生长逐渐停止，土壤呼吸释放量明显大于吸收，从而导致年内的第 2 个高释放时期。以后随土壤冻结及湿地表面结冰加厚，释放量略有下降。

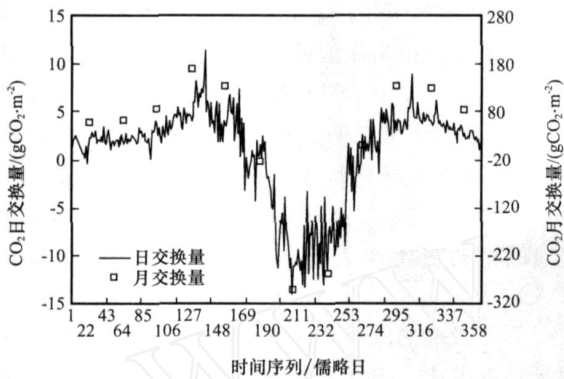


图 3 海北高寒湿地近地层大气 CO₂ 日(月) 交换量年变化动态

Fig. 3 The diurnal and month dynamics of the CO₂ exchange between the ecosystem and atmosphere in Haibei alpine wetland

由图 3 还可看到，6 月 22 日 CO₂ 日交换量从正的释放转为负的吸收，9 月 14 日 CO₂ 日交换量从负的吸收转为正的释放期，这个时间基本与地区日均稳定气温 5 的出现与结束时间基本一致。表明在高寒湿地植物只有进入强度生长期间，才有植物的吸收固碳能力大于土壤呼吸的释放能力而出现 CO₂ 的吸收过程。温度在 0~5 之间虽然有植物生长，但该期为植物营养生长阶段，土壤释放 CO₂ 大于植物吸收作用。

严寒的 11 月至翌年 3 月，日平均气温(-5)，湿地表面被冰层所覆盖，土层冻结在 50 cm 范围。低温和冻土抑制了植物根系和土壤微生物的代谢活动，土壤有机质分解缓慢，植物根系呼吸微弱，故为 CO₂ 弱的释放时期。但由于湿地土壤约在 50 cm 以下的一定层次内，处于非冻结状态，深层植物根系处在活的状态，且根系深达 100 cm 左右，非冻结层范围的植物根系仍可得到能量迁移和流动，因而，11 月至翌年 3 月湿地的 CO₂ 释放量比同期其他植被类型区还要大^[14-15]。在冷季虽然气候严寒，但湿地岛状草丘上出现大量的苔鲜仍处绿色，说明仍有生长且发生光合现象的可能。另外湿地区域下垫面潮湿，日间和夜间水汽运动明显，水分变化的

高寒湿地年内 CO₂ 释放时间明显多于吸收时间(表 1)，2004 年 1 月 1 日到 6 月 21 日和 9 月 15 日到 12 月 31 日期间，其释放日长达 281 d，日均释放速率小于夏季的吸收速率(图 4)，但释放量(880.0 gCO₂·m⁻²)大于 6 月 22 日到 9 月 14 日的吸收量。其中 1 月 1 日到 6 月 21 日的净释放量为 510.1 gCO₂·m⁻²，9 月 12 日到 12 月 31 日的释放量为 369.9 gCO₂·m⁻²。6 月 22 日到 9 月 14 日短短的 82d 时间的为 -598.6gCO₂·m⁻²(吸收量)，其月平均日吸收速率在 7 月高达 9.4 gCO₂·m⁻²·d⁻¹(图 4)，最低的 6 月为 0.9 gCO₂·m⁻²·d⁻¹。月平均日释放速率在 4 月最高，为 5.6gCO₂·m⁻²·d⁻¹，1 月最低，为 1.8 gCO₂·m⁻²·d⁻¹。

由于高寒湿地泥炭层深厚，这不仅在植物生长过程前期和后期，因地温高土壤释放 CO₂ 高于植物吸收。就是在寒冷的冬季，因土壤冻结浅薄，加之湿地冻结层土壤水含量高，冻结层内的冰晶状将产生较多的孔隙，有利于土壤呼吸释放的 CO₂ 将通过

