

仪器的加热效应校正对生态系统 碳水通量估算的影响*

朱先进^{1,2} 于贵瑞^{1**} 王秋凤¹ 张 弥^{1,2} 韩士杰³ 赵新全⁴ 闫俊华⁵

(¹中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室 CERN 综合研究中心,北京 100101; ²中国科学院研究生院,北京 100049; ³中国科学院沈阳应用生态研究所,沈阳 110016; ⁴中国科学院西北高原生物研究所,西宁 810001; ⁵中国科学院华南植物园,广州 510650)

摘 要 涡度相关技术的广泛应用为获取生态系统碳、水通量提供了可能,但在开路式涡度相关系统中,仪器的加热效应增大了观测数据的不确定性。为了衡量仪器的加热效应,以 ChinaFLUX 3 个典型生态系统(长白山温带针阔混交林(CBS)、海北灌丛草甸(HBGC)、鼎湖山亚热带常绿阔叶林(DHS))为研究对象,就仪器的加热效应校正对碳、水通量估算的影响进行分析。结果表明:加热校正没有改变生态系统的能量闭合特征,也没有对水汽通量的估算产生影响,但显著减小了 CBS 和 HBGC 非生长季的净生态系统生产力(NEP),进而减少了 NEP 的年总量,对 DHS 没有显著影响。NEP 减小幅度受到温度的强烈影响,CBS 为 7.7%~10.4%,远小于 HBGC 的 76.6%~85.2%,HBGC 的 NEP 大幅降低主要是由夜间 NEP 的改变导致生态系统呼吸(RE)的增大而引起。因而,在温带生态系统中,充分考虑加热校正对于准确估算生态系统的碳收支具有重要作用。

关键词 涡度相关; 碳收支; 水汽通量; ChinaFLUX; 能量闭合程度

中图分类号 Q148 文献标识码 A 文章编号 1000-4890(2012)2-0487-07

Instrument heating correction effect on estimation of ecosystem carbon and water fluxes.
ZHU Xian-jin^{1,2}, YU Gui-rui^{1**}, WANG Qiu-feng¹, ZHANG Mi^{1,2}, HAN Shi-jie³, ZHAO Xin-quan⁴, YAN Jun-hua⁵ (¹*Synthesis Research Center of CERN, Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;* ²*Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;* ³*Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;* ⁴*Northwest Plateau Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810001, China;* ⁵*South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China*). *Chinese Journal of Ecology*, 2012, **31**(2): 487-493.

Abstract: Eddy covariance is widely applied in obtaining ecosystem carbon and water fluxes. However, in open-path eddy covariance system, the instrument may heat up the environment, and introduce uncertainties into the data. To scale the instrument heating effect, three typical ecosystems in ChinaFLUX, *i. e.*, Changbaishan temperate mixed forest (CBS), Haibei shrub meadow (HBGC), and Dinghushan subtropical evergreen broad-leaved forest (DHS), were selected, and the instrument heating correction effect on the estimation of the carbon and water fluxes was analyzed. Instrument heating correction had no significant effect on the ecosystem energy balance closure and water flux, but decreased the net ecosystem production (NEP) of CBS and HBGC during their non-growth season significantly, and led to a decrease in the annual sum NEP of the two ecosystems. However, no evidence was observed that heating correction affected the NEP of DHS. The decrement of NEP was strongly affected by annual mean air temperature.

* 国家重点基础研究发展计划项目(2010CB833504)、国家自然科学基金项目(30800151、31061140359 和 30590380) 和中国科学院战略性先导科技专项(XDA05050601)资助。

** 通讯作者 E-mail: yugr@igsrr.ac.cn

收稿日期: 2011-07-06 接受日期: 2011-10-12

In CBS ecosystem, the NEP decreased by 7.7%–10.4%, much lower than that (76.6%–85.2%) in HBGC ecosystem. The significant decrease of NEP in HBGC ecosystem could be due to the remarkable change in NEP during night, which in return could increase the ecosystem's respiration (RE). Therefore, it would be necessary to fully consider the effect of instrument heating correction on the accurate estimation of carbon budget in temperate ecosystems.

Key words: eddy covariance; carbon budget; water flux; ChinaFLUX; energy balance closure.

