

黄土塬区麦田 CO₂ 通量季节变化

李双江^{1 2}, 刘文兆¹, 高桥厚裕³, 桧山哲哉⁴, 福岛义宏³, 李志^{1 2},
刘志红^{1 2}, 张红星^{2 5}

(1. 中国科学院水利部水土保持研究所, 西北农林科技大学, 陕西杨凌 712100; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039;
3. 日本综合地球环境学研究所, 日本京都市; 4. 日本名古屋大学地球水循环研究中心; 5. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085)

摘要 利用涡度相关法对黄土塬区小麦地 CO₂ 通量季节变化进行了研究。结果表明: (1) 小麦 CO₂ 通量日变化与生育期、光合有效辐射、土壤温度密切相关。(2) 小麦各生育期 CO₂ 的平均日收支由大到小依次为拔节孕穗期 > 返青期 > 起身期 > 抽穗期 > 成熟期 > 灌浆期 > 出苗分蘖期 > 越冬期。(3) 白昼 CO₂ 通量与光合有效辐射在出苗分蘖期、起身期、成熟期几乎不相关, 在灌浆期低度相关, 在其他生育期内都达到了显著相关。CO₂ 通量与夜间 2cm 土壤温度在越冬、起身、拔节孕穗期显著相关, 其他 5 个生育期内为低度相关。(4) 小麦收割后表现为碳源, 各天具体状况与前一天是否降雨、当天的天气状况有关。

关键词 CO₂ 通量; 涡度相关法; 黄土塬区; 日变化; 季变化; CO₂ 收支

文章编号: 1000-0933 (2007) 05-1987-06 中图分类号: Q948.5181 文献标识码: A

The seasonal variation of CO₂ flux in a wheat field of the Loess Plateau

LI Shuang-Jiang^{1 2}, LIU Wen-Zhao¹, Atsuhiko Takahashi³, Tetsuya Hiyama⁴, Yoshihiro Fukushima³, LI Zhi^{1 2},
LIU Zhi-Hong^{1 2}, ZHANG Hong-Xing^{2 5}

1 Institute of Soil and Water Conservation, CAS& MWR, Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling Shaanxi 712100, China

2 Graduate College of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

3 Research Institute for Humanity and Nature (RIHN), Japan

4 Hydrospheric Atmospheric Research Center (HyARC), Nagoya University, Japan

5 Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

Acta Ecologica Sinica 2007 27 (5) 1987 ~ 1992.

Abstract: The seasonal variation of CO₂ flux in a winter wheat field of the Loess Plateau was studied using an eddy covariance method. The following results were obtained. (1) Daily CO₂ flux was closely related to growing stages, photosynthetically active radiation, and soil temperature. (2) The average daily CO₂ flux at different growing stages followed the order of: jointing and booting > reviving > erecting > heading > ripening > grain-filling > seedling and tillering > wintering period. (3) There was little correlation between daytime CO₂ flux and photosynthetically active radiation at the seedling-tillering, heading, and maturing stages; but there was weak correlation during grain filling, and

基金项目: 日本文部科学省资助项目 (中日合作长武黄土高原大气边界层观测研究); 中国科学院知识创新工程重要方向资助项目 (KZCX2-YW-424-1); 中国科学院水利部水土保持研究所知识创新工程领域前沿资助项目 (SW04301)

收稿日期: 2006-02-15; **修订日期:** 2007-04-20

作者简介: 李双江 (1978 ~) 男, 河北省献县人, 博士生, 主要从事农田生态系统过程与通量研究. E-mail: ajiaer@hotmail.com

* **通讯作者** Corresponding author. E-mail: wzliu@ms.iswc.ac.cn

Foundation item: This work was financially supported by Project of Ministry of Education, Culture, Sports, Sciences and Technology, Japan (Observation and Study of Atmospheric Boundary Layer on Changwu Tableland of the Loess Plateau); Knowledge Innovation Project of CAS (No. KZCX2-YW-424-1); Program of Knowledge Innovation Project of ISWC, CAS&MWR (No. SW04301)