表 1 2004 年 CO₂ 日交换量转化过程统计

Table 1 The daily CO₂ exchange in 2004

释放时间 /(月-日)	维持时间 /d	释放量 /(gCO ₂ ·m ⁻²)	释放率 /(gCO ₂ ·m ⁻² ·d ⁻¹)	吸收时间 /(月-日)	维持时间 /d	吸收量 /(gCO ₂ ·m ⁻²)	吸收率 /(gCO ₂ ·m ⁻² ·d ⁻¹)
01-01~06-21	173	510.1	2.9	06-22~09-14	85	598.6	7.0
09-15~12-31	108	369.9	3.4				

这些孔隙释放到大气. 因此在年内 CO_2 的年净释放量明显高于附近地区的其他植被类型. 如 2003 年矮嵩草草甸、金露梅灌丛草甸 CO_2 年净交换分别为 $-269.2 \text{ gCO}_2 \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $-229.3 \text{ gCO}_2 \cdot \text{m}^{-2}$ ^[14-15], 属明显的碳汇过程, 而高寒湿地年净交换量与之相反, 为明显的释放过程, 年净交换量为 $281.3 \text{ gCO}_2 \cdot \text{m}^{-2}$, 转换成碳量为 $76.7 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$.

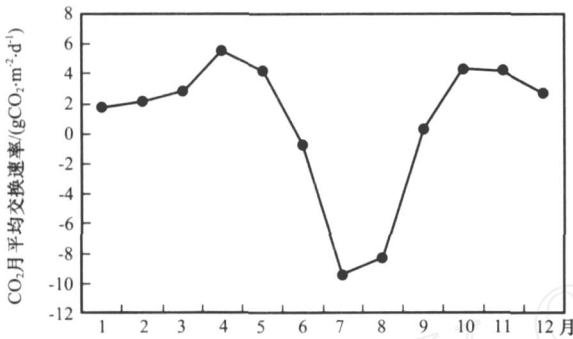


图 4 海北高寒湿地地-气 CO_2 各月日平均交换速率的季节变化

Fig. 4 The monthly rate of CO_2 exchange between soil and atmosphere in Haibei alpine wetland

2.3 高寒湿地生态系统碳平衡

植物通过光合作用, 将大气的 CO_2 固定成有机化合物, 其中一部分有机物通过植物自身的呼吸作用, 以 CO_2 的形式再释放到大气, 另一部分则以凋落物的形式进入地表, 经微生物作用再又以 CO_2 的形式释放到大气中, 这就形成了大气-植物-土壤-大气之间生态系统的碳循环. 从前面讨论高寒湿地植物生物量看到, 2004 年湿地地上年净初级生产力为 $260.7 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 地下生物量 0~40 cm 周转量(地下净初级生产力) $4205.9 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 这里仅计算了 0~40 cm 层次. 因条件限制对 40 cm 以下的生物量虽然未进行测定, 但对 40 cm 以下生物量可以理解为, 因深度较深其量值并不是太高. 以 2003 年 7 月 15 日加强观测表明, 0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm、30~40 cm、40~50 cm 的观测结果表明, 这些层次的地下生物量分别约占 0~50 cm 整层地下总生物量的 41%、29%、18%、9%、3%, 即在 40 cm 以下虽有植物根系生长, 但生物量不是太高. 同时 40 cm 以下的生物量季节变化较为平稳, 其年间振幅不是很高, 即年周转量较低. 这也可从图 2 湿地植物生长期(5~9 月)0~40 cm 地下生物量变化也可得到证实. 也就是说, 在 40 cm 以下土壤中植物根系生物量年内固碳能力相对较低.