涡度相关技术通过计算风速脉动与 CO₂、水汽脉动的协方差测定植被-大气间的碳水通量(于贵瑞和孙晓敏 2006),目前已在世界范围内得到广泛应用(Baldocchi 2008)。根据使用的红外气体分析仪的不同,涡度相关观测系统可以分为开路涡度相关系统(open-path eddy covariance system, OPEC)和闭路涡度相关系统(close-path eddy covariance system, CPEC)。OPEC 因结构简单、便于安装、耗电量低等优势在世界范围内应用的更为广泛(Leuning & Moncrieff, 1990; Leuning & Judd, 1996; Haslwanter *et al.* 2009)。

在 OPEC 中,红外气体分析仪的自动加热可以导致观测路径上的温度与环境温度不同,造成观测通量失真(Burba *et al.* 2008),如在严寒的冬天,美国 Alaska 森林的净初级生产力(NEP)为正值即表现为碳吸收(Goulden *et al.*, 2006; Welp *et al.*, 2007),这显然与常识不符。为此,Burba 等(2008)经过理论推导与实验分析,提出了一套加热校正方法,该方法被应用到美洲森林(Amiro 2010)、欧洲灌丛(Reverter *et al.* 2010)生态系统中,发现校正后的碳吸收强度明显降低。

中国陆地生态系统通量观测研究网络(China-FLUX)自 2002 年建立以来,利用 OPEC 连续开展了多年原位观测,获取了大量碳水通量数据,形成了系统的数据处理流程(Yu *et al.* 2006)。但在处理因热量和水汽通量传输造成的 CO₂和水汽密度变化的影响时,该流程仍然采用 WPL 校正,没有考虑仪器的加热效应。同时,ChinaFLUX 多数生态系统位于北半球中高纬度地区,均经历寒冷的冬季。因而,为了提高生态系统碳水通量估算精度,分析仪器加热

效应对碳水通量的影响是一个急需考虑的问题。

本研究以 ChinaFLUX 3 个典型生态系统:长白山温带针阔混交林和海北灌丛草甸、鼎湖山亚热带常绿阔叶林为研究对象,分析仪器的加热效应校正生态系统碳水通量评估中的效果,以期阐明:1) 加热校正对典型生态系统碳水通量季节动态特征的影响;2) 加热校正对生态系统碳水通量年总量特征的影响;3) 加热校正对碳水通量的影响在不同生态系统间的差异,从而为准确获取生态系统的碳水通量数据提供依据。

1 材料与方法

1.1 站点介绍

本研究选择 ChinaFLUX 中 3 个生态系统(长白山温带针阔混交林(CBS)和海北灌丛草甸(HBGC)、鼎湖山亚热带常绿阔叶林(DHS))2003—2005 年 30 min 的通量和常规气象数据,分析加热校正对生态系统碳水通量的影响。3 个生态系统的基本信息如表 1 所示,详细信息请参见文献(Li *et al.*, 2006; Wang *et al.* 2006; Zhang *et al.* 2006)。

1.2 数据处理

采用 ChinaFLUX 通用数据处理流程对 30 min 通量数据进行数据处理(Yu *et al.* 2006),包括 3 次坐标旋转、WPL 校正、储存项计算及降水剔除、阈值剔除和方差剔除,并根据 Reichstein 等(2005)方法确定夜间摩擦风速、实现夜间数据剔除、完成数据质量控制。

对经过数据质量控制的数据,采用查表法得到完整时间序列的水热通量(Reichstein *et al.* 2005),利用非线性回归方法对碳通量数据进行插补,并将

表 1 研究站点基本信息

Table 1 Basic information of the studied sites

站点	纬度 (°N)	经度 (°E)	海拔 (m)	年均温度 (°C)	年总降水量 (mm)	观测高度 (m)
CBS	42.40	128.09	738	3.6	695	40
HBGC	37.67	101.33	3293	-1.7	570	2
DHS	23.17	112.53	300	21.0	1956	27

CBS: 长白山温带针阔混交林; HBGC: 海北灌丛草甸; DHS: 鼎湖山亚热带常绿阔叶林。

碳通量拆分为总初级生产力(GPP)和生态系统呼吸(RE)。

涡度相关观测系统观测到的碳通量是生态系统的净碳交换(NEE),它与净生态系统生产力(NEP)是数值相等、符号相反的2个变量。NEP为正值时,生态系统从大气吸收CO₂,是大气的碳汇;NEP为负值时,生态系统向大气排放CO₂,是大气的碳源。GPP和RE均为正值,分别反映生态系统从大气吸收和向大气排放的碳量。