Received date: 2006-02-15; **Accepted date:** 2007-04-20

Biography: LI Shuang-Jiang, Ph. D. candidate, mainly engaged in eco-process and flux in farmland ecosystem. E-mail: ajiaer@hotmail.com

strong correlation in the other stages. There was significant correlation between CO₂ flux and nighttime soil temperatures at the 2-cm depth at the wintering , heading and jointing and booting stage , and low correlation at the other stages. (4) The wheat field became carbon source after harvest. The carbon budget of a given day was affected by the weather of the day as well as the rainfall condition in the previous day.

Key Words : CO₂ flux ; eddy covariance method ; Loess Plateau ; daily variation ; variation during each growing stage ; CO₂ budget

气候变暖是当今全球性的环境问题 ,其主要原因是大气中温室气体浓度的不断增加。CO₂为最重要的温室气体 ,自工业革命开始到 1990 年 ,CO₂增加对于增强温室效应的贡献约为 62%^[1]。大气中 CO₂已从工业革命前的 280μmol/mol 升高到现在的 370μmol/mol ,并继续以每年 1 ~ 2μmol/mol 的速度增加^[2]。在过去 20a 里大部分 CO₂排放增加是由于化石燃料燃烧造成的 ,人类活动导致的土地利用变化引起的 CO₂排放占 10% ~ 30%^[3]。近年来 ,关于土壤-植物系统 CO₂通量的研究多见于森林生态系统^[4~6]和草原生态系统^[7~9] ,农田生态系统 CO₂通量的研究大多只是对作物某生育期的具体研究^[10,11] ,黄土塬区的 CO₂通量尤其是所有生育期的报道则不多见。由于长期的人类活动的干扰 ,我国 78% 的耕作土壤的生产力和土壤碳库已经退化到较低水平 ,如果中国农田损失的土壤有机碳的 50% 能够在 20 ~ 50a 的时间内恢复 ,农田土壤将从大气中吸收 3.5 × 10¹²kg 的有机碳^①。准确评估在现有的传统耕作方式下农田固碳现状 ,可为制定相应的 CO₂减排增汇措施提供依据。

1 研究材料与方法

1.1 研究区概况

观测样地设在中国科学院长武黄土高原农业生态试验站塬面观测场 ,地处黄土高原中南部陕甘交界处的陕西省长武县洪家镇王东村 ,北纬 35°14' ,东经 107°41' ,海拔 1220m。属暖温带半湿润大陆性季风气候 ,年均降水 584mm ,年均气温 9.1℃ ,无霜期 171d ,地下水埋深 50 ~ 80m ,属旱作农业区 ,地貌属高塬沟壑区 ,地带性土壤为黑垆土 ,质地均匀疏松。观测场范围内试验年份种植小麦 ,地面平整 ,构成大范围均一的下垫面 ,满足了实验要求盛行风向的风浪区长度。

1.2 观测方法

观测地建有大气边界层观测塔 ,涡动相关系统的探头安装于 2m 高度的伸展臂上 ,由三维超声风温仪和开路 CO₂/ H₂O 分析仪 (Li- 7500 ,Li-Cor ,USA)组成 ,原始采样频率为 10Hz ,数据传输给数据采集器 (CR5000X ,Campbell Scientific ,USA)进行存储。另外还安装了常规气象观测系统 ,观测内容包括大气温度、湿度、风速、光合有效辐 (Li-190F ,LiCor Inc. ,USA)。地温探头设置深度为 2 ,10 ,20 ,40 ,80cm ,这些要素均按 30min 计算平均进行存储。本文选取数据的时间为 2004 年 9 月 24 日 ~ 2005 年 7 月 31 日。小麦生育期划分与起止时间如表 1 所示。

