

# 青藏高原高寒灌丛 CO<sub>2</sub> 通量日和月变化特征

徐世晓 赵新全\* 李英年 赵亮 于贵瑞 孙晓敏 曹广民

(中国科学院西北高原生物研究所, 西宁 810001; 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 中国科学院研究生院, 北京 100049. \* 联系人, E-mail: xqzhao@public.xn.qh.cn)

**摘要** 采用涡度相关法对青藏高原高寒灌丛 CO<sub>2</sub> 通量进行连续观测的结果表明, 青藏高原高寒灌丛 CO<sub>2</sub> 通量呈明显的日和月变化特征. 就日变化而言, 暖季(7 月)CO<sub>2</sub> 通量峰值出现在 12:00 左右(-1.19 g CO<sub>2</sub>/(m<sup>2</sup> · h)<sup>-1</sup>), 08:00~19:00 时 CO<sub>2</sub> 净吸收, 而 20:00~07:00 为 CO<sub>2</sub> 净排放; 冷季(1 月)CO<sub>2</sub> 通量变化振幅极小, 除 11:00~17:00 时少量的 CO<sub>2</sub> 净排放以外(0.11 g CO<sub>2</sub>/(m<sup>2</sup> · h)<sup>-1</sup>左右), 其余时段 CO<sub>2</sub> 通量接近于零. 从月变化来看, 6~9 月为 CO<sub>2</sub> 净吸收阶段, 8 月 CO<sub>2</sub> 净吸收最大, 6~9 月 CO<sub>2</sub> 净吸收的总量达 673 g CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>; 1~5 月及 10~12 月为 CO<sub>2</sub> 净排放, 共排放 446 g CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>, 4 月 CO<sub>2</sub> 净排放最大. 全年 CO<sub>2</sub> 通量核算表明, 无放牧条件下青藏高原高寒灌丛是显著的 CO<sub>2</sub> 汇, 全年 CO<sub>2</sub> 净吸收量达 227 g CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>.

**关键词** 高寒灌丛 CO<sub>2</sub> 通量 日变化 月变化

长期通量观测是获取生态系统 CO<sub>2</sub> 排放或吸收数据的有效手段, 为配合 IGBP(International geosphere-biosphere programme, 国际地圈-生物圈计划)、WCRP(World climate research program, 世界气候研究计划)、IHDP(International human dimension of global environment change, 全球环境变化的人类因素计划)、GCTE(global change and terrestrial ecosystem, 全球变化与陆地生态系统)和 LUCC(Land use and land cover change, 土地利用与覆被变化)的一系列国际合作计划, 近年来欧洲、美国、日本等国家率先开展了陆地生态系统 CO<sub>2</sub> 和水、热通量的观测研究. 当前, 全球分属于 EuroFLUX(欧洲通量)、AmeriFLUX(美洲通量)、AsiaFLUX(亚洲通量)、CanadaFLUX(加拿大通量)、OZFLUX(Australia, New Zealand and Vanuatu, 澳大利亚、新西兰和瓦努阿图通量)等观测网络的观测点超过 216 个. 尽管, 草地是全球 4 种主要自然群系中面积最大的一类, 尤其是温带草原生态系统占全球自然植被的 32%<sup>[1~3]</sup>, 同时, 草地也是目前人类活动影响最为严重的区域之一; 但是, 大多数的长期碳通量监测都集中在对各种类型森林生态系统碳收支的研究. 不少学者认为草地是全球陆地生态系统中极其重要的碳汇<sup>[4~7]</sup>; Scurlock 等人<sup>[8]</sup>温带和热带草地每年能够吸收 0.5 Pg 碳, 表明草地生态系统是一个重要的碳汇. 但也有不少研究表明草地生态系统的碳收支核算近乎于平衡<sup>[9~11]</sup>; Kim 等人<sup>[10]</sup>报道以高秆草为优势种的温带草地生态系统(堪萨斯州)在其生长季节期间的碳净固定量是

750 g CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>, 但是在非生长季节该草地生态系统每天的碳净排放量达到 3 g CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>; Dugas 等人<sup>[12]</sup>对德克萨斯州以大须芒草和小须芒草为主要牧草的草原生态系统进行的研究表明, 其年 CO<sub>2</sub> 净吸收为零. 对草地生态系统碳循环主要过程及其影响因素的研究是认识全球碳循环的关键之一<sup>[1,2]</sup>.

