

涡度相关测定中平均周期参数的确定 及其影响分析*

孙晓敏^① 朱治林^① 许金萍^{①②} 袁国富^① 周艳莲^{①②} 张仁华^①

(^①中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; ^②中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要 应用涡度相关技术估算地-气界面的水、热和 CO₂ 交换量的研究越来越普遍. 为了获得真实可靠的地表通量数据, 在实际应用过程中必须根据每个观测点不同的下垫面条件, 对观测数据进行相应的订正, 并通过对观测数据的分析来确定相关的技术参数. 利用禹城、长白山两个观测站的 10 Hz 原始涡度相关数据, 以不同的平均周期(从 1~720 min)对数据进行了重新计算, 并将重新计算的结果与 30 min 平均周期的通量值进行了比较, 分析选取不同平均周期参数得到的通量值之间的差异. 其中重点分析了在禹城小麦地获取的 15 d 连续观测数据. 结果表明: (i) 在禹城, 当平均周期取值范围在 10~60 min 变化时, 相对 30 min 平均周期的通量值改变小于 2%; 当平均周期作短于 10 min 变化时, 通量的计算结果随平均周期的缩短而明显地降低(最大相对误差为 -12%); 当平均周期作大于 120 min 变化时, 通量的计算结果变得不稳定(最大相对误差为 ±10% 以上). (ii) 禹城小麦地通量的计算表明, 10 min 平均周期对研究通量日变化比较好, 30 min 平均周期比较适合于通量的长期观测研究. (iii) 提出了一种可以确定涡度相关测定中平均周期参数范围的归一化比值方法. 通过对农田和森林不同类型下垫面观测数据的对比分析表明: 高大的森林下垫面比相对矮小的作物下垫面在一定范围内增加平均周期长度时有增加通量值的倾向.

关键词 涡度相关 不同下垫面 平均周期 参数

从 20 世纪 80 年代以来, 科学家推测陆地生物圈和近海大陆架可能存在着未知的碳汇(missing sink); 同时把 CO₂ 浓度的增加视为全球变化中气候变暖的一个重要的原因. 所以 CO₂ 的吸收与排放量

的精确测量与估算, 一直是《联合国气候变化框架公约》、《京都议定书》关注的问题, 成为全球变化研究的焦点问题之一^[1, 2]. 为了更加准确地估算不同生态系统中碳的吸收和排放, 在许多西方国家建立

2004-07-14 收稿, 2004-10-14 收修改稿

* 中国科学院知识创新工程重大项目(编号: KZCX1-SW-01-01A)、国家重点基础研究发展规划项目(编号: G2002CB412501)和中国科学院知识创新工程重大项目(编号: CX10G-E01-04)共同资助

** E-mail: sunxm@igsrr.ac.cn

了 CO₂ 的 通 量 观 测 网^[3-6], 我 国 在 同 期 和 稍 后 也 比 较 系 统 地 开 始 了 这 方 面 的 观 测 研 究 工 作^[7-16]. 涡 度 相 关 技 术 的 快 速 发 展 使 得 该 技 术 越 来 越 广 泛 的 应 用 于 长 期 观 测, 它 在 地 表 通 量 研 究 方 面 起 了 重 要 作 用. 近 年 来, 在 中 国 运 用 涡 度 相 关 技 术 开 展 地-气 界 面 的 水、热 和 CO₂ 交 换 量 的 研 究 有 了 一 个 跨 越 式 的 发 展, ChinaFLUX 通 量 网 络 的 建 立(2002 年)极 大 地 推 动 我 国 在 这 一 研 究 领 域 的 工 作. 为 了 在 不 同 生 态 系 统 中 和 不 同 下 垫 面 条 件 下 获 得 可 靠 的 观 测 数 据, 需 要 解 决 在 具 体 应 用 涡 度 相 关 技 术 时 所 面 临 的 一 些 关 键 问 题.