表 1 长武县 2004 ~ 2005 年冬小麦生育期划分									
Table 1 The partition of winter wheat growing stage in Changwu county from 2004 to 2005									
生育期 Growing stage	出苗分蘖 Seedling and tillering	越冬 Wintering	返青 Reviving	起身 Erecting	拔节 Jointing	孕穗 Booting	抽穗 Heading	灌浆 Grainfilling	成熟 Ripening
日期 Date	9.24 ~ 11.19	11.20 ~ 3.9	3.10 ~ 4.1	4.2 ~ 4.19	4.20 ~ 5.2	5.3 ~ 5.14	5.15 ~ 6.1	6.2 ~ 6.17	6.18 ~ 6.21
时间 Time (d)	57	110	22	18	13	12	18	16	4

① 王效科 ,郭然 ,韩冰 ,等. 中国陆地生态系统固碳潜力和技术措施的初步评价. 见 :刘健 ,刘纪远 ,黄耀 ,等. 中国碳循环与碳管理会议论文摘要集 ,北京 :中国科学院碳循环联合办公室 2004 81 ~ 86

1.3 计算方法

目前 , 涡度相关技术 (EC) 已经广泛应用于植被 - 大气间 CO₂ 通量的测定中 , 该方法已经成为通量观测网络 FLUXNET 的标准观测方法。其计算 CO₂ 通量的公式为 [12~14] :

$$F = \overline{w's'} = \frac{1}{T} \int_0^T w s dt \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N w' s'$$

(1)

式中 , F 为 CO₂ 气体的通量密度 , w 垂直风速 , s 为 CO₂ 的浓度 , 撇号代表偏离平均的脉动 (如 $s' = s - \bar{s}$, 上横线表示某段时间的平均)。通量值为正表示植被和土壤向大气中排放 CO₂ , 反之则表示从大气中吸收。平均周期 T 取 30min [15] , 得 $N = 18000$ 。计算过程中还包含了密度订正 [16] 和三维旋转的坐标订正 [17]。

由于电力及仪器故障等原因 , 在长期连续的野外监测试验中出现数据缺失或较大野点 ($\pm 3\sigma$) 被剔除等问题。夜间净生态系统交换量与温度有很显著的指数关系 [18] , 用摩擦速度阈值 $u^* > 1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的夜晚通量与 2cm 土壤温度拟合得到的指数方程式 (2) 来插补夜间 (光合有效辐射 $PAR \leq 10 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) $u^* \leq 1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时段和缺失的通量值。白天的通量数据用净生态系统碳通量与光合有效辐射拟合的方程 (3) 式进行插补缺失 [19]。式 (2)、(3) 中的常数 b_0 、 b_1 、 a_0 、 a_1 、 a_2 通过非线性最小方差法拟合得出。所有数据处理及作图都用 MATLAB7.0 来完成 (Math Works Inc. , Natick , MA)。

$$F = b_0 \exp (b_1 T_{\text{soil}})$$

(2)

$$F = a_1 \cdot PPFD / (a_2 + PPFD) + a_0$$

(3)