1.3 WPL校正

涡度相关观测中,显热通量的方程为:

$$S = \rho C_p \overline{w'T_a'} \quad (1)$$

式中 ρ 为总的空气密度(kg m⁻³), C_p 为空气的比热(J · kg⁻¹ · K⁻¹) w' 为垂直风速的脉动, T_a' 为温度的脉动, $\overline{w'T_a'}$ 为垂直风速(w)与温度(T_a)的协方差,涡度相关观测中通过 $\overline{w'T_a'}$ 计算显热通量(于贵瑞和孙晓敏 2006)。

由于温度的改变影响了水汽密度进而改变了潜热通量,也改变了CO₂密度及其通量,因而需要对潜热通量和CO₂通量进行校正(Webb *et al.*, 1980), WPL校正中,潜热通量的校正方程为:

$$E = (1 + \mu \frac{\rho_v}{\rho_d}) (E_0 + \frac{S}{\rho C_p} \frac{\rho_v}{T_a}) \quad (2)$$

式中 μ 为空气与水汽的摩尔质量比, ρ_v 和 ρ_d 分别为水汽和干空气的密度, S 为显热通量, E_0 为未校正的潜热通量。

CO₂通量的校正方程为:

$$F_c = F_0 + \mu \frac{E}{\rho_d} \frac{\rho_c}{1 + \mu(\rho_v/\rho_d)} + \frac{S}{\rho C_p} \frac{\rho_c}{T_a} \quad (3)$$

式中, S 为显热通量, E 为校正后的潜热通量, F_0 为观测到的CO₂通量, ρ_c 为CO₂的浓度,其他同上。

1.4 加热校正方法

与Amiro等(2010)相同,本研究采用Burba等(2008)提出的方法来分析仪器加热效应对碳水通量的影响,该方法首先对显热通量进行校正,然后通过显热通量的改变,依据WPL校正的方法实现潜热通量和CO₂通量的校正。

显热通量校正方程(Burba *et al.*, 2008; Amiro, 2010):

$$S = \rho C_p \overline{w'T_a'} + S^{\text{bot}} + S^{\text{top}} + 0.15S^{\text{spar}} \quad (4)$$

式中 S 为校正后的显热通量, $\rho C_p \overline{w'T_a'}$ 为观测到的显热通量, S^{bot} 、 S^{top} 和 S^{spar} 为仪器表面的热通量,分别

为Li-7500下表面、上表面和桅杆的热通量。 S^{bot} 的计算方程为:

$$S^{\text{bot}} = \frac{0.0243(T_b - T_a)}{0.004 + 0.004(0.065/u)^{0.5}} \quad (5)$$

S^{top} 的计算方程为:

$$S^{\text{top}} = \frac{0.0243(0.027 + 0.0028(0.045/u)^{0.5} + 0.00025/u)(T_1 - T_a)}{0.0225(0.0028(0.045/u)^{0.5} + 0.00025/u + 0.0045)} \quad (6)$$

S^{spar} 的计算方程为:

$$S^{\text{spar}} = \frac{0.0243(T_p - T_a)}{0.0225 \ln(0.0025 + 0.0058(0.005/u)^{0.5})} / 0.0025 \quad (7)$$

式中 μ 为观测高度的风速, T_a 为观测高度的温度, 0.0243为空气的热力学导度。其他数字参数为常数,与仪器有关。 T_b 、 T_1 和 T_p 分别为下表面、上表面、桅杆的温度,在白天可以用下式计算:

$$T_b = T_a + 2.8 - 0.0681T_a + 0.0021Q - 0.334u$$

$$T_1 = T_a - 0.1 - 0.0044T_a + 0.0011Q - 0.022u \quad (8)$$

$$T_p = T_a + 0.3 - 0.00077T_a + 0.0006Q - 0.044u$$

式中, Q 为白天入射的短波辐射(W · m⁻²),在夜间可用下式计算:

$$T_b = T_a + 0.5 - 0.116T_a + 0.0087L - 0.206u$$

$$T_1 = T_a - 1.7 - 0.016T_a + 0.0051L - 0.029u \quad (9)$$

$$T_p = T_a - 2.1 - 0.02T_a + 0.007L + 0.026u$$

式中 L 为夜间入射的长波辐射。

1.5 数据处理方案

本研究旨在分析加热校正对生态系统碳水通量估算的影响,同时,加热校正对生长季和非生长季有不同的效果(Amiro 2010),因而,设置3个数据处理方案,分别为:

