

开路与闭路涡度相关系统通量观测比较研究*

宋霞^{①②} 于贵瑞^{①**} 刘允芬^① 任传友^{①②} 温学发^{①②}

(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 开路(OPEC)与闭路(CPEC)两种观测系统是涡度相关技术观测通量的主要技术手段, 用这两种观测系统进行通量观测时, 由于系统本身的差异有可能导致观测结果的不同, 因此在通量观测中对两种观测系统的观测进行比较分析是非常必要的. ChinaFLUX 通量观测网络在长白山(CBS)和千烟洲(QYZ)两个试验站同时安装了 OPEC 和 CPEC 两种通量观测系统. 本文计算了 CPEC 红外气体分析仪的 CO₂ 和水汽观测相对于 OPEC 观测结果的延迟时间; 比较分析了 OPEC 和 CPEC 实时观测数据的功率谱和协谱; 以 OPEC 观测系统的观测结果为标准评价了 CPEC 观测系统的通量结果. 结果表明: QYZ 和 CBS 两个试验站 CPEC 红外气体分析仪观测的 CO₂ 和 H₂O 两种气体的延迟时间分别在 7.0~8.0s、8.0~9.0s 之间; OPEC 和 CPEC 两种观测系统观测项目的功率谱与 -2/3 斜线一致, 而协谱则符合 -4/3 定律. QYZ 试验站的 CPEC 观测系统的 CO₂ 通量为 OPEC 的 84%, 而两种观测系统的潜热通量基本一致, CBS 的 CPEC 系统的 CO₂ 通量、潜热通量分别为开路系统的 80%、86%; CPEC 观测系统抽气管道的衰减作用对碳通量的影响大于对水汽通量的影响, QYZ 试验站的 OPEC 与 CPEC 两套系统的通量差异小于 CBS; 两种观测系统的 CO₂ 通量日变化趋势非常一致.

关键词 涡度相关技术 开路涡度相关系统 闭路涡度相关系统 延迟时间 谱分析 通量

20 世纪 70 年代早期, 涡度相关技术被首次应用于生态系统与大气间 CO₂ 气体通量观测研究^[1,2], 观测仪器主要是螺旋桨式风速仪和电容式探测器改造的闭路红外气体分析仪, 研究对象主要为农田. 当时观测仪器存在很大的局限性, 传感器的响应速度非常慢, 响应速度大约为一秒钟 2 次. 随着快速响应超声风速仪和红外气体分析仪的出现, 涡度相关技术

得到了历史性的突破^[3-6], 开路和闭路红外气体分析仪对 CO₂ 气体的响应速度达到一秒钟十次, 因此由超声风速仪与开路或闭路红外气体分析仪组成的开放式涡度相关系统(OPEC)或闭路式涡度相关系统(CPEC)逐渐成为通量观测的主要技术手段. 随着科学技术的发展, OPEC 与 CPEC 两种涡度相关观测系统逐步完善, 但是它们在实际应用中各有优缺点, 主