虽然涡度相关技术被公认为是目前最好的测定地表通量的技术, 但如果使用不当或没有进行各种必要的校正, 通量计算所产生的误差和不确定性依然很大. Kell Wilson 等^[17] 通过分析 FLUXNET 的 22 个站的观测数据发现, 能量的不闭合现象是普遍存在的, 包含了所有植被类型和气候类型(地中海气候带, 温带气候带和极地气候带), 平均不闭合率达到 20%. Massman 等^[18] 分析了涡度相关的不确定性并且指出了主要的误差源. 主要包括: (i) 仪器本身的相关参数(如仪器的响应时间常数)和仪器的野外安装问题^[19, 20], (ii) 采样问题(频率和平均周期)^[21, 22], (iii) 风速和其他物理量的功率谱、协谱特性, 高频和低频衰减^[23], (iv) 密度变化对 CO₂ 通量计算^[24] 的影响, (v) 平流的订正^[25, 26] 和坐标系统转换^[27, 28], (vi) 夜间通量和重力波影响等方面的问题^[19]. 以本文涉及的计算平均周期问题为例, 最近(2003 年), Finnigan 分析了一些在森林观测的数据并得出一个新的结论, 认为在森林进行观测时, 通量计算的平均周期应该比现在通常采用的时间(例如 30 min)长一些(如 2~4 h), 这样可以减少由于丢失低频造成的影响^[27]. 那么在均匀和非均匀下垫面, 比如在小麦农田和不同类型的森林条件下运用涡度相关技术时, 平均周期参数的确定及其影响将会怎样呢? 在本文中, 我们将主要分析由于选取不同的平均周期对通量计算结果的影响, 分析和确定在特定条件下合适的通量计算的平均周期阈值.

1 理论和方法

1.1 涡度相关计算的理论方法

对于具有某种属性的物理量 s , 它的垂直通量

F 可以表示为

$$F = \rho_a \overline{w's'}, \quad (1)$$

其中 ρ_a 是空气密度, w 是垂直风速, 上撇号表示实际值与某段时间内的平均值之差, 即物理量的瞬时脉动值; 上横线表示该时间段内物理量的平均. 对于给定的某一段时间间隔 T , F 等于 s 和 w 之间的协方差在 T 时间段内的时间积分.

$$F = \rho_a \frac{1}{T} \int_0^T (w'_i(t)s'_i(t))dt, \quad (2)$$

在实际应用中, 由于观测数据受观测技术和采样频率的制约, 获取的只能是离散数据, 所以(2)式可以表达为

$$F = \rho_a \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (w'_i(t)s'_i(t)), \quad (3)$$

这里, N 是样本数, 等于采样频率(f)和平均周期(T)的乘积, 即 $N=T \times f$.

在实际应用中, f 和 T 通常采用的取值范围分别是 5~20 Hz 和 10~40 min. 理论上, 采样频率越高, 平均时间越长, 其结果越靠近真值. 然而, 采样频率越高, 越需要更快速响应的感应器、更大容量的数据存储器和更高的研究成本和高新技术的支撑. 一方面, 如果平均周期太长, 则地表通量所包含的一些细节的变化过程可能会被遗漏; 另一方面, 由于在平均值中包含有长时间的非定常性或倾向, 而这种倾向对通量的计算将产生影响. 因此在确定平均周期时, 一方面要求平均周期应足够的短, 以保证有稳定的时间系列不受任何倾向的影响; 同时又要求平均周期应足够地长, 以包含湍流谱中最慢的涨落. 这就是本文要讨论的问题, 也是目前国际相关研究领域所关注的科学问题.

为了估算不同平均周期可能对通量总量的影响, 我们采用了二种统计平均方法. 分别是“分时段平均(block time average)”和“全时段平均(ensemble block time average)”^[27] 进行不同平均周期对通量总量的对比研究.

最简单的和最广泛地使用的平均方法是“分时段平均”, 其基本公式为:

$$\overline{s(t)} = \int_0^T (s(t))dt, \quad (4)$$

式中, 物理量 s 在时间间隔 T 内的平均计算应服从雷诺平均规则(the Reynolds rules of averaging),

$$s(t) = \bar{s} + s'(t), \quad (5)$$

$$w(t) = \bar{w} + w'(t), \quad (6)$$

$$\overline{w(t)s(t)} = \bar{w}\bar{s} + \overline{w's'}, \quad (7)$$

在此计算中, 应注意两个物理量的乘积平均包含有趋势项即缓变的低频分量问题.