I. ChinaFLUX通用数据处理流程,不进行加热校正。

II. 在ChinaFLUX通用数据处理流程的基础上,全年进行加热校正。

III. 在ChinaFLUX通用数据处理流程的基础上,仅在非生长季进行加热校正,此处理仅在北方2个生态系统中进行。

其中,生长季划分采用Amiro(2010)的方法,即连续5日平均温度大于零度为生长季的起始日期,连续5日平均温度小于零度为生长季的结束日期。

1.6 数据统计

采用Matlab 7.0对碳水通量数据进行分析,具

体包括:

(1) 在日尺度下,对各数据处理方案中湍流量(潜热通量(LE)和显热通量(H)的和, $LE+H$)与可用能量(净辐射(R_n)和土壤热通量(G)的差值, R_n-G)数据进行回归分析,获取加热校正对能量闭合特征的影响。

(2) 对于方案 I 和方案 II,将经过数据质量控制的碳通量数据按白天和夜间分组,然后对两个方案进行成对样本 t 检验和回归分析,获取加热校正对生态系统碳收支不同组分的影响。

(3) 采用 t -test 分析加热校正对碳收支年总量特征的影响。

2 结果与分析

2.1 加热校正对能量闭合程度的影响

能量闭合程度是检验涡度相关技术可靠性的重要指标,由于各年能量闭合特征相似,此处仅分析加热校正对 2003 年 3 个生态系统能量闭合情况的影响(表 2)。从表 2 可以看出,这 3 个生态系统中,能量闭合程度即回归斜率均为 0.8 左右,虽不能完全达到理想状况下斜率为 1 的水平,但也与之前 ChinaFLUX 观测到的能量闭合程度(Li *et al.* 2005; 施婷婷等 2006; Shi *et al.* 2008) 相似,处于全球通量观测能量闭合程度的较高水平。

同时,能量闭合程度在不同数据处理方案间的差异很小,这在年均温度较高的 2 个生态系统(CBS 和 DHS)表现的尤为明显,但在海北灌丛草甸(HBGC)生态系统中,对仪器的加热效应进行校正后,虽然回归斜率有所提高,但两者间的 R^2 降低,其原因尚不清楚。

2.2 加热校正对碳收支及其组分季节动态的影响

涡度相关技术为研究生态系统的碳收支特征提供了坚实的数据基础,因而我们就加热校正对碳收支及其组分季节动态的影响进行分析(图 1),由于各年的动态特征相似,此处仅分析 2003 年不同数据

处理方案下的碳收支动态。

从图 1 可以看出,2 个北方生态系统(CBS 和 HBGC)中,碳收支及其组分均表现出明显的单峰型变化,NEP、RE 和 GPP 在生长旺盛的 6—8 月出现最大值,在寒冷的冬春季节,这 3 个变量均较低。在南方生态系统(DHS)中,RE、GPP 表现出一定的单峰型特征,但 NEP 全年大多数时节均为碳汇,季节规律并没有北方生态系统明显。

加热校正对不同生态系统 NEP 的影响存在差别。在 CBS 加热校正(方案 II 和 III)略微降低了 NEP 的值;在 HBGC,加热校正显著降低了 NEP;而在 DHS 不同数据处理方案间的 NEP 没有显著差异。

北方生态系统中,生长时节不同,不同数据处理方案间 NEP 的差异也不同。在生长旺季(6—8 月)不同数据处理方案间没有明显差别,表明在生长旺季加热校正没有明显改变 NEP 的值。在非生长季,加热校正明显改变了生态系统 NEP,HBGC 表现的尤为明显。

生态系统白天的 NEP 受 GPP 和 RE 的共同影响,夜间 NEP 则受 RE 的制约。为了进一步了解加热校正对生态系统 NEP 不同组分的影响,分别分析白天和夜间不同数据处理方案间 NEP 的关系,对不进行加热校正(方案 I)和全年进行加热校正(方案 II)的 NEP 进行成对样本 t 检验(表 3)。结果表明,北方 2 个生态系统中,加热校正显著改变了白天和夜间的 NEP,但在 DHS,加热校正对白天和夜间的 NEP 均没有任何影响。