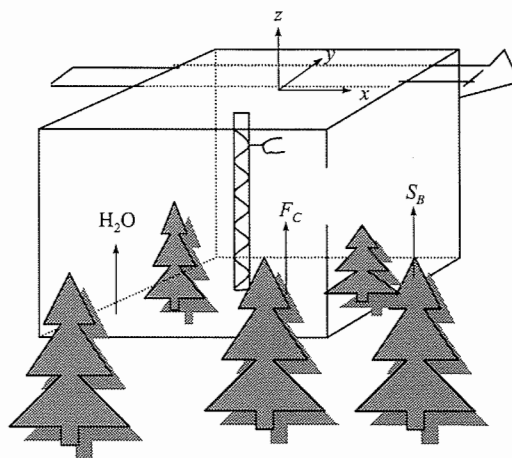
2004-07-14 收稿, 2004-10-14 收修改稿

* 中国科学院知识创新工程重大项目(编号: KZCX1-SW-01-01A)和国家重点基础研究发展规划项目(编号: 2002CB412501)共同资助

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

用 OPEC 与 CPEC 两种观测系统进行通量观测时, 由于系统本身的差异可能导致通量观测结果的不同, 对两种观测系统的观测进行比较分析是非常必要的^[7~12]。早期的 OPEC 与 CPEC 比较研究主要存在以下问题^[8~12]: OPEC 与 CPEC 两种观测系统的观测仪器来自不同生产厂家, 这样往往导致较大的系统误差。ChinaFLUX 通量观测网络分别在长白山(CBS)和千烟洲(QYZ)两个试验站同时安装了 OPEC 与 CPEC 两种通量观测系统, 与以往的观测研究不同的是, 两种观测系统均采用了同种型号的观测仪器, 仪器设备完全产自同一厂家, 而且两套系统的观测项目完全一致, 克服了早期研究所存在的问题。通过两个站点 OPEC 与 CPEC 两种观测系统的长期观测对比研究可以为中国不同森林生态系统的通量观测提供适宜的观测手段, 两种涡度相关系统并行观测也可以相互弥补数据缺失问题。本文的主要目的是: (i) 确定两个试验站的 CPEC 相对于 OPEC 的延迟时间, (ii) 通过实时观测数据的谱分析比较 OPEC 与 CPEC 两种观测系统的性能, 评价两种观测系统的观测数据质量及观测结果的可靠性, (iii) 通过半小时平均通量结果的比较, 分析对比两种观测系统的观测结果的差异。

快速 CO_2 、水汽分析仪问世后, 涡度相关技术逐渐成为通量观测的标准方法^[13]. 物质能量守恒方程是涡度相关技术的理论基础^[13,14], 如图 1 所示, 在单位体积空间内 CO_2 气体的浓度变化率等于 CO_2 气体在垂直方向(z)的通量、水平纬向方向(x)和水平经向方向(y)的水平通量、以及生物与土壤对 CO_2 气体吸收/排放量 S_R 的总和, 计算公式如下,


$$\frac{dc}{dt} = - \left(\frac{\partial F_z}{\partial z} + \frac{\partial F_x}{\partial x} + \frac{\partial F_y}{\partial y} + S_B(x, y, z) \right), \quad (1)$$
$$\frac{\partial F_Z}{\partial z} = -S_B(z), \quad (2)$$

SCIENCE IN CHINA Ser. D Earth Sciences

$$F_c(h) = F_c(0) - \int_0^h S_B(Z) dz, \quad (3)$$

根据物质守恒定律和雷诺平均法则^[15], CO_2 气体的平均垂直通量密度可以用垂直风速(w)和 CO_2 摩尔质量比(c)的平均协方差来计算

$$F_c = \overline{\rho_a w c} \equiv \overline{\rho_a w' c'}, \quad (4)$$

方程(4)中, 横线表示某段时间的平均, 撇号代表偏离平均的脉动(比如, $c' = c - \bar{c}$). 通量值符号为正表示植被向大气中排放 CO_2 气体, 反之则表示从大气中吸收 CO_2 气体.

1.2 观测通量的水热校正

实际应用红外分析仪观测的 CO_2 气体浓度为质量密度(ρ_c , 即单位体积气体所含的 CO_2 气体的质量), 而不是摩尔质量比. 因此, 如果大气的水热条件发生了变化则会引起单位体积内 CO_2 的质量密度的变化, 即大气温度、压力、湿度发生变化均会引起大气中 CO_2 的质量密度变化. 用涡度相关技术观测大气植被间 CO_2 气体的通量密度可用下式表示:

$$F_c = \overline{w \rho_c} = \overline{w' \rho_c'} + \overline{w \rho_c}, \quad (5)$$