净生态系统生产力是表示生态系统碳平衡的指标, 是生态系统净初级生产力与土壤异养呼吸的差值, 净生态系统生产力为负值表示生态系统为碳源, 若为正值, 则表明生态系统是碳汇. 高寒湿地与草原生态系统的净初级生态系统生产力一样, 由一年中生长季最大生物量与非生长季最小生物量的差值来确定. 正如同前所述, 高寒湿放牧利用率低, 每年的植被生长量除自然分解外, 极大部分基本以倒伏的形态留存在地表, 如果不考虑土壤 40 cm 以下的净初级生产量, 仅考虑 0~40 cm 整层情况. 依植物转换为碳素能力按地上为 45%, 地下为 40% 来估算^[16], 2004 年海北高寒湿地植物地上年净初级生产力($260.7 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$)转换成碳量 $117.3 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$, 地下年净初级生产力($1790.4 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$)转换成碳量为 $1682.4 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$, 则 2004 年海北高寒湿地的净初级生产力为 $117.3 + 1682.4 = 1799.7 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$.

一般群落的碳固定量由群落呼吸量、净增量和凋落物量组成. 但在高寒湿地每年的净增量与净初级生产力相当. 若以净初级生产力与总初级生产力的比值为 0.6^[17-18] 计. 那么植被的呼吸(自养呼吸)消耗量为 $0.4/0.6 (1799.7 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} = 1199.8 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$. 即 2004 年高寒湿地植物的总固碳量为 $1799.7 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} + 1199.8 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} = 2999.5 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$, 这个值比方精云等^[18] 计算我国陆地草本植被固碳量略高, 其原因在于方精云等计算的是全国陆地系统, 而作者仅为高寒湿地, 加上湿地其本身具有的独特性, 故其呼吸量和固碳量可能均较高, 但可以认为是合理的.

上述分析知道, 在海北高寒湿地 2004 年地-气界面碳净释放量为 $76.7 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$, 这就意味着高寒湿地每年因土壤呼吸向大气释放 CO_2 量(界面净释放量与植被净生产力的碳素量的和)为 $1799.7 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} + 76.7 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} = 1876.4 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$. 表明在目前的情景下, 高寒湿地处于明显的碳释放过程. 当然, 这里仅仅是粗算, 未包括地上生物量被牲畜所采食和湿地积水带走流失的. 但不论怎样, 如果说高寒草甸植被区的高寒矮嵩草草甸、金露梅灌丛草甸是碳循环的汇的功能的话, 那么在藏嵩草沼泽化草甸的高寒湿地则为一个巨大的碳源.

3 结语

海北高寒湿地地处寒冷的气候条件, 每年植物层的凋落物的分解速率很低, 加之湿地夏季积水深

厚, 植物粗纤维高, 放牧强度低, 家畜采食受到限制。冬季和春季前期又被结冰和积雪所覆盖, 春季后冰雪融化后, 虽然湿地处于最为干燥时期, 但枯黄植被受封冻水的污染, 牲畜更难采食而可残留, 至次年春季后, 残留的枯黄植物受适宜的温度条件逐渐分解, 并有大部分植物经水浸泡倒伏残留在积水深处的土壤表面。表现出地上、地下生物量以及苔鲜均成为土壤有机物质的补给源, 但因分解缓慢, 矿化率低使湿地有很高的土壤有机质, 同时随时间的推移, 泥炭层深厚。

海北高寒湿地在 5 月中旬已有少量的植物地上生物量积累, 6 月中旬到 7 月中旬左右生物量为积累最快时期, 9 月末达最高。湿地植物枯草的季节变化自植物萌动发芽开始逐渐减少, 在植物旺盛生长的 8 月末最低。地下生物量从 5 月开始, 逐渐升高, 在 6~7 月最高, 以后下降, 于 10 月达最低。

对于大气 CO₂ 吸收来讲, 在高寒湿地当日均气温 0 开始时, 植物进入萌动发芽开始, 此时植物就可发生光合作用而有固碳能力, 但在日均气温达到 5 期间, 地气界面日 CO₂ 交换量才为负值(吸收), 在日均气温 < 5 期间日交换量为正值, 表明在 < 5 期间高寒湿地土壤 CO₂ 的释放量大于植物的吸收量, 只有在日均气温 < 5 期间, 植物固碳吸收 CO₂ 能力大于土壤释放量。