可见,单纯通过成对样本 t 检验的方法无法区分加热校正对白天和夜间 NEP 的影响程度,因而,在白天和夜间,对不进行加热校正(方案 I)和进行加热校正(方案 II)的 NEP 进行回归分析(图 2)。结果表明,在 CBS,加热校正并没有明显改变该生态系统的碳收支,无论是白天还是晚上,2 种处理方案间均没有表现出明显的差异,加热校正后的 NEP

表 2 不同数据处理方案下日尺度的能量闭合特征

Table 2 Energy balance closure in daily scale under different data processing programs

系统	ChinaFLUX 通用流程(I)		全年加热校正(II)		冬季加热校正(III)	
	斜率	R^2	斜率	R^2	斜率	R^2
CBS	0.79	0.83	0.81	0.80	0.80	0.83
HBGC	0.85	0.83	0.89	0.61	0.89	0.65
DHS	0.70	0.68	0.71	0.68	-	-

斜率指湍流量(显热和潜热通量, $H+LE$)与可用能量(净辐射与土壤热通量的差值, R_n-G)间的回归斜率, R^2 为回归方程的决定系数。

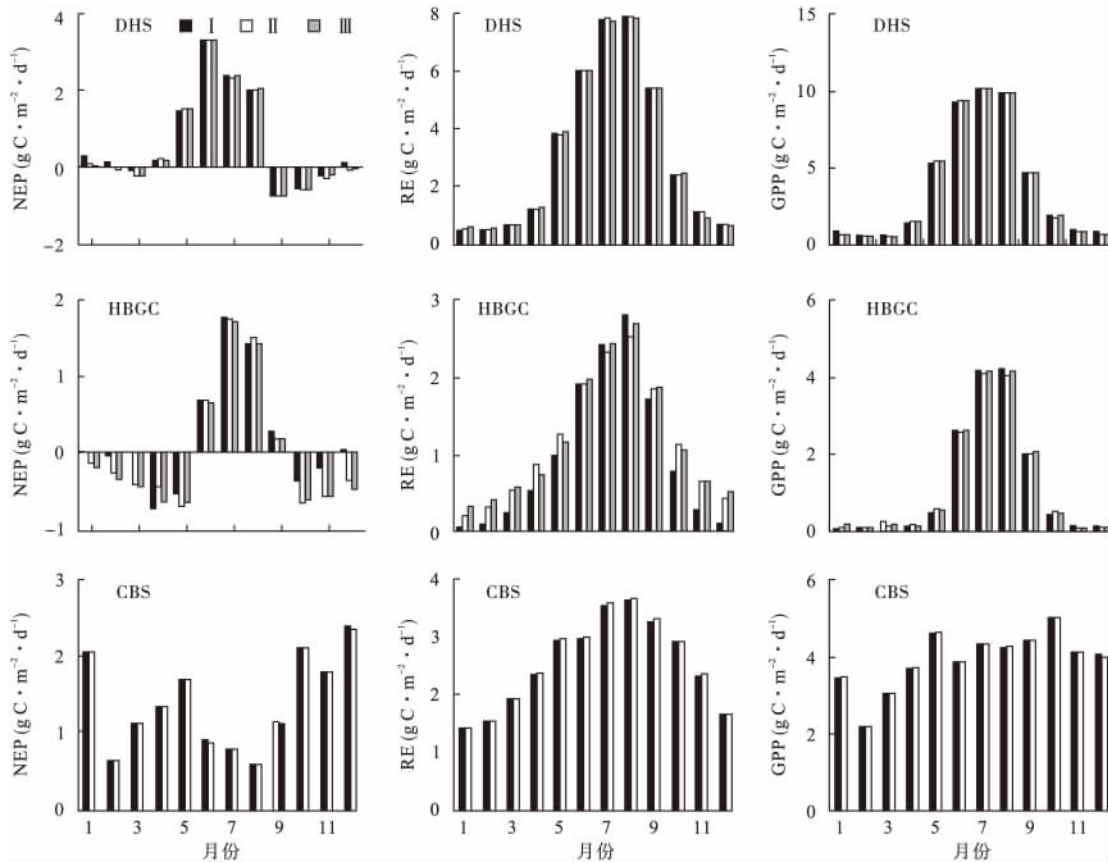


图1 不同数据处理方案下碳收支及其组分的动态特征

Fig.1 Dynamics of carbon budget and its component under different data processing programs