方程(5)右边项应为平均垂直风速和 CO_2 密度的乘积, 而由于 CO_2 密度脉动所引起气流的垂直运动数量级非常小($< 1 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$), 很难被风速计观测到, 可忽略此项^[16], 但是根据温度和湿度的脉动用 Webb-Pearman-Leuning 算法可以计算出此项,

$$F_c = \overline{w' \rho_c'} + \frac{m_a}{m_v} \frac{\overline{\rho_c}}{\overline{\rho_a}} \overline{w' \rho_v'} + \left(1 + \frac{\overline{\rho_v m_a}}{\overline{\rho_a m_v}} \right) \frac{\overline{\rho_c}}{\overline{T}} \overline{w' T'}, \quad (6)$$

其中 m_a 为空气摩尔质量, m_v 为水汽的摩尔质量. 方程(6)忽略了压力因素所引起的密度脉动, 而在风速大^[17]和发生平流作用^[14]时, 压力具有比较显著的影响作用. 在开路和闭路两种不同的观测系统中, 方程(6)中各项的数量大小也会发生变化, 用闭路系统观测时, 气体经过吸气管道后, 温度脉动会发生衰减, 最后减小为零, 因此方程(6)右边的最后一项可以忽略不计^[7,11].

1.3 平稳时间序列的谱分析

谱分析方法就其结果而言, 乃是从时间域上来研究序列中周期振动的方法. 若将时间序列视为复

杂的振动轨迹, 我们还可以从频率上来研究序列的内部结构, 借以考察有哪些主要的振动频率, 各频率的贡献如何.

设在区间 $(0, T)$ 上有平稳过程 $X(t)$ 可以展成傅里叶级数,

$$X(t) = \sum_{k=0}^{\infty} [a_k \cos \omega_k t + b_k \sin \omega_k t]. \quad (7)$$

方程(7)常称为随机过程 $X(t)$ 的谱展开式, 它们表明, 一个平稳过程按不同频率可分解为无穷多个谐和振动. 上式只是随机过程 $X(t)$ 在 $(0, T)$ 区间上的离散谱的平稳过程, 当 $T \rightarrow \infty$ 时, 离散谱近似于连续谱. 在实际数据分析中, 经常用到功率谱、协谱, 所谓功率谱即谱密度, 也就是单个时间序列的平均功率按振动频率 f 的分布, 是作为频率的函数表明各谐和振动的振幅对总振幅的贡献. 协谱是两个时间序列中各不同频率分量对它们的互协方差贡献大小, 由此我们可以看出在两个互有联系或看起来没有联系的序列之间, 何种振动周期对相关的影响最大, 或者相关的主要因素来自何种振动分量.

2 试验地点与观测系统

2.1 试验地点

本试验的观测站点位于中国科学院 QYZ 和 CBS 两个试验站内. QYZ 生态试验站位于我国亚热带中部红壤丘陵区 ($115^{\circ}04'13''\text{E}$, $26^{\circ}44'48''\text{N}$), 具有典型的亚热带季风气候特征^[18]. 根据 1985~2002 年本站地面气象观测数据统计, 站区年平均气温 17.9°C , 年平均降水量 1542.4 mm , 年蒸发量 1110.3 mm , 年均相对湿度 84% . 试验站现有林分大多是 1985 年前后营造的人工针叶林, 主要树种有马尾松 (*Pinus massoniana* Lamb)、湿地松 (*Pinus elliottii* Engelm)、杉木 (*Cunninghamia lanceolata* Hook) 以及木荷 (*Schima crenata* Korthals)、柑橘 (*Citrus* L) 等, 常绿植被覆盖面积占土地总面积的 76% . CBS 森林生态系统的观测在定位站 1 号标准地 ($42^{\circ}24'\text{N}$, $128^{\circ}6'\text{E}$) 附近的阔叶红松林内进行, 林地坡降不超过 4% . 受季风影响的温带大陆山地气候, 年均温 $-7.3^{\circ}\text{C} \sim 4.9^{\circ}\text{C}$, 年均降水量 $600 \text{ mm} \sim 900 \text{ mm}$. 主乔木为红松 (*Pinus koraiensis*)、椴树 (*Tilia amurensis*)、蒙古栎 (*Quercus mongolica*)、水

曲柳(*Fraxinusmandshurica*)、色木(*Acermono*)等, 下层灌木覆盖度为 0.4, 以毛榛子(*Corylusmands- hurica*)、忍冬(*Lonicerachrysanth*)、山梅花(*Philade- lphuss- chrenkii*)和溲疏(*Deutziaamurensis*)为主, 草本覆盖度高达 0.7, 以山茄子(*Brachybotrysparidoformis*)宽叶苔草(*Carexsideroticta*)和木贼(*Equisetumhiemale*)等为主^[19~21].