2 结果与分析

2.1 小麦各生育期 CO₂ 通量变化

分别计算各天 CO₂ 的通量 , 将日通量大小及变化相似的拔节与孕穗期合并。各生育期日通量变化见图 1 (取算术平均值)。

从各生育期小麦地 CO₂ 通量的日变化可得出 , 在出苗分蘖期 CO₂ 通量值很小 , 数量级为 10⁻³。大体表现为 10:00~18:00 由于小麦的吸收 , 在零附近波动 , 其他时间为极少量释放。此期小麦植株小、土壤疏松、气温高 , 以土壤呼吸为主。在越冬期 , 由于温度低 (-4~7℃) , 小麦生长缓慢甚至停止生长 , 植物呼吸作用减弱 , 呼吸作用排放的 CO₂ 较低 ; 同时 , 较低的气温和地温抑制了土壤微生物的活性 , 减少了土壤中 CO₂ 的排放量 , 因此夜间土壤释放的 CO₂ 的值较小。此后的生育期内白天通量值逐渐增大 , 直到拔节孕穗期达到最大 , 抽穗、灌浆期又依次减小。成熟期全天表现为 CO₂ 的释放。夜间的通量值也依次增大 , 直到抽穗期达到最大 , 灌浆期、成熟期又有所降低。白昼的通量中 , 10:00 出现峰值 , 段晓男对内蒙古河套灌区春小麦也观测到类似现象 [10]。在 8:00 和 18:00 左右 , 通量符号发生转变时刻通量有突变现象 , 这应与大气的稳定度变化、凝水有关 [20]。综合以上各生育期可看出 , 小麦的生育状况直接影响碳通量。

2.2 麦田 CO₂ 日收支的季节变化

由小麦各生育期 CO₂ 日收支 (图 2) 可见 , 出苗分蘖期、灌浆期、成熟期表现为碳源 , 前者较微弱 , 为 0.79 g·m⁻²·d⁻¹ , 后者明显 , 为 5.82g·m⁻²·d⁻¹。其他各生育期表现为碳汇 , 拔节孕穗期达到最大值 -13.70 g·m⁻²·d⁻¹ , 这

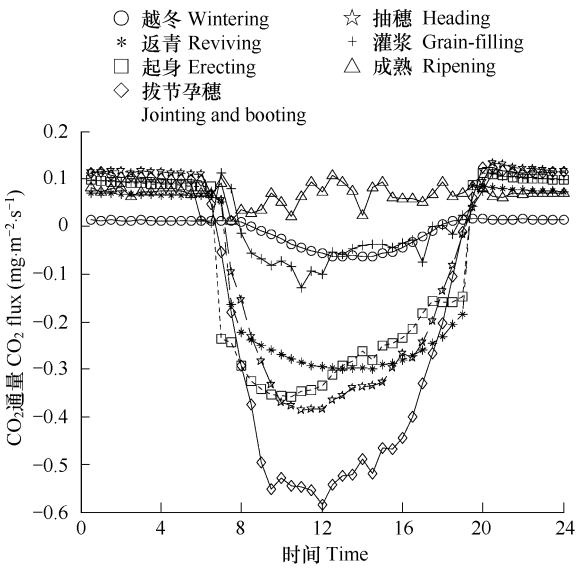


图 1 各生育期小麦地 CO₂ 通量的日变化
Fig. 1 The daily CO₂ flux in wheat field at each growing stage

与莫兴国等在北京顺义观测的结果较一致^[11]。值得注意的是灌浆期表现为碳源,这应是白天光合速率有所降低和夜间温度较之前升高导致CO₂释放增加造成的。

整个生育期内逐日碳收支的变化中(图3),出苗分蘖期、越冬期内碳收支绝对值较小,从越冬期末开始越来越明显的表现为碳汇,小麦播种160多天后碳收支的急剧变化应当是进入返青期温度升高小麦的光合作用增强的缘故。返青期与起身期日收支相近,在拔节孕穗期小麦地日吸收的碳量最大,之后的各生育期内越来越小,直到灌浆中期(小麦播种后261d)成为碳源。在整个生育期,降雨后碳收支在数天内出现较大的波动,波动的程度随生育期的不同而有所差异,在分蘖末期、抽穗末期、灌浆初期波动最为强烈,在整个越冬期则不明显。

2.3 光合有效辐射、2cm 地温与 CO₂ 通量的关系

分别就小麦各生育期的CO₂通量与光合有效辐射及CO₂通量与土壤2cm温度作相关性分析,见表2。可见,白昼CO₂通量与光合有效辐射在出苗分蘖期、起身期、成熟期几乎不相关,在灌浆期低度相关,在其他生育期内都达到了显著相关以上水平。这与刘树华等在北京郊区的观测结果一致^[21]。白昼CO₂通量与2cm土壤温度返青期达到了显著相关水平,起身期达到高度相关水平可能与温度的变化较大成为胁迫因素有关,出苗分蘖、成熟期低度相关,其他4个生育期几乎不相关。CO₂通量与夜间2cm土壤温度越冬、起身、拔节孕穗期达到了显著水平,其他5个生育期内为低度相关。由于降雨的影响(图3),使得各生育期内的相关性不同程度的被弱化。