青藏高原这一独特的地理单元, 是世界上海拔最高、面积最大、形成最晚的高原, 也是中国天然草地分布面积最大的一个区域. 青藏高原草地生态系统在区域生态系统碳平衡中起着极为重要的作用, 也许对区域甚至全球水平的植被和大气界面间的 CO<sub>2</sub> 交换有显著贡献, 但一直缺乏足够的试验数据来验证<sup>[13]</sup>. 高寒灌丛是由耐寒的中生或旱生灌木为优势种而形成的一类植被, 是青藏高原植被类型的重要组成部分, 也是当地的优势植被之一, 常呈大面积连续分布于高山和高原林线之上向高寒植被的过渡地带. 由于中国青藏高原和其他高大山系的分布, 高寒灌丛的面积约有 116400 km<sup>2</sup>, 居世界之最<sup>[14]</sup>. 对青藏高原高寒草灌丛 CO<sub>2</sub> 通量动态和碳收支状况的长期监测和研究, 将有助于确定青藏高原高寒灌草地生态系统的源汇(Source or Sink)状况, 是中国草地乃至整个陆地生态系统碳收支研究的重要组成部分.

## 1 实验观测

### 1.1 研究区概况

观测样地设在中国科学院海北高寒草甸生态系统定位站(海北站)试验区, 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(37°37'N, 101°19'E), 海拔 3200 m. 气候以东南季风和西伯利亚高压为主, 属于大陆性季风气候, 无明显的四季之分, 冷季寒冷漫长(10~4月), 暖季短暂凉爽(5~9月). 年平均气温-1.7, 极端高温 27.6, 极端低温-37.1; 最暖(7月)和最冷(1月)月平均气温分别为 9.8 和 -14.8. 年均降水量 580 mm, 主要集中于 5~9月, 约占年总降水量的 80%, 10月至翌年 4月仅为年降水量的 20%左右<sup>[15]</sup>.

### 1.2 研究方法

选择广泛分布于青藏高原的高寒灌丛, 于 2002 年 8 月在距离海北站 8 km 的典型高寒灌丛开闢地建成涡度相关观测站. 下垫面为高度 60 cm 左右的典型高寒灌丛, 植被以金露梅(*Potentilla fruticosa*)灌丛为主要建群种, 草本以线叶蒿草(*Kobresia capillifolia*)、矮蒿草(*Kobresia humilis*)、美丽风毛菊(*Saussurea superba*)等为主, 地表通常具有较厚的苔鲜层和枯枝落叶层. 观测点周围数公里范围均地势平坦, 无明显地形起伏, 是理想的草地生态系统通量观测区域. 从 2003 年 1 月 1 日至 2003 年 12 月 31 日间对青藏高原高寒灌丛 CO<sub>2</sub> 通量进行连续不间断观测, 并利用以下公式计算高寒灌丛 CO<sub>2</sub> 通量:

$$F_{CO_2} = \overline{w's'} = \frac{1}{T} \int_0^T w s dt \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N w' s' \quad (1)$$

式中,  $F_{CO_2}$  为生态系统 CO<sub>2</sub> 通量,  $w'$  为空气瞬时垂直速度脉动量, 用三维超声风速计(CSAT3, Campbell Scientific Inc., UT., USA)测定,  $s'$  为空气 CO<sub>2</sub> 的脉动量, 用 CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O 开路式红外线分析仪(Li-7500, Li-Cor, USA)测定, 上横线表示在一定时间段的平均<sup>[16]</sup>. 安置在观测塔的传感器距地面高度为 2.20 m,  $T = 30$  min, 数据采样频率为 10 Hz, 所有的数据由 CR5000 数据采集器(CSI)采集并计算.