I 为 ChinaFLUX 通用数据流程处理得到的结果, II 为全年加热校正的结果, III 为非生长季加热校正的结果; 数据为月平均值。

表3 不同时段是否进行加热校正对 NEP 影响的成对样本 *t* 检验

Table 3 Paired-sample *t*-test of NEP under heating correction or not in different time

	CBS		HBGC		DHS	
	白天	夜间	白天	夜间	白天	夜间
样本量 <i>n</i>	5851	1418	2695	1391	5919	1666
<i>t</i> 值	43.62	11.99	8.00	39.02	0	0
<i>P</i>	0	0	<0.01	<0.01	>0.40	>0.40

(NEP_{HC}) 与未经过加热校正的 NEP (NEP_{WPL}) 间的回归斜率均为 1, DHS 也有同样的现象发生。在 HBGC 加热校正显著改变了夜间的 NEP, 使得夜间加热校正后的 NEP (NEP_{HC}) 明显小于未经过加热校正的结果, 回归斜率仅为 0.93。

因而, 加热校正显著改变了 HBGC 夜间的 NEP 即 RE, 进而影响 NEP 的估算, 但相比于 HBGC, CBS 和 DHS 加热校正的效果较弱。

2.3 加热校正对碳水通量及其组分年总量的影响

温度相关观测数据在评估生态系统 NEP 年总量上具有重要的作用, 因而我们就不同数据处理方

案的 NEP 及其组分的年总量特征进行分析(表 4)。

从表 4 可以看出, 在北方 2 个生态系统中, 加热校正后 NEP 均明显降低, 降低幅度在处理方案间差异不明显, 但在生态系统间有显著差异, CBS 的降低幅度远小于 HBGC 的降低幅度, 也小于其他研究中 (Amiro 2010; Reverter *et al.* 2010) 加热校正后 NEP 的下降幅度, 而这可能是由温度的差异造成的。

为了证实这一推断, 分析了鼎湖山常绿阔叶林 (DHS) 的 NEP 在加热校正后的变化率。由于 DHS 的年均温度显著高于 CBS 和 HBGC, 因而, 理论上, 加热校正后的 NEP 与通过 ChinFLUX 通用流程计算

表4 加热校正后碳水通量年总量的变化特征(%)

Table 4 Changes of annual sum of carbon and water fluxes under heating correction

数据处理方案	CBS				HBGC				DHS			
	NEP	RE	GPP	ET	NEP	RE	GPP	ET	NEP	RE	GPP	ET
全年加热校正(II)	-7.72	-0.45	-2.07	0.14	-76.61	17.12	-1.67	0.25	0.1	0.2	0.2	-0.3
冬季加热校正(III)	-10.43	-3.19	-4.80	-1.80	-85.23	24.14	2.21	2.25	-	-	-	-

数据为各数据处理方案所获结果相对于 ChinaFLUX 通用流程(方案 I) 所获结果的变化率,即{(各处理方案的结果-方案 I 的结果)/方案 I 的结果-1}×100%, 为 2003—2005 年的平均值。