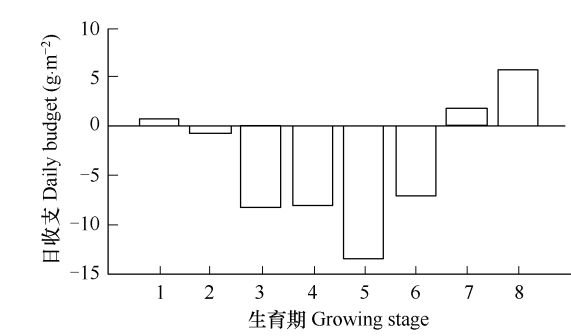


图2 小麦各生育期CO₂日收支

Fig. 2 The daily CO₂ budget at each growing season

1~8 代表出苗分蘖、越冬、返青、起身、拔节孕穗、抽穗、灌浆、成熟 seedling and tillering, wintering, reviving, erecting, jointing and booting, heading, grain-filling, ripening

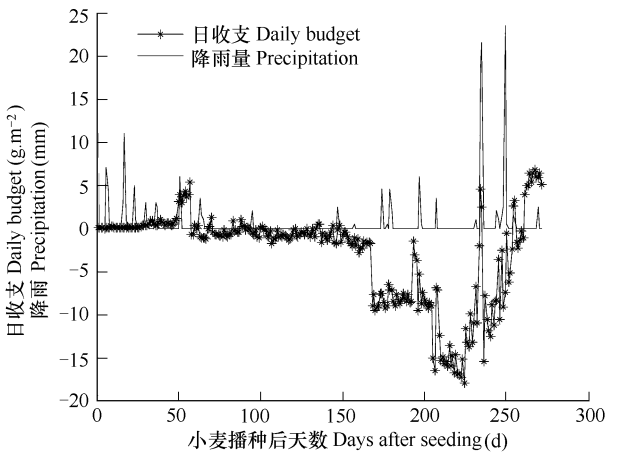


图3 小麦田CO₂收支的逐日变化

Fig. 3 The daily CO₂ budget during growing period of winter wheat

表2 CO ₂ 通量与光合有效辐射、土壤2cm温度的相关系数								
Table 2 The correlation coefficient between CO ₂ flux and PAR, soil temperature at the 2cm depth								
生育期 Growing stage	R ₁	P ₁	R ₂	P ₂	n-日 n-day	R ₃	P ₃	n-夜 n-night
出苗分蘖 Seedling and tillering	-0.01	* *	-0.29	*	637	0.42	*	48
越冬 Wintering	-0.55	*	-0.11	* *	636	0.65	*	132
返青 Reviving	-0.57	*	0.51	* *	72	0.43	* *	28
起身 Erecting	-0.09	* * *	0.81	*	75	0.85	*	25
拔节孕穗 Jointing and booting	-0.77	*	-0.09	* * *	618	0.62	*	68
抽穗 Heading	-0.70	*	-0.05	* *	275	0.30	* * *	24
灌浆 Grain-filling	-0.12	*	-0.15	* *	395	0.32	*	21
成熟 Ripening	-0.02	*	-0.23	* *	60	0.42	* * *	16

R₁、R₂、R₃ 分别为白天光合、白天土壤温度、夜间土壤温度与CO₂通量的相关系数 R₁:correlation coefficient between PAR and CO₂ flux in daytime R₂:correlation coefficient between soil temperature and CO₂ flux in daytime R₃:correlation coefficient between soil temperature and CO₂ flux in nighttime ;* P<0.01 ,* * 0.01<P<0.1 ,* * * P>0.1 n :样本数 Sample size