## 2 结果与讨论

### 2.1 日变化特征

青藏高原年气候变化无明显的四季之分, 呈现显著的冷、暖两季差异, 所以分别针对冷、暖两季的 CO<sub>2</sub> 通量日变化特征进行分析. 根据全年观测结果, 分别计算出最冷月(1月)和最暖月(7月)每天从 00:00~23:00 时之间每小时的平均 CO<sub>2</sub> 净吸收或释放, 并以此作为暖季和冷季 CO<sub>2</sub> 通量的日变化特征. 7月青藏高

原高寒灌丛 CO<sub>2</sub> 净吸收日变化振幅较大, CO<sub>2</sub> 净吸收峰值出现在 12:00 左右, 达到 1.19 g CO<sub>2</sub>/(m<sup>2</sup>·h)<sup>-1</sup>; 白昼(08:00~19:00)为 CO<sub>2</sub> 净吸收, 而夜间(20:00~23:00 和 00:00~07:00)为 CO<sub>2</sub> 净排放(图 1). 暖季白天植物光合作用吸收的 CO<sub>2</sub> 量明显高于土壤和植物呼吸释放的 CO<sub>2</sub> 量, 而夜间主要是土壤呼吸和植物暗呼吸释放 CO<sub>2</sub>. 董云社等人<sup>[17]</sup>对内蒙古羊草草地 1998 年 7 月 22~23 日不同时间段(09:00~次日 09:35 时)CO<sub>2</sub> 通量的测定也存在类似的日变化规律, 通量最大值和最小值分别出现在白天 12:00 时和夜间 03:00 时. 1 月青藏高原高寒灌丛 CO<sub>2</sub> 通量日变化特征与暖季差异很大, CO<sub>2</sub> 通量变化振幅极小, 除 11:00~17:00 时少量的 CO<sub>2</sub> 净排放以外, 其他时段 CO<sub>2</sub> 通量接近于零, 最大 CO<sub>2</sub> 净排放为 0.11 g CO<sub>2</sub>/(m<sup>2</sup>·h)<sup>-1</sup>, 出现在 13:00 时左右(图 1). 土壤呼吸作用是冷季高寒灌丛生态系统 CO<sub>2</sub> 通量的主体, 土壤呼吸主要是微生物活动及植物根系、土壤动物、土壤昆虫等呼吸作用的产物, 因此, 凡能影响它们的生命活动和土壤气体扩散的因素都能导致土壤呼吸强度的改变. 温度是通过影响土壤生物新陈代谢速率而影响土壤 CO<sub>2</sub> 的释放, 是影响土壤 CO<sub>2</sub> 释放强度最主要的因素<sup>[18,19]</sup>. 在青藏高原, 土壤微生物活动长期适应在高寒、潮湿等环境下进行, 但地表温度稍微升高时, 微生物活动便会急剧加强<sup>[19]</sup>. 冷季青藏高原夜间温度很低, 海北站 1 月平均气温为 -14.8, 夜间温度甚至可以下降到 -30 以下, 低温抑制土壤生物代谢活动, CO<sub>2</sub> 通量接近于零. 白昼 09:00 以后日照增强, 地表温度上升, 土壤微生物活性随之增强, 土壤 CO<sub>2</sub> 的释放速率相应增加, CO<sub>2</sub> 通量也逐步增加, 13:00 时左右达到峰值(0.11 g CO<sub>2</sub>/(m<sup>2</sup>·h)<sup>-1</sup>), 之后地表温度又开始回落, CO<sub>2</sub> 通量也随之降低.

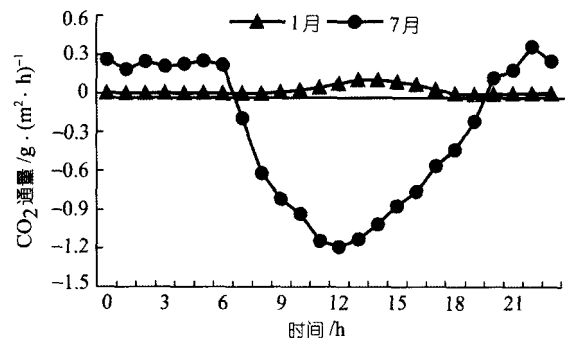


图 1 青藏高原高寒灌丛 CO<sub>2</sub> 通量日变化动态

### 2.2 月变化特征

利用连续观测结果分别计算出1~12月各月日平均CO<sub>2</sub>通量,然后乘以每月的天数,从而得到每月CO<sub>2</sub>净吸收或排放值.从逐月CO<sub>2</sub>通量变化动态来看,青藏高原高寒灌丛在6~9月主要为CO<sub>2</sub>的净吸收,7和8月是全年CO<sub>2</sub>净吸收的最高峰,月吸收量分别达到229 g CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>和247 g CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>,6~9月的总吸收量为673 g CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>;而4月是全年CO<sub>2</sub>排放的最高峰,全月排放量为105 g CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>,1~5月以及10~12月为CO<sub>2</sub>排放,共排放的CO<sub>2</sub>量为446 g CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>(图2).