“全时段平均”是由若干个平均长度为 T 的数据形成的更长时间的算术平均值. 我们将使用符号“ $\langle \rangle$ ”指示全时段平均. 对于(4)~(6)式, N 个 T 时段平均值的的全时段平均为

$$\langle \bar{s} \rangle = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \bar{s}_n, \quad (8)$$

$$s_n \langle t \rangle = \langle \bar{s} \rangle + \bar{s}'_n + s'(t), \quad (9)$$

$$\langle \overline{w(t)s(t)} \rangle = \langle \overline{ws} \rangle = \langle \bar{w} \rangle \langle \bar{s} \rangle + \langle \overline{w's'} \rangle + \langle \overline{w's'} \rangle, \quad (10)$$

这里, 方程的左边表示的是 N 个 T 时段的协方差的算术平均, 而 $\langle \overline{w's'} \rangle + \langle \overline{w's'} \rangle$ 的值等于 N 个 T 时段计算的涡度相关通量的分时段平均, 它在数值上等于用 $N \times T$ 时段的所有值一起计算得到的一个平均的协方差. 公式(9)描述了 2 种平均方法之间的关系, 它表明, 如果垂直速度在某一时段的平均值不等于零时, 一个较长时段直接计算的涡度相关值(例如 30 min)不等于用 N (如, $N=6$)个较短时段(如, $T=5$ min)的涡度相关值的算术平均值.

1.2 平均周期确定的理论方法

基于涡度相关技术测定植被/大气间 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 通量, ChinaFLUX 需要考虑生态学和微气象学的相关原则来确定适宜的数据平均周期: (i) 可以分辨 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 通量日变化特征; (ii) 可以分辨短周期的零星事件的影响; (iii) 可以捕捉大部分低频通量成分. Kaimal 和 Finnigan(1994)提出了估计平均周期的简单方法^[28],

$$T = \frac{2\sigma_\alpha^2\tau_\alpha}{\bar{\alpha}^2\varepsilon^2}, \quad (11)$$

式中 σ_α 为所研究时间序列 α 的总体方差, τ 为积分时间尺度, ε 为容许误差 ($\varepsilon = \sigma_\alpha / \bar{\alpha}$). 对于水平风速

的典型日间条件 ($\sigma_u = 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $\tau_u = 10 \text{ s}$, $\bar{u} = 5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) 并且指定 $\sigma_u = 0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (也就是 $\varepsilon = 0.02$), 因此我们可以获得平均水平风的合理的平均周期 ($T = 2000 \text{ s} \approx 30 \text{ min}$). 对于 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 通量计算来说, 30 min 的平均周期是个合理折衷^[27]. 然而, 目前我们并没有理解对通量有影响的所有低频成分的来源, 因此我们需要评价低频成分对 ChinaFLUX 通量结果的影响^[27,29].

为了检验不同平均周期对通量计算结果的影响, 所选的平均周期分别是 1, 2, 5, 10, 15, 20, 30, 60, 120, 180, 240 和 720 min. 虽然在实际的通量计算过程中 1, 2, 5, 720 min 没有实际的意义, 但却有助于对问题的理解. 目前国际上通常采用的是 10 Hz 采样频率和 30 min 平均周期的处理模式. 本文假设这一模式为与不同的平均周期计算结果比对的“标准”, 通过不同平均周期与“标准平均周期”的通量对比, 可以了解不同平均周期对通量计算结果的影响.

2 站点位置, 仪器和材料

在本文中, 我们使用的数据全部来自 ChinaFLUX 通量网络的两个不同下垫面的观测站, 分别是: (i) 禹城综合实验站 ($36^\circ 50' \text{N}$, $116^\circ 34' \text{E}$, 海拔 28 m), 试验场地地势平坦, 四周也比较开阔, 基本属于均匀下垫面. 所选取的观测数据为小麦生长旺季晴天的数据. (ii) 长白山站 1 号样地 ($41^\circ 24' 09'' \text{N}$, $128^\circ 05' 45'' \text{E}$, 海拔 761 m), 下垫面主要是阔叶红松林, 林地坡降不超过 4%. 受季风影响的温带大陆山地气候, 年均降水量 632.8~782.4 mm.