2.4 小麦收割后 CO₂ 通量的变化趋势

收割后的第 3、4、7、9、10、11、26、28、29、33 天降雨,第 1~6 天地表有联合收割机收割后的秸秆覆盖,地表无杂草生长。小麦收割后随着天数的增加 CO₂ 的日收支也发生变化。这段时间由于地表无植被,全天表现为碳的释放。收割后 16d 内 CO₂ 的日释放量逐渐增加到最大值 10.02 g·m⁻²,之后的通量维持在 7 g·m⁻² 左右波动。降雨后第 2 天的日收支一般出现较大的波动。

3 结论

小麦 CO₂ 通量日变化与生育期、光合有效辐射、土壤温度密切相关,CO₂ 的平均日收支随着小麦生育期的变化而变化,整个生长季小麦地逐日碳收支的变化主要受小麦的生育期影响,降雨的影响因生育期的不同而有所差异,CO₂ 通量与白昼光合有效辐射、夜间 2cm 土壤温度的相关程度因生育期的不同而存在差异,小麦收割后表现为碳源,每天的具体状况与当天的天气条件及前一天是否降雨等因素相关。

某些环境条件可以造成涡度相关技术精确度的降低,如上风向没有足够的下垫面、湍流较弱、大气储存、通量辐散和平流等因素^[22 23],另一方面,在夜间用温度拟合 CO₂ 通量及对降雨日的拟合,也会带来精度降低。

References :

[1] Hansen J, Lacis A, Prather M. Greenhouse effect of Chlorofluorocarbons and other trace gases. *Journal of Geophysical Research*, 1989, 94 (D13) : 16417—16422.

[2] Genthon C, Barnola J M, Raynaud D, et al. Vostok ice core : climate response to CO₂ and orbital forcing changes over the last climatic cycle. *Nature*, 1987, 329 #14—418.

[3] Huang Y. The carbon and nitrogen exchange in soil-atmosphere system from experiments to models. Beijing : Pubilshing company of meteorology, 2003, 28.

[4] Jones J B, Mulholland P J. Carbon dioxide variation in a Hardwood forest atream :An integrative measure of whole catchmentsoil respiration. *Ecosystems*, 1998, 1 (2) :183—196.

[5] Buchmann N. Biotic and abiotic factors controlling soil respiration rates in Picea abies atands. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32 (11-12) : 1625—1635.

[6] Ekblad A, Hoegberg P. Natural abundance of ¹³C in CO₂ respired from forest soils reveals speed of link between tree photosynthesis and root respiration. *Oecologia*, 2001, 127 (3) :305—308.

[7] Chen S Q, Cui X Y, Zhou G S, et al. Study on the CO₂-release rate of soil respiration and litter decomposition in stipa grandis steppe in Xilin River Basin ,Inner Mongloia. *Acta Botanica Sinica*, 1999, 41 (6) :645—650.

[8] Cao G M, Li Y N, Zhang J X, et al. Values of carbon dioxide emission from different land-use patterns of Alpine meadow ,Chinese Journal of Environmental Science, 2001, 22 (6) :14—19.

[9] Li H, Han X G, et al. Correlations between plant biomass and soil respiration in a *Leymus chinesnsis* community in the Xilin River Basin of Inner Mongolia. *Acta Botanica Sinica*, 2002, 44 (5) :593—597.

[10] Duan X N, Wang X K, Feng Z Z, et al. Study of net ecosystem exchange for seedling stage of spring wheat ecosystem in Hetao Irrigation District , Inner Mongolia. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2005, 2 :166—171.

[11] Mo X G, Chen D, Lin Z H, et al. Study on energy and CO₂ fluxs over winter fields with different water treatments. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2003, 10 :77—81.

[12] Baldocchi D D, Hicks B B, Meyers T P. Measuring biosphere-atmosphere exchanges of biologically related gases with micrometeorological methods. *Ecology*, 1988, 69 :1331—1340.