2.2 观测系统

两试验点的观测系统包括常规气象观测系统、七层廓线观测系统及 OPEC 与 CPEC 观测系统, 两种观

测系统气体分析仪的特性见表 1, OPEC 和 CPEC 观测系统的设计示意图见图 2. QYZ 试验站的 OPEC 与 CPEC 两种涡度相关系统安装在铁塔同一高度 23 m 处, CPEC 的进气管道长 29.3 m, 内径为 5 mm, CBS 试验站的两套系统安装在 41.4m 高度处, 闭路系统进气管道长 55.5 m, 内径为 5 mm, 两试验站安装的各仪器型号完全相同.

OPEC 与 CPEC 两种涡度相关系统包括以下组成部分: CSAT3 三维超声风速仪(Campbell Scientific, Inc), LI7000 闭路红外气体分析仪(LI-COR, Inc.), LI-7500 开路红外气体分析仪(LI-COR, Inc.), 温湿度

表 1 OPEC 与 CPEC 气体分析仪特性比较

属性/名称	LI7500(OPEC)	LI7000(CPEC)
类型	绝对浓度开路非扩散红外分析仪	差分闭路非扩散红外分析仪
使用温度范围/℃	-25~50	0~50
电源需求/V	10.5~30 DC	100~240 AC
CO ₂ 观测范围/10 ⁻⁶	0~3000	0~3000
CO ₂ 随温度零(Zero)漂移/10 ⁻⁶ °C ⁻¹	±0.1	±0.3
CO ₂ 随温度跨度(Span)漂移/mmol • mol ⁻¹ °C ⁻¹	±0.02%	±0.2%
H ₂ O 观测范围/mmol • mol ⁻¹	0~60	0~60
H ₂ O 随温度零(Zero)漂移/mmol • mol ⁻¹ °C ⁻¹	±0.03	±0.02
H ₂ O 随温度跨度(Span)/漂移 r °C ⁻¹	±0.15%	±0.4%