依植物转换为碳素能力按地上为 45%, 地下为 40% 来估算, 2004 年海北高寒湿地植物净初级生产力为 1 799.7 gC · m⁻²。联系按有关生物生产力计算处理可知, 植被的呼吸消耗量每年为 1 199.8 gC · m⁻², 其植物总固碳量为 2 999.5 gC · m⁻², 而土壤呼吸为 1 876.4 gC · m⁻²。

海北高寒湿地地-气间 CO₂ 日交换量具有明显的季节变化, 随时间变化在年内的 4 和 10 月分别存在两个 CO₂ 释放高峰期, 夏季的 7~8 月则为一个强吸收期。年内基本表现出 1 月到 4 月日交换释放量逐渐加大, 4 月形成年内的第 1 个高释放期, 5 月释放量降低, 6 月上旬开始转为吸收, 7、8 月其吸收量达最大后逐渐降低, 9 月末出现由吸收转为释放, 且释放速率明显加大, 10 月进入年内第 2 个较强的 CO₂ 释放期, 11 月以后 CO₂ 释放量又降低, 且平稳变化至次年 3 月。全年来看, 高寒湿地每年因土壤呼吸向大气释放 CO₂ 高达 1876.4 gC · m⁻², 净生态系统年交换量 76.7 gC · m⁻², 高寒湿地表现为一个巨大的碳源。

参考文献(References):

- [1] Tans P P, Fung I Y, Takahashi T. Observational constraints on the global atmospheric budget [J]. *Science*, 1990, **247**: 1413 - 1438
- [2] Zhang Y, Li C, Trettin C C, *et al.* Modelling soil carbon dynamics of forested wetlands[C]// Symposium 43, Carbon Balance of Peatlands Sponsor, International Peat Society, 1999.
- [3] Bridges E M. *World Soils*[M]. Cambridge, New York, Melbourne: Cambridge University Press, 1978.
- [4] Heinsch F A, Heilman J L, McInnes K J, *et al.* Carbon dioxide exchange in a high marsh on the Texas Gulf Coast: effects of fresh water availability[J]. *Agric For Meteorol*, 2004, **125**: 159—172.
- [5] Brix H, Sorrel B K, Lorenzen B. Are Phragmites - dominated wetlands a net source or net sink of green gases[J]. *Aq Bot*, 2001, **69**: 313 - 324.
- [6] Wang Qiji, Zhou Xingmin, Shen Zhenxi, *et al.* The structure of plant community and utilization in alpine Kobresia tibetica swamp meadow [C]// *Alpine Meadow Ecosystem*, Vol. 4. Beijing: Science Press, 1995: 91 - 100. [王启基, 周兴民, 沈振西, 等. 1995. 高寒藏蒿草沼泽化草甸植物群落结构及其利用(C//高寒草甸生态系统(4)). 北京: 科学出版社, 1995: 91—100.]
- [7] Li Yingnian, Zhao Liang, Xu Shixiao, *et al.* Plant community structure and ecological characteristics of alpine wetland at north area of Qinghai among Qilian Mountain[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2006, **28**(1): 76—84. [李英年, 赵亮, 徐世晓, 等. 祁连山海北高寒湿地植物群落结构及生态特征. 冰川冻土[J], 2006, **28**(1): 76—84.]
- [8] Chen Guichen, Huang Zhiwei, Lu Xuefeng, *et al.* Characteristics of wetland and its conservation in the Qinghai Plateau [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2002, **24**(3): 254—259. [陈桂琛, 黄志伟, 卢学峰, 等. 青海高原湿地特征及其保护[J]. 冰川冻土, 2002, **24**(3): 254—259.]
- [9] Li Yingnian, Zhao Xinquan, Cao Guangmin, *et al.* Analysis of climate, vegetational productivity background and their correlation of Haibei alpine Meadow ecosystem research station[J]. *Plateau Meteorology*, 2004, **23**(4): 558—567. [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.]
- [10] Webb E K, Pearman 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 - 100.
- [11] Zhou Huakun, Zhao Xinquan, Zhou Li, *et al.* A study on correlations between vegetation degradation and soil degradation in the alpine meadow of the Qinghai - Tibetan Plateau[J]. *Acta Pratacul Turae Sinica*, 2005, **14**(3): 31 - 40. [周华坤, 赵新全, 周立, 等. 青藏高原高寒草甸的植被退化与土壤退化特征研究[J]. 草业学报, 2005, **14**(3): 31—40.]
- [12] Li Yingnian, Wang Qinxue, Fu Yuling, *et al.* Integrated monitoring of alpine vegetation types and its primary production [J]. *Acta Geographica sinica*, 2004, **59**(1): 40—48. [李英年, 王勤学, 伏玉玲, 等. 高寒植被类型及其植物生产力的监测[J]. 地理学报, 2004, **59**(1): 40—48.]
- [13] Li Yingnian, Baoxinhui, Cao Guangmin. Comparison of the