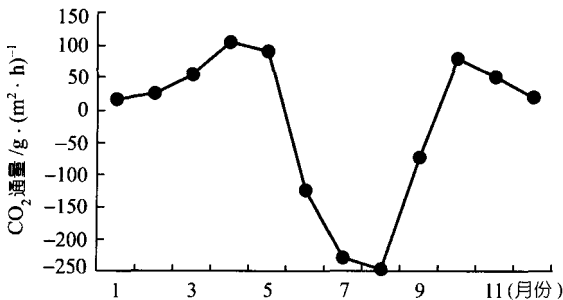


图2 青藏高原高寒灌丛 CO<sub>2</sub>通量月变化

青藏高原高寒季节性气候变化特征可能是决定高寒灌丛 CO<sub>2</sub> 通量月变化模式的重要因素之一. 研究区域年降水量的约80%集中于5~9月, 生长季节水分充足、气温较高, 水热同期的条件非常有利于高原植物生长, 牧草通过光合作用固定大量的 CO<sub>2</sub>, 在总光合作用吸收 CO<sub>2</sub> 量和植物呼吸及土壤呼吸释放的 CO<sub>2</sub> 量的平衡中, 光合作用吸收 CO<sub>2</sub> 的正平衡明显超过呼吸过程的释放量. 草地土壤呼吸与土壤温度变化密切相关, 植物根系和土壤微生物的呼吸过程均

对土壤温度的变化敏感, 一般土壤温度的升高土壤呼吸释放的 CO<sub>2</sub> 量随之增加; 土壤呼吸释放的 CO<sub>2</sub> 量的季节差异很大程度上是由于土壤温度的变化<sup>[20]</sup>. 方精云等人<sup>[21]</sup>对北极陆地生态系统碳循环的研究也认为在类似北极的低温地区土壤微生物对温度的变化反应更加敏感. 12月至翌年2月中旬间是青藏高原气候最为寒冷的时段, 低温抑制植物根系和土壤微生物的代谢活动, 土壤有机质分解缓慢, 这一阶段高寒灌丛 CO<sub>2</sub> 通量较小. 3月初开始气温逐渐回升, 土壤微生物代谢活动增强, 土壤呼吸排放 CO<sub>2</sub> 逐步增加, 4月 CO<sub>2</sub> 净排放达到最大. 4月以后随着牧草返青和温度增加, 高寒灌丛植物光合作用逐渐增强, 到6月牧草光合作用吸收 CO<sub>2</sub> 量超过土壤和植物根系呼吸释放 CO<sub>2</sub> 量, 直至9月下旬高寒灌丛都表现为明显的碳汇(图2). 10月牧草开始枯萎, 光合作用减弱, 从大气中固定的 CO<sub>2</sub> 量不抵土壤微生物和根系呼吸释放的 CO<sub>2</sub> 量, 生态系统表现为 CO<sub>2</sub> 排放, 直到11月下旬低温抑制土壤微生物代谢活动, 生态系统 CO<sub>2</sub> 通量逐步减少.

就 CO<sub>2</sub> 吸收能力而言, 青藏高原高寒灌丛是碳汇的作用比较明显的草地类型, 同样是在无放牧条件下, 美洲北方大草原吸收的 CO<sub>2</sub> 量为 125~209 g CO<sub>2</sub>/(m<sup>2</sup>·a)<sup>-1</sup>(表1), 而青藏高原高寒草甸全年吸收 CO<sub>2</sub> 量为 227 g CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>, 是非常显著的碳汇. 青藏高原昼夜温差大, 牧草生长季节夜间温度(<10 °C)明显低于白昼(>20 °C)<sup>[14]</sup>, 这可能是青藏高原高寒灌丛较高 CO<sub>2</sub> 净吸收的重要因素之一. Gu 等人<sup>[13]</sup>对分布在同一地区的青藏高原高寒草甸生态系统 CO<sub>2</sub> 日净吸收与昼夜温差间(2001年8月)的关联进行研究表明: 生长季节昼夜温差越大高寒草甸生态系统 CO<sub>2</sub> 净吸