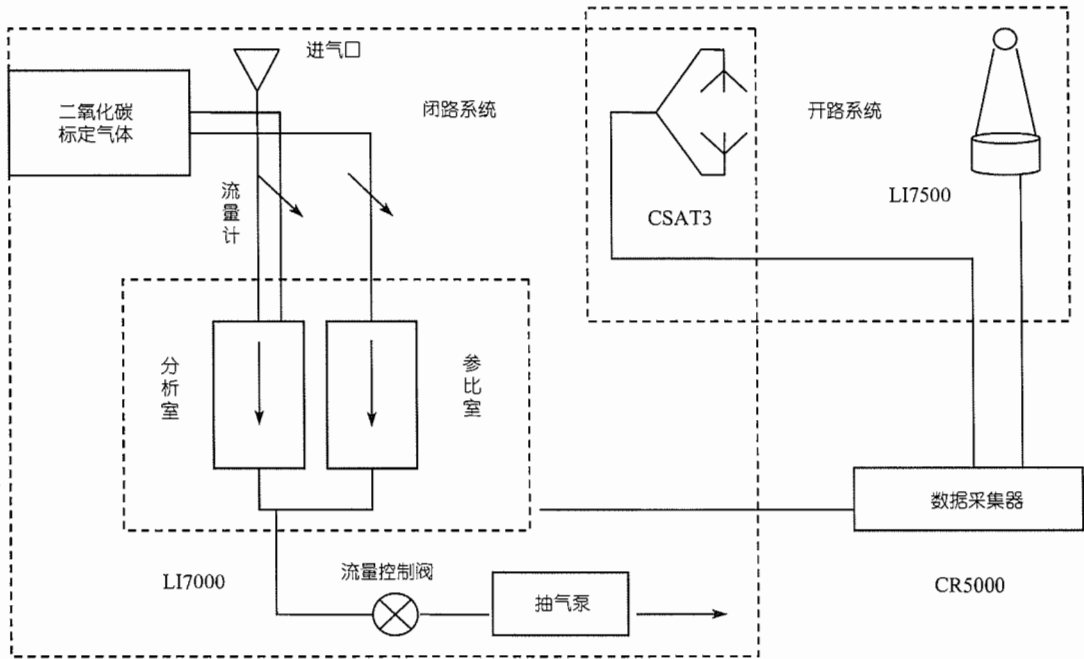


图 2 开路与闭路观测流程示意图

传感器 (Vaisala HMP45C), CR5000 数据采集器 (Campbell Scientific, Inc.). 超声风速仪和气体分析仪的采样频率均为 10 Hz; 采集器的程序控制整个观测系统, 观测的所有变量直接在线计算通量并保存到 PC 卡上, 在数采器或电脑屏幕上可以显示实时数据, 诊断且处理过的原始数据也储存到 PC 卡上.

CPEC 采样系统用 220 V 大容量真空泵把气样抽入闭路分析仪, 气泵流量为 $5 \text{ m}^3/\text{h}$, 进气口在开路分析仪附近 (23 m), 抽气管道内共有四个过滤膜, 分别是: (i) 进气口处有一直径 47 mm, 孔径为 $10 \mu\text{m}$ 的过滤膜, (ii) 样品室进口处有一直径 47 mm, 孔径为 $2 \mu\text{m}$ 的过滤膜, (iii) 参比室进口处有一直径 50 mm, 孔径为 $1 \mu\text{m}$ 的过滤膜, (iv) 在药品过滤瓶外有一直径 25 mm, 孔径为 $1 \mu\text{m}$ 的过滤膜.

CPEC 设置了校正系统可以随时校正气体分析仪的漂移, 修正由于温度、压力、光路内污染物、光源和检测器老化所造成的斜率变化. 校正系统可以用已知浓度的氮气和二氧化碳气体抽入样品室和参比室进行校正. 为了方便, 校正系统中用两个聚碳酸酯瓶, 一个装满碱石灰去除 CO_2 气体, 另一个装满高氯酸镁去除水汽, 通过两个药品瓶的气体可以对系统进行零标定. 两个药品瓶与参比室连接成为闭路循环系统, LI7000 的内部泵可以使药品瓶和参比室内的气体连续循环, 从而过滤气体内的水汽和 CO_2 气体.

3 结果与讨论

3.1 关于 CPEC 红外分析仪的延迟时间

用 CPEC 系统进行观测时, 由于抽气管进口和气体分析仪之间有一定的距离, 因此 CPEC 系统的红外分析仪测定气体浓度的时间滞后于超声风速仪测定风速的时间, 这段时间称为 CPEC 系统红外分析仪的延迟时间. OPEC 与 CPEC 是两种并行观测通量的涡度相关系统, 用涡度相关技术观测的首要条件之一是必须保持所有物理量的同步观测, 为了减小系统误差, 两个试验站的 CPEC 和 OPEC 两种涡度相关系统共用了一个超声风速仪, 因此精确地估测 CPEC 系统红外分析仪的延迟时间是准确计算通量的前提.