- earth temperature between fiborthic histosols and Mat - Cryic cambisols in Tibet plateau[J]. *Acta Pedologica sinica*, 2001, 38(2): 145—152. [李英年, 鲍新奎, 曹广民. 青藏高原正常有机土与草毡寒冻雏形土地温观测的比较分析[J]. *土壤学报*, 2001, 38(2): 145—152.]
- [14] Zhao Liang, LI Yingnian, Zhao Xinquan, *et al.* Comparative study of the net exchange of CO₂ in types of vegetation ecosystems on the Qinghai - Tibetan Plateau[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(16): 1767 - 177.
- [15] Xu Shixiao, Zhao Xinquan, Fu Yuling, *et al.* Characterizing CO₂ fluxes for grpwng and and non - growing season in a shrub ecosystem on the Qinghai - Tibet Plateau[J]. *Science in China (Series D, Earth Sciences)*, 2005, 48(Supp. 1): 133 - 140.
- [16] Li Jiacao, Zhu Guiru, Yang Tao, *et al.* Studies on decomposition of plants of cellulose root and litter of the alpine meadow [C]// *Acta Biologica Plateau Sinica*, Vol. 2. Beijing: Science Press, 1984: 107 - 114. [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[C]// *高原生物学集刊*(2). 北京: 科学出版社, 1984: 107 - 114.
- [17] Gollidy F.B. Energy flux in ecosystems[M]// Wiens J.A. *Ecosystem Structure and Function*. Corvallis: Oregon State Univ. Ann Biol Colloq, 1972: 31: 69 - 90.
- [18] Fang Jingyun. *Global Ecology, Climate Change and Ecological Responses* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000: 104—157. [方精云. *全球变化生态学—气候变化与生态响应* [M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 104—157.]

The Features of Soil Organic Matters Supplement and CO₂ Exchange between Ground and Atmosphere in Alpine Wetland Ecosystem

LI Yin-nian¹, ZHAO Liang¹, ZHAO Xin-quan¹,
WANG Qin-xue², ZHANG Fa-wei^{1,3}

(1. *Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining Qinghai 810001, China;*

2. *Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

Abstract: The aboveground and belowground biomass is quite large and the net primary productivity is 1799.7 gC · m⁻² in Haibei alpine wetland ecosystem. Because less of the biomass is eaten by livestock, there are a lot of dead plants remained in the surface every year, which shows that the aboveground and belowground biomass and mosses are the supplement of soil organic matters. Meanwhile, the soil organic matter is rich and the turf layer is thick, because of lower temperature, more seep and less decomposition of the plant leaves.

Key words: alpine wetland; plant growth process; net primary productivity; seasonal variation; carbon flux.

It is found that the net CO₂ exchange in alpine wetland ecosystem has an obvious seasonal change and is a great carbon source, with two release maxima in April and October, and a strong absorption in July ~ August. The net ecosystem CO₂ exchange was 76.7 gC · m⁻² in 2004. The plant respiration quantity, ecosystem carbon fixation and soil respiration are 1199.8, 2999.5 and 1867.4 gC · m⁻², respectively.