表1 不同地区草地生态系统 CO<sub>2</sub>年吸收量

草地类型	位置	海拔/m	CO <sub>2</sub> 净吸收量/g·(m <sup>2</sup> ·a) <sup>-1</sup>	资料来源	
长白山高山冻原	41°53'~42°04'N, 127°57'~128°11'E	1950~2691	145	[22]	
内蒙古大针茅草原	43°33'N, 116°47'E	1300	219~348	[23]	
内蒙古羊草草原			126~195		
北极冻原			62.5~75	[21]	
美洲北方大草原	无放牧草原	518	125~209	[9]	
(北达克塔州, 曼丹)	放牧草原	46°46'N, 100°55'W	700	-189~70	[5]
	播种草场	700	-128~131		
温带半干旱草地	47°16'N, 19°16'E	180	-482	[24]	
高寒灌丛	37°37'N, 101°19'E	3200	227	本项工作	

收值也越高。白昼较高的气温和充足的光照往往有利于植物进行光合作用、吸收较多的 $\text{CO}_2$ ；夜间的低温则可以降低植物和土壤微生物的呼吸；其结果是高寒灌丛 $\text{CO}_2$ 净吸收量增加。实际上，本研究所观测的高寒灌丛在2003年的6~9月之间总共净吸收了 $673 \text{ g CO}_2/\text{m}^2$ ；而无放牧和放牧条件下美洲北方大草原在整个生长季(4月24日至10月26日)净吸收分别为 $345 \text{ g}$ 和 $279 \text{ g CO}_2/\text{m}^2$ 。<sup>[9]</sup>

在干旱半干旱的典型草原，水分是限制群落生产力的主导因素，土壤贮水量与植物地上生物量显著正相关<sup>[25]</sup>。在生长季节(6~9月)内蒙古羊草草原除7月水分有少许盈额外，6、8和9月份均出现亏缺(蒸散量大于降水量)，整个生长季净亏 $38.0 \text{ mm}$ <sup>[23]</sup>；而分布于青藏高原东北部的高寒草地水分较为充足，尤其是在关键的牧草生长季节<sup>[20]</sup>，较高的温度和相对充足的水分非常有利于牧草生长，从而更有利于高寒灌丛生态系统 $\text{CO}_2$ 净吸收。植被净初级生产力(NPP)与叶面积指数(LAI)密切相关，青藏高原植被叶面积指数和净初级生产力变化一致：6月份青藏高原东南部植被LAI接近或超过2，8月份达到最大值4左右，9月份以后开始减小，表明植物生长季趋于结束；而6月份高原东南部植被NPP超过 $100 \text{ g m}^{-2}$ ，7和8月份为 $300 \text{ g/m}^2$ 左右，9月份为 $40 \text{ g/m}^2$ 以下<sup>[26]</sup>；美洲北方大草原地上生物量以及群落 $\text{CO}_2$ 净吸收的峰值与植被叶面积指数的峰值一致，三者均出现在7月中旬至8月初<sup>[5]</sup>。本研究所观测的高寒灌丛6~9月的 $\text{CO}_2$ 净吸收分别为 $124 \text{ g}$ 、 $229 \text{ g}$ 、 $247 \text{ g}$ 和 $73 \text{ g CO}_2/\text{m}^2$ (2003年)，也呈现与青藏高原植被LAI变化一致的月动态模式。内蒙古大针茅群落和羊草群落8月份LAI值达到最高，分别为1.85和1.55<sup>[27]</sup>，美洲北方大草原LAI为0.44(1996~1998年平均)<sup>[5]</sup>，而分布在本研究区域的高寒灌丛8月份LAI平均值为2.6。综上所述，生长季节水热同期的有利条件和显著的昼夜温差、相对较高的叶面积指数以及较强的光合有效辐射等可能是致使青藏高原高寒灌丛在短暂的生长季节具有较高 $\text{CO}_2$ 净吸收量的重要因素。