两个试验站观测仪器和数据由 ChinaFLUX 通量网络统一规定, 全部采用 10 Hz 原始数据, 观测仪器包括超声风速仪 (CSAT3, Campbell Co, 美国) 观测的三维脉动风速和脉动温度, 用开路式 $\text{H}_2\text{O}/\text{CO}_2$ 红外分析仪 (LI-7500, LI-COR Co, 美国) 测定的水汽和 CO_2 脉动浓度. 涡度相关观测系统的安装高度在禹城为 2 m, 在长白山为 41 m. 除此之外, 我们还进行了一些辅助性观测. 包括不同高度上的空气温度、湿度 (HMP45C, VAISALA Co, 芬兰) 和风速 (A100R, Vector Ins, 英国); 5 个不同深度的土壤和地表温度 (TCAV, CS-107, Campbell Co, 美国); 3 个不同深度

的土壤湿度(TDR, CS615-L, Campbell Co, 美国)的观测, 净辐射(CNR1, KIPP 和 ZONEN, 荷兰)是由 2 个长波和 2 个短波辐射表计算得到的; 2 个土壤热通量板(HFP01SC, Hukseflux, 荷兰)埋设在地下 2 cm 左右的土壤中。

3 结果和讨论

3.1 不同平均周期对通量计算的影响

理论上, 涡度相关技术要求在平均周期内的平均垂直速度应该等于零. 然而, 在实际中的大多数情况下, 在某一给定的时段内, 由于各种原因使得平均垂直速度并不等于零. 根据公式(10)我们可以看出, 利用多个短平均周期计算协方差的算术平均值与直接利用一个较长平均周期(总时间与前面的相等)计算的协方差是不相等的, 平均周期的选择将会影响通量的最终结果. 在目前大多数的微气象中观测研究中, 平均周期的典型值确定为 15~30 min^[30]. 这里, 我们感兴趣的是, 如果平均周期取的非常短(例如, 1 min)和非常长的(例如, 2~6 h), 其结果将会发生什么变化?

图 1 是在禹城利用不同平均周期计算的 CO₂ 和潜热通量的日变化过程, 所有的平均周期都小于或等于 30 min. 所有平均周期小于 30 min 的通量都利

用算术平均方法核算为 30 min 的平均值. 从图中可以明显看出, 当平均周期取的比较短时, 通量的绝对值就变得比较小. 利用不同平均周期计算通量的差别在正午前后比较大, 而在早晨或傍晚计算通量的差别比较小.

表 1 给出了在禹城得到的以不同平均周期计算通量的回归方程和统计值. 与 1×30 min 的通量相比较, 平均周期愈小, 计算的通量值越小, 产生的相对误差和标准差越大. 从表 1 看到 3×10 min 的通量和 1×30 min 通量之间的差别大约只有 1%; 但 30×1 min 的通量和 1×30 min 通量之间的差别大约有 -12%. 因此, 当平均周期等于 10 min 时, 在禹城小麦农田仍然是适用的. 换句话说, 当平均周期从 10 min 变到 30 min 时, 它们之间几乎没有什么差别, 差别大约只有 1%.

图 2 给出了禹城 4 d 不同平均周期 (从 1~720 min) 白天平均的 F_c 和 $(H+LE)$ 随平均周期的变化曲线. 当平均周期从 1~30 min 变化时, 通量强度(绝对值)有明显的从小变大的趋向, 然后保持相对平稳的时段 (30~120 min), 时间再变长时, 这时的通量数据就变得不稳定. 因此, 超过 120 min 的平均周期对禹城农田小麦的通量计算可能是不适当的.