延迟时间一般通过垂直风速与 CO_2 或 H_2O 浓度最大协方差来决定^[7,8,10,11], 通常在湍流运动剧烈时, 所计

算的延迟时间比较可靠, 本文采用了 14:00~15:00 之间的数据来计算延迟时间. 如图 3 所示, QYZ 试验站 CO_2 和 H_2O 浓度的延迟时间分别为 7.0 s, 8.5 s 左右, CBS 试验站的 CO_2 和 H_2O 浓度的延迟时间分别为 7.9 s, 8.3 s 左右. 两站水汽的延迟时间都大于 CO_2 的延迟时间, 主要是因为相对于 CO_2 气体水汽更容易与管道内壁之间发生相互粘滞作用. 鉴于两个试验站所用的观测仪器以及辅助设备完全一致, 但是由于 CBS 的闭路吸气管道长于千烟洲, 因此 CBS 闭路红外分析仪的延迟时间应该大于千烟洲, 从计算结果看 CBS 试验站 CO_2 的延迟时间大于 QYZ, 而 QYZ 试验站 H_2O 的延迟时间则略大于 CBS, 这可能主要是 QYZ 试验站的空气湿度比较大, 而水汽与管道内壁之间的相互作用比 CBS 强烈, 从而增加了延迟时间. 延迟时间的长短主要受气流速度、管道长度、管道内径的影响, 两站 CPEC 观测系统所用的仪器设备比较一致, 因此延迟时间也比较接近. 估测 QYZ 和 CBS 两个试验站 CPEC 观测系统的延迟时间的结果表明, 两个试验站涡度相关系统的三维超声风速仪与红外分析仪的频率响应时间一致, 只要在通量计算是给予订正, 开路系统的三维超声风速仪和红外气体分析仪之间的空间隔离不会造成明显的观测误差.

3.2 谱分析

为了检测涡度相关系统的仪器响应特征, 同时也为了获得两个试验站湍流运动的物理结构信息, 本文通过功率谱和协谱对各项观测进行了评价分析. 将某物理量的时间序列视为复杂的振动过程, 只要满足一定的条件, 总可以分解成若干个不同频率的谐和振动, 因此, 我们就可以从频率域上来研究序列的内部结构, 借以考察有哪些主要的振动频率, 各频率的贡献如何, 从而分析周期振动, 这就是所谓的谱分析法^[22]. 本文中某一时间变量的功率谱或者两个时间变量的协谱是通过 Welch 平均方法来计算的, 对于两种谱的平均谱密度均采用了长度为 2 的 9 次方的非交叠 Hamming 窗进行了快速傅立叶变换, 进行谱分析所采用的数据均为一小时高频实时数据, 因此, 每个变量的时间序列大约有 36000 个数据, 然后进行平均趋势化处理. 功率谱和协谱的平均谱密度都乘

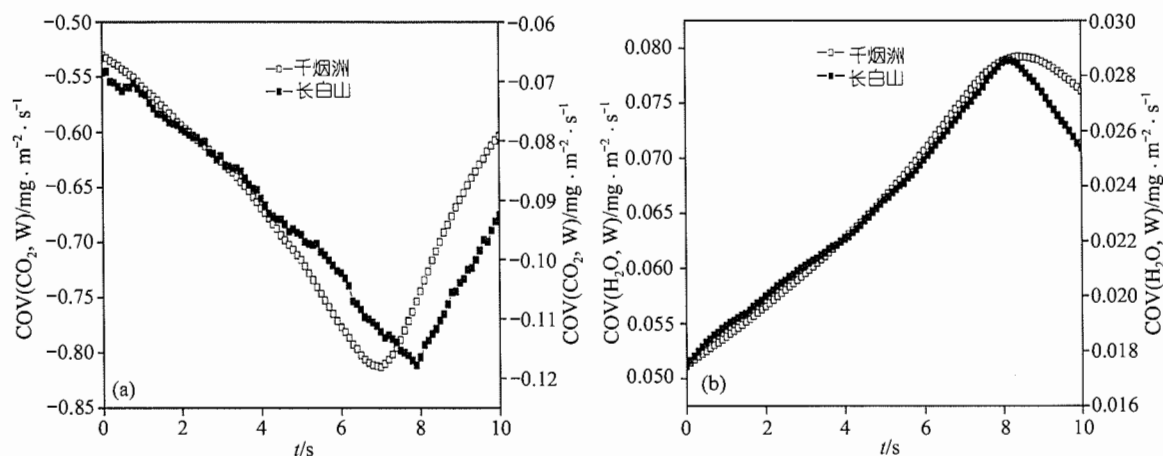