[13] Paw U K, Baldocchi D D, Meyers T P, et al. Correction of eddy covariance measurements incorporating both advective effects and density fluxes. *Boun-Lay Meteorol*, 2000, 97 :487—511 ;

[14] Reynolds O. On the dynamical theory of incompressible viscous fluies and the determination of criterion. *Phil Trans Roy Soc London*, 1895, A174 : 935—982.

[15] Sun X M, Zhu Z L, Xu J P, et al. Determination of averaging period parameter and its effects analysis for eddy covariance measurements. *Science in China (Ser. D)*, 2004, 34 (S2) :30—36.

[16] Webb E K, Pearman G I, Leuning R. Correction of flux measurement for density effects due to heat and water vapor transfer. *Ruart J R Met Soc*, 1980, 106 :85—100.

[17] Wilczak J C , Oncley S P , Stage S A. Sonic anemometer tilt correction algorithms. *Boundary Layer Meteorology* ,2001 ,99 :127 — 150.

[18] Lloyd J A. On the temperature dependence of soil respiration. *Funct Eco* ,1994 8 :315 — 323.

[19] Falge E , Baldocchi D , Olson R , *et al.* Gap filling strategies for defensible and annual sums of net ecosystem change. *Agricultural and Forest Meteorology* ,2001 ,107 :43 — 69.

[20] Li Z Q , Yu G R , Wen X F , *et al.* Energy balance closure at ChinaFLUX site. *Science in China (Ser. D)* ,2004 34 (S2) :46 — 56.

[21] Liu S H , Ma Y M. The characteristics of CO₂ concentration and flux turbulence fluxes in the near surface layer over the wheat field. *Acta Meteorologica Sinica* ,1997 4 :181 — 199.

[22] Song X , Liu Y F , Xu X F. Study on the comparison of Chamber technique and eddy covariance in measuring carbon flux ,*Jiangxi Science* 2003 9 : 206 — 210.

[23] Baldocchi D. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems :past , present and future. *Global Change Biology* ,2003 9 :479 — 492.

参考文献：

[3] 黄耀. 地气系统碳氮交换——从实验到模型. 北京 :气象出版社 2003. 28.

[7] 陈四清 , 崔晓勇 , 周广胜 , 等. 内蒙古锡林河流域大针茅草原土壤呼吸和凋落物分解的 CO₂ 排放速率研究. *植物学报* ,1999 41 (6) :645 ~ 650.

[8] 曹广民 , 李英年 , 张金霞 , 等. 高寒草甸不同土地利用格局土壤 CO₂ 的释放量. *环境科学* 2001 22 (6) :14 ~ 19.

[10] 段晓男 , 王效科 , 冯兆忠 , 等. 内蒙古河套灌区春小麦苗期生态系统 CO₂ 通量变化研究. *环境科学学报* 2005 2 :166 ~ 171.

[11] 莫兴国 , 陈丹 , 林忠辉 , 等. 不同水分条件麦田能量与 CO₂ 通量变化特征研究. *中国生态农业学报* 2003 10 :77 ~ 81.

[14] 孙晓敏 , 朱治林 , 许金萍 , 等. 涡动相关测定中平均周期参数的确定及其影响分析. *中国科学 D 辑* 2004 34 (增 II) :30 ~ 36.

[20] 李正泉 , 于贵瑞 , 温学发 , 等. 中国通量观测网络 (ChinaFLUX) 能量平衡闭合状况的评价. *中国科学 D 辑* 2004 34 (增 II) :46 ~ 56.

[21] 刘树华 , 麻益民. 农田近地面层 CO₂ 和湍流通量特征研究. *大气科学* ,1997 4 :181 ~ 199.

[22] 宋霞 , 刘允芬 , 徐小锋. 箱法和涡度相关法测碳通量的比较研究. *江西科学* 2003 9 :206 ~ 210.