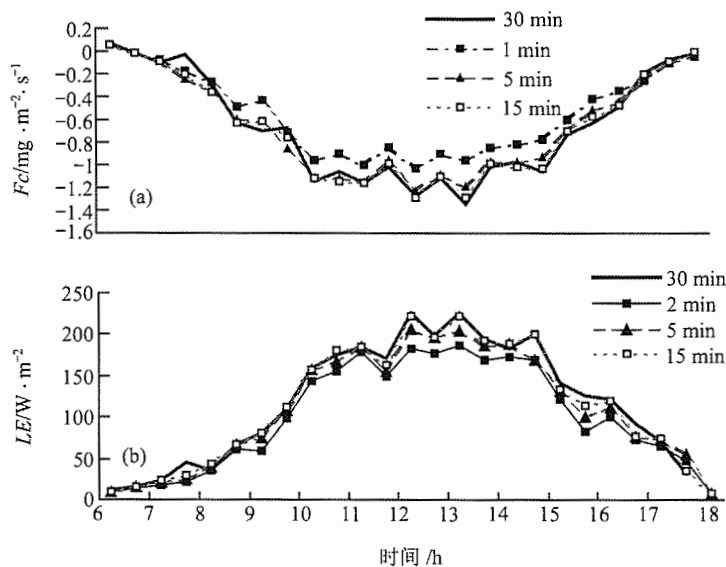


图 1 以不同平均周期重新计算的 CO₂ 通量(a)和潜热通量(b)的日变化(禹城, 2003 年 5 月 4 日)

表 1 以不同平均周期计算通量与 30 min 平均周期计算通量之间的统计关系(禹城, 2003 年 5 月)

通量	平均周期/min	回归方程	R^2	平均值	相对误差%	Std
$F_c/\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	2×15	$y=0.9921x-0.0041$	0.9937	-0.762	-0.31	0.040
	3×10	$y=0.9814x-0.0133$	0.9917	-0.763	-0.18	0.047
	6×5	$y=0.9648x-0.0126$	0.9911	-0.749	-1.93	0.050
	10×3	$y=0.9451x-0.0104$	0.9874	-0.732	-4.18	0.061
	15×2	$y=0.929x-0.0066$	0.9858	-0.716	-6.29	0.068
	30×1	$y=0.878x-0.005$	0.9757	-0.678	-11.31	0.094
$LE/W \cdot \text{m}^{-2}$	2×15	$y=1.0035x-1.7588$	0.9963	129.7	-0.99	4.8
	3×10	$y=0.9891x+0.1534$	0.9963	129.7	-0.98	4.8
	6×5	$y=0.9742x-0.697$	0.9922	126.9	-3.13	7.1
	10×3	$y=0.9533x-1.0254$	0.9859	123.8	-5.47	9.8
	15×2	$y=0.9371x-1.7161$	0.9837	121.0	-7.64	10.8
	30×1	$y=0.8816x-1.1856$	0.9666	114.5	-12.58	16.0
$H/W \cdot \text{m}^{-2}$	2×15	$y=0.9963x-0.1199$	0.9969	48.9	-0.66	2.9
	3×10	$y=0.9883x+0.0629$	0.9944	48.7	-1.09	3.8
	6×5	$y=0.9736x-0.1469$	0.9942	47.7	-3.00	4.1
	10×3	$y=0.9429x+0.0495$	0.9917	46.4	-5.69	5.3
	15×2	$y=0.9255x-0.1003$	0.9893	45.4	-7.75	6.2
	30×1	$y=0.8661x+0.0832$	0.9827	42.6	-13.41	9.1