### 3 小结

青藏高原高寒灌丛 $\text{CO}_2$ 通量日变化特征存在很大的季节性差异，暖季日变化振幅大，白昼为 $\text{CO}_2$ 净吸收， $\text{CO}_2$ 净吸收的极值在12:00时左右，而夜间为 $\text{CO}_2$ 净排放，通量值较为稳定；冷季日变化振幅极小，

除11:00~17:00时少量排放外，其余时段通量均接近于零。青藏高原高寒灌丛从6~9月为 $\text{CO}_2$ 净吸收，8月是全年 $\text{CO}_2$ 吸收的最高月，而1~5月和10~12月为 $\text{CO}_2$ 净排放。无放牧条件下的青藏高原高寒灌丛为显著的碳汇，全年净吸收 $\text{CO}_2$ 达 $227 \text{ g/m}^2$ 。

致谢 本工作受中国科学院创新工程重大项目(编号：KZCX1-SW-01-01A5, KZCX1-09-01)、国家重点基础研究发展规划项目(2002CB412501)及中国科学院西北高原生物研究所重点领域项目(CXLY-2002-1)资助。

### 参 考 文 献

- 1 于贵瑞. 全球变化与陆地生态系统碳循环和碳蓄积. 北京: 气象出版社, 2003. 180~201
- 2 Flanagan L B, Wever A, Carlson P J. Seasonal and interannual variation in dioxide exchange and carbon balance in a northern temperature grassland. *Global Change Biology*, 2002, 8(7): 599~615
- 3 Adams J M, Faire H, Faire R L, et al. Increases in terrestrial carbon storage from the last glacial maximum to the present. *Nature*, 1990, 348: 711~714
- 4 Batjes N H. Mitigation of atmospheric  $\text{CO}_2$  concentrations by increased carbon sequestration in the soil. *Biological Fertilization and Soils*, 1998, 27: 230~235
- 5 Frank A B. Carbon dioxide fluxes over a grazed prairie and seeded pasture in the Northern Great Plains. *Environmental Pollution*, 2002, 116: 397~403
- 6 Janzen H H, Campbell C A, Izaurrealde R C, et al. Management effects on soil C storage on the Canadian prairies. *Soil and Tillage Research*, 1998, 47: 181~195
- 7 Sims P L, Bradford J A. Carbon dioxide fluxes in a southern plains prairie. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 109: 117~134
- 8 Scurlock J M O, Hall D O. The global carbon sink: a grassland perspective. *Global Change Biology*, 1998, 4: 229~233
- 9 Frank A B, Dugas W A. Carbon dioxide fluxes over a northern semiarid, mixed-grass prairie. *Agricultural Forest and Meteorology*, 2001, 108: 317~326
- 10 Kim J, Verma S B, Clement R J. Carbon dioxide budget in temperate grassland ecosystem. *Journal of Geophysical Research*, 1992, 97: 6057~6063
- 11 Xu L K, Dennis D B. Seasonal variation in carbon dioxide exchange over a Mediterranean annual grassland in California. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, 1232: 79~96
- 12 Dugas, W A, Heuer M L, Mayeux H S. Carbon dioxide fluxes over Bermuda grass, native prairie, and sorghum. *Agriculture and Forest Meteorology*, 1999, 93: 121~139

13 Gu S, Tang Y H, Du M Y, et al. Short-term variation of CO<sub>2</sub> flux in relation to environmental controls in an alpine meadow on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research*. 2004, 108: 4670-4679

14 于应文, 胡自治, 徐长林, 等. 东祁连山高寒灌丛植被类型与分布特征. *甘肃农业大学学报*, 1999, 34(1): 12-17

15 Zhao X Q, Zhou X M. Ecological basis of alpine meadow ecosystem management in Tibet: haibei alpine meadow ecosystem research station. *Ambio*, 1999, 28(8): 642-647

16 朱治林, 孙晓敏, 张仁华, 等. 内蒙古半干旱草原能量物质交换的微气象方法估算. *气候与环境变化研究*, 2002, 7(3): 351-358

17 董云社, 章申, 齐玉春, 等. 内蒙古典型草地 CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub> 通量的同时观测及其日变化. *科学通报*, 2000, 45(3): 318-322