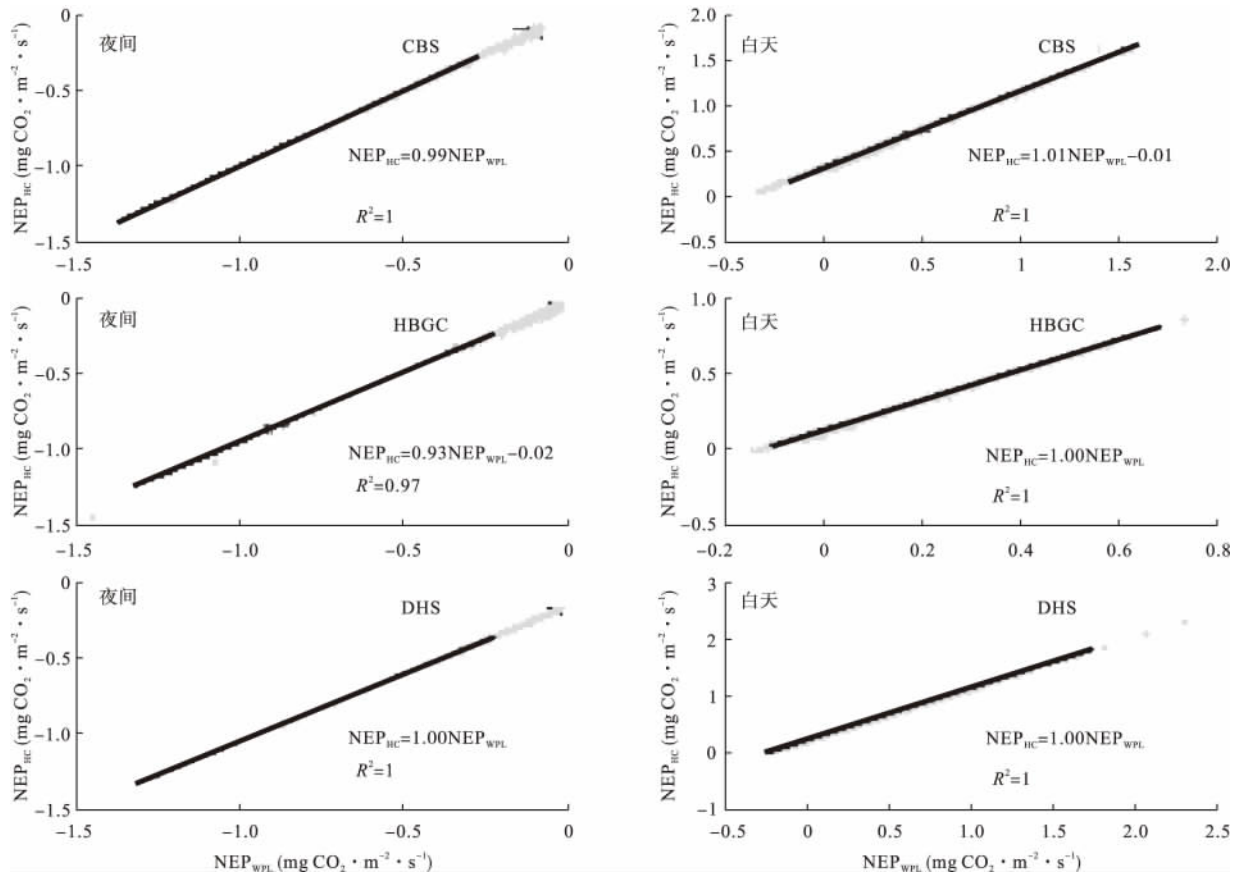


图2 白天和夜间加热校正和未经过加热校正的 NEP 间的关系

Fig. 2 Relationships between NEP with heating correction and that without heating correction in daytime and nighttime

纵坐标为经过加热校正后的 NEP 横坐标为未经过加热校正的 NEP。

出的结果没有显著差异。数据分析结果表明,经过加热校正后,DHS 站 NEP 的变化率仅为 0.1%,证实了加热校正对生态系统 NEP 的影响受温度的限制,在温度低的区域,加热校正效果较明显。

不同生态系统间,加热校正对 NEP 组分(GPP 和 RE)的影响也不相同,在 CBS,加热校正对 GPP 和 RE 的总量均产生影响,但相对于 RE,GPP 的变化更大;在 HBGC,加热校正对 RE 的影响更大。

同时,在不同数据处理方案对 NEP 组分年总量的影响上,全年加热校正(方案 II)和仅在非生长季进行加热校正(方案 III)间没有明显的差异。

水汽通量是通过潜热通量计算而来,不同数据

处理方案间水汽通量(ET)年总量的变化率如表 4 所示。可见,加热校正对水汽通量年总量的影响较小,最大影响也仅为 2%。

因而,在年均温度较低的生态系统中,对生态系统 NEP 及其组分进行估算时,需要充分考虑仪器的加热效应并进行校正;在两种加热校正方案间,全年进行加热校正和仅在非生长季进行加热校正间没有明显差异。但在估算水汽通量时,仪器的加热效应可以忽略。

3 结论

本研究利用 ChinaFLUX 通量观测数据,就加热

校正对生态系统碳水通量及其组分的影响进行了分析。结果表明,加热校正对于准确获取中国北方生态系统的碳收支数据具有重要作用,加热校正通过减小非生长季的NEP使得年NEP降低,年均温度越低,降低幅度越大,加热校正作用越明显,但对水汽通量没有明显影响。

因而,利用OPEC对温度较低的生态系统进行水汽通量估算时,仪器的加热效应可以忽略;对NEP及其组分进行估算,尤其是在低温地区分析生态系统呼吸相关参数(如 Q_{10})时,需要充分考虑仪器的加热效应并进行校正。在2种加热校正方案间,全年进行加热校正和仅在非生长季进行加热校正间没有明显差异。