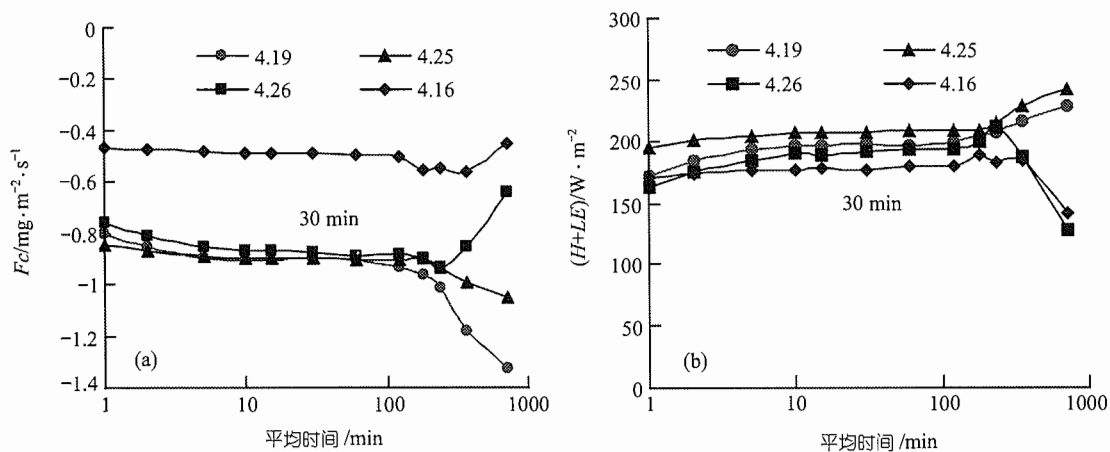


图 2 4 个白天平均的 F_c (a)和 $(H+LE)$ (b)随平均周期的变化(禹城, 2003 年 5 月)

3.2 确定平均周期参数范围的归一化比值方法

为了确定不同下垫面条件下涡度相关测定中平均周期参数范围, 本文提出了一种简单的归一化比值方法, 即将选择的每一个不同的平均周期值计算的通量值分别比上“标准”平均周期值计算的通量值. 通过归一化比值方法可以确定不同生态下垫面动态变化情景下的平均周期参数范围. 图 3 给出了禹城和长白山两种不同下垫面中不同平均周期计算的通量

与 30 min 的通量的比值. 通过图 3 可以十分清楚地了解不同下垫面和取不同平均周期值对通量计算的影响和差异, 说明归一化比值方法是一种十分有效的方法, 比公式(11)更直观, 更容易理解.

禹城和长白山, 两个观测地点的自然地理条件完全不同. 长白山观测点主要林分为阔叶红松林, 林地坡降不超过 4%. 主乔木为红松、椴树、蒙古栎、水曲柳、色木等. 林分为复层异龄结构, 上层乔木平均株高约 26 m, 密度约 560 株 hm^{-2} , 下层灌木覆盖

度为 0.4, 以毛榛子、忍冬、山梅花和溲疏为主. 草本覆盖度高达 0.7, 以山茄子宽叶苔草和木贼等为主, 仪器的架设高度在 41 m. 图 3 清楚的区分了农田与森林两种不同下垫面中通量随不同平均周期值变化情况, 同时也表明森林下垫面中通量的低频组分占有明显的比重, 所以必须更加关注森林下垫面中通量的低频衰减和丢失问题. 相对 30 min 平均周期的通量值, 当平均周期取值范围在 10~60 min 区间内变化时, 长白山的通量计算结果的改变小于 $\pm 8\%$; 当平均周期短于 10 min 变化时: 通量的计算结果出现明显变低的趋向, 当用 1 min 作为平均周期计算的通量时, 长白山的通量计算结果减少 52%, 与禹城的情况形成了非常强烈的对比. 另外, 从观测数据的各种谱的分析^[14], 也可以对本文的主题进行讨论.

在图 2 和图 3 中, 值得注意的是不同下垫面当平均周期参数在大于 180 min 取值时, 无论是直接计算的通量值, 还是通量的归一化比值都发生了不同程度的变异, 这种变异目前作者尚不能解释原因. 可能的原因是与每日的大气层结和天气状况有关, 由于太长的平均周期可能会导致近地表层非定常条件的偏离, 在这种情况下通量的计算将失去意义.