18 裴志永, 欧阳华, 周才平. 青藏高原高寒草原碳排放及其迁移过程研究. *生态学报*, 2003, 23(2): 231-236

19 曹广民, 李英年, 张金鑫, 等. 环境因子对暗沃寒冻锥形土壤 CO<sub>2</sub> 释放速率的影响. *草地学报*, 2001, 19(4): 307-313

20 Cao G M, Tang Y H, Mo W H, et al. Grazing intensity alters soil respiration in an alpine meadow on the Tibetan Plateau. *Soil Biology and Biochemistry*. 2004, 36: 237-243

21 方精云, 位梦华. 北极陆地生态系统的碳循环与全球温暖化. *环境科学学报*, 1998, 18(2): 113-121

22 吴钢, 赵景柱, 邵国凡, 等. 长白山高山冻原生态系统的碳循环及与北极对比研究. *中国科学, D 辑*, 2001, 31(12): 1039-1045

23 陈佐忠, 汪诗平. 中国典型草原生态系统. 北京: 科学出版社, 2000. 223-227

24 Balogh J, Czöbel S, Juhász A, et al. Seasonal carbon-balance of a semi-desert temperate grassland ecosystem over a year period. *Acta Biologica Szegediensis*, 2002, 46(3-4): 221-222

25 崔晓勇, 陈四清, 陈佐忠. 大针茅典型草原土壤 CO<sub>2</sub> 排放规律的研究. *应用生态学报*, 2000, 11(3): 390-394

26 吕建华, 季劲钧. 青藏高原大气-植被相互作用的模拟试验. 植被叶面积指数和净初级生产力. *大气科学*, 2002, 26(2): 255-262

27 杜占池, 杨宗贵, 崔晓勇. 内蒙古典型草原地区 5 类植物群落叶面积指数的比较研究. *中国草地*, 2001, 23(5): 13-18

(2004-04-12 收稿, 2004-10-11 收修修改稿)

· 书 讯 ·

(上接 503 页)

所谓深, 指的是它的内容. 可以说, 一条史料可以有多种理解、万种应用的潜力. 而且讨论的问题每深入一次, 所需的气候史料数量上就要扩大一次, 随之还会发掘出一些史料的气候指示意义. 竺可桢在历史气候研究里巧妙应用物候学的史料就是一个很好的例子, 他根据《齐民要术》所记的物候期与现代比较, 做出公元 6 世纪黄河中下游的温度约与现代相同的估计. 但物候反映一个时期的生态系统的特点, 所以这只是对一个时段的温度的总体估计, 并不具有每年的分辨率. 而本书所含有的历史气候记录精确到年, 甚至记有日期, 在时间分辨率上大为提高, 这将会使得历史气候研究提高到一个新的水平. 此外, 书中辑入了许多有关人类活动和社会情境的史料, 都具有其气候内涵, 这些形成了间接的和隐性的古气候信息的新的丰富来源, 标志着气候史料的研制进入了一个新境界.

但是, 气候史料是有确定的范围的, 不能大而无节、

深而无度地包罗万象. 历史气候学发展的关键在于需要一套比较成熟的气候史料, 作为联系其他信息来源和为我所用的操作平台, 达到综合应用各类史料的目的, 这对扩展历史气候学发展前景无疑是极为重要的. 《总集》对此做出了重大贡献.

对任何科学而言, 资料都是基础. 现代的科学被称作实验科学, 就是主要通过实验手段取得必要的数据. 实验水平往往决定科学的水平. 历史气候学是建立在人类几千年的实践过程中对气候变化感受的记载, 其中人文变化与气候变化是融合在一起的, 因此, 史料的研究本身就具有综合应用各种科学知识与方法性质, 其难度显然不同于实验技术, 它只有在同时注意人文与自然的变化而有新的领会时, 才能迈进一步. 因此, 我祝贺《总集》的出版, 也同时祝贺它在历史气候的理论与方法以及对当前气候变化的评估等方面有新的突破, 希望它能够得到应有的重视和广泛的应用.

中国气象科学研究院 张家诚