参考文献

- 施婷婷,关德新,吴家兵,等. 2006. 用涡动相关技术观测长白山阔叶红松林蒸散特征. 北京林业大学学报, **28**(6): 1-8.
- 于贵瑞,孙晓敏. 2006. 陆地生态系统通量观测的原理与方法. 北京: 高等教育出版社.
- Amiro B. 2010. Estimating annual carbon dioxide eddy fluxes using open-path analysers for cold forest sites. *Agricultural and Forest Meteorology*, **150**: 1366-1372.
- Baldocchi DD. 2008. Breathing of the terrestrial biosphere: Lessons learned from a global network of carbon dioxide flux measurement systems. *Australian Journal of Botany*, **56**: 1-26.
- Burba GG, Mcdermitt DK, Grelle A, et al. 2008. Addressing the influence of instrument surface heat exchange on the measurements of CO₂ flux from open-path gas analyzers. *Global Change Biology*, **14**: 1854-1876.
- Goulden ML, Winston GC, Mcmillana MS, et al. 2006. An eddy covariance mesonet to measure the effect of forest age on land-atmosphere exchange. *Global Change Biology*, **12**: 2146-2162.
- Haslwanter A, Hammerle A, Wohlfahrt G. 2009. Open-path vs. closed-path eddy covariance measurements of the net ecosystem carbon dioxide and water vapour exchange: A long-term perspective. *Agricultural and Forest Meteorology*, **149**: 291-302.
- Leuning R, Judd MJ. 1996. The relative merits of open- and closed-path analysers for measurement of eddy fluxes. *Global Change Biology*, **2**: 241-253.
- Leuning R, Moncrieff J. 1990. Eddy-covariance CO₂ flux measurements using open-path and closed-path CO₂ analyzers: Corrections for analyzer water-vapor sensitivity and damping of fluctuations in air sampling tubes. *Boundary-Layer Meteorology*, **53**: 63-76.
- Li Y, Sun X, Zhao X, et al. 2006. Seasonal variations and mechanism for environmental control of NEE of CO₂ concerning the *Potentilla fruticosa* in alpine shrub meadow of Qinghai-Tibet plateau. *Science in China Series D: Earth Sciences*, **49**(Supp. II): 174-185.
- Li Z, Yu G, Wen X, et al. 2005. Energy balance closure at ChinaFLUX sites. *Science in China Series D: Earth Science*, **48**(z1): 51-62.
- Reichstein M, Falge E, Baldocchi D, et al. 2005. On the separation of net ecosystem exchange into assimilation and ecosystem respiration: Review and improved algorithm. *Global Change Biology*, **11**: 1424-1439.
- Reverter BR, Sánchez-Cañete EP, Resco V, et al. 2010. Analyzing the major drivers of NEE in a mediterranean alpine shrubland. *Biogeosciences*, **7**: 2601-2611.
- Shi TT, Guan DX, Wu JB, et al. 2008. Comparison of methods for estimating evapotranspiration rate of dry forest canopy: Eddy covariance, Bowen ratio energy balance, and Penman-Monteith equation. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, **113**: doi: 10.1029/2008JD010174.
- Wang CL, Yu GR, Zhou GY, et al. 2006. CO₂ flux evaluation over the evergreen coniferous and broad-leaved mixed forest in Dinghushan, China. *Science in China Series D: Earth Science*, **49**(Supp. II): 127-138.
- Webb EK, Pearman GL, Leuning R. 1980. Correction of flux measurement for density effects due to heat and water vapor transfer. *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society*, **106**: 85-100.
- Welp LR, Randerson JT, Liu HP. 2007. The sensitivity of carbon fluxes to spring warming and summer drought depends on plant functional type in boreal forest ecosystems. *Agricultural and Forest Meteorology*, **147**: 172-185.
- Yu GR, Fu YL, Sun XM, et al. 2006. Recent progress and future directions of ChinaFLUX. *Science in China Series D: Earth Science*, **49**(Supp. II): 1-23.
- Zhang J, Yu G, Han S, et al. 2006. Seasonal and annual variation of CO₂ flux above a broad-leaved Korean pine mixed forest. *Science in China Series D: Earth Sciences*, **49**(Supp. II): 63-73.

作者简介 朱先进,男,1985年生,博士研究生。主要从事生态系统碳水通量及其相互关系方面的研究。E-mail: xian-jin1985@163.com

责任编辑 魏中青