4 结论

根据两种不同下垫面条件下涡度相关方法观测的 10 Hz 原始数据, 分析了改变平均周期对通量结果

的影响. 结果表明: (i) 由于在某一特定时段内的垂直速度不等于零, 或者在一定时段内存在垂直风速和物理量总体的趋势变化(低频变化), 因此取不同平均周期将会得到不同的涡度相关通量值, 特别是在地形地势复杂的地表进行的通量观测结果更是如此^[12]. (ii) 综合实际野外观测过程中各方面条件的制约, 在禹城开展长期的观测研究, 平均周期取 30 min 是比较合适的, 但如果要研究一些更细微的变化, 10 min 的平均周期可以获得更多的信息; 在长白山作为长期的观测研究, 平均周期取 30~60 min 是比较合适的. 太长的平均周期(例如超过 2h)对上述地区的通量计算是不适当的, 当平均周期大于 120 min 时, 通量的计算结果变得不稳定(最大相对误差为 $\pm 20\%$ 以上). (iii) 通过对农田和森林不同类型下垫面观测数据的对比分析, 表明高大的森林下垫面比相对矮小的作物下垫面增加平均周期长度时有增加通量值的倾向. 与 Finnigan^[27] 利用一些森林观测数据分析得出的结论“平均周期应该比现在通常采用的时间(例如 30 min)长一些, 如 2~4 h”有基本相同的结论, 说明下垫面的不同属性对涡度相关技术中平均周期参数的确定有重要的影响, 是一个必须加强研究的问题.

本文只是对禹城、长白山两个试验站的观测数据进行了初步分析, 取得了初步的结论. 对于其他台站的数据, 特别是那些下垫面比较复杂的森林观测点, 非常有必要进行类似的比较研究. 实际上涡

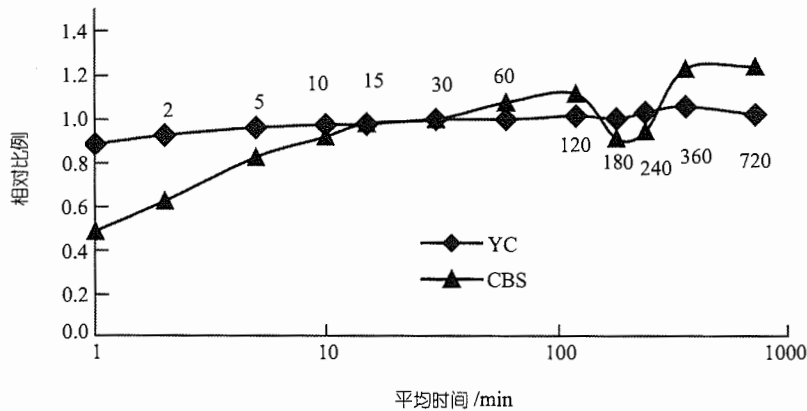


图3 禹城(YC,2003年5月),长白山(CBS,2003年8月)不同平均周期计算的感热与潜热通量之和($H+LE$)与30 min的结果的归一化相对比例

度相关通量技术同时受到地表粗糙度, 大气稳定性和地表风速的共同作用和影响, 这些因素也是构成下垫面影响的主要因子. 本文所讨论的问题是一个十分复杂的问题, 需要投入力量从理论分析的高度来认识和解决问题. 所以, 不同平均周期对计算涡度相关通量结果的影响必须引起重视, 有关复杂下垫面条件下的通量计算是今后研究的重点.

参 考 文 献

- 1 Schulze E D, Wirth C, Heimann M. Managing forests after Kyoto. *Science*, 2000, 289: 2058-2059
- 2 Takashi H, Ryuichi H, Yasumi F, et al. CO₂ and water vapor exchange of a larch forest in north Japan. *Tellus*, 2003, 55B: 244-257
- 3 Blanken P D, Black T A, Yang P C, et al. Energy balance and canopy conductance of a boreal aspen forest: partitioning overstory and understory components. *J Geophysical Research*, 1997, 102: 28915-28927
- 4 Eva F, Dennis B, Richard O, et al. Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 107: 43-69
- 5 Lee X, Fuentes J D, Staebler R M, et al. Long-term observations of the atmospheric exchange of CO₂ with a temperate deciduous forest in southern Ontario, Canada. *J Geophysical Res*, 1999, 104: 15975-15984
- 6 Paul B, Jean-Marc B A, Patricia M. CO₂ and water vapour fluxes for 2 years above Euroflux forest site. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 108: 183-197
- 7 王树森, 朱治林, 孙晓敏, 等. 拉萨地区农田能量物质交换特征. *中国科学, D 辑*, 1996, 26(4): 359-364
- 8 Zhu Z L, Sun X M, Zhang R H. Statistical Analysis and Comparative Study of Energy Balance Components Estimated Using Micrometeorological Techniques during HUBEX/IOP 1998/99. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2003, 20(2): 285-291
- 9 Wen X F, Yu G R, Sun X M, et al. Net water vapour exchange over a mixed needle and broad-leaved forest in Changbai Mountain during autumn. *Journal of Geographical Sciences*, 2003, 13(4): 463-468
- 10 张仁华, 孙晓敏, 朱治林, 等. 遥感区域地表植被二氧化碳通量的机理及其应用. *中国科学, D 辑*, 2000, 30(2): 215-225
- 11 陈发祖, 孙晓敏, 汪西林, 等. 高地下水埋条件下的水热平衡试验研究. *地理研究*, 1994, 13(1): 32-42
- 12 朱治林, 孙晓敏, 许金萍, 等. 非平坦下垫面涡度相关通量的校正方法及其在 ChinaFLUX 中的应用. *中国科学, D 辑*, 2004, 34(增刊 II): 37-45
- 13 于贵瑞, 张雷明, 孙晓敏, 等. 亚洲区域陆地生态系统碳通量的观测研究进展. *中国科学, D 辑*, 2004, 34(增刊 II): 15-29
- 14 温学发, 于贵瑞, 孙晓敏, 等. 复杂地形条件下森林植被湍流通量测定的技术分析. *中国科学, D 辑*, 2004, 34(增刊 II): 57-66
- 15 张军辉, 韩士杰, 孙晓敏, 等. 冬季强风条件下森林冠层/大气界面开路涡度相关 CO₂ 净交换通量的 UU-修正. *中国科学, D 辑*, 2004, 34(增刊 II): 77-83
- 16 于贵瑞, 温学发, 李庆康, 等. 中国亚热带和温带典型森林生态系统呼吸的季节模式及环境响应特征. *中国科学, D 辑*, 2004, 34(增刊 II): 84-94
- 17 Kell W, Allen G, Falge E, et al. Energy balance closure at FLUXNET sites. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 113: 223-243
- 18 Massman W J, Lee X. Eddy covariance corrections and uncertainties in long-term studies of carbon and energy exchanges. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 113: 121-144
- 19 Massman W J. A simple method for estimating frequency response corrections for eddy covariance systems. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, 104: 185-198
- 20 Kristensen L, Mann J, Oncley S P, et al. How close is close enough when measuring scalar fluxes with displaced sensors? *J of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1997, 14: 814-821
- 21 Moore C J. Frequency response corrections for eddy correlation systems. *Boundary-Layer Meteorology*, 1986, 37: 17-35
- 22 Bosveld F C, Beljaars A C M. The impact of sampling rate on eddy-covariance flux estimates. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 109: 39-45
- 23 Lenschow D H, Raupach M R. The attenuation of fluctuations in scalar concentration through sampling tubes. *J Geophysical Res*, 1991, 96: 15259-15268
- 24 Webb E K, Pearman G I, Leuning R. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer. *J R Met Soc*, 1980, 106: 85-100
- 25 Lee X. On micrometeorological observations of surface-air exchange over tall vegetation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1998, 91: 39-49
- 26 Schmid H P. Footprint modeling for vegetation atmosphere exchange studies: a review and perspective. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 113: 159-183
- 27 Finnigan J J, Clement R, Malhi Y, et al. A re-evaluation of long-term flux measurement techniques, Part I: Averaging and coordinate rotation. *Boundary-Layer Meteorology*, 2003, 107: 1-48
- 28 Kaimal J C, Finnigan J J. *Atmospheric Boundary Layer Flows: Their Structure and Measurement (VII)*. New York: Oxford University Press, 1994. 255-261
- 29 Sakai R K, Fitzjarrald D R, Moore K E. Importance of low-frequency contribution to eddy fluxes observed over rough surfaces. *J of Applied Meteorology*, 2001, 40: 2178-2192.
- 30 James M W, Steven P O, Steven A S. Sonic anemometer tilt correction algorithms. *Boundary-Layer Meteorology*, 2001, 99: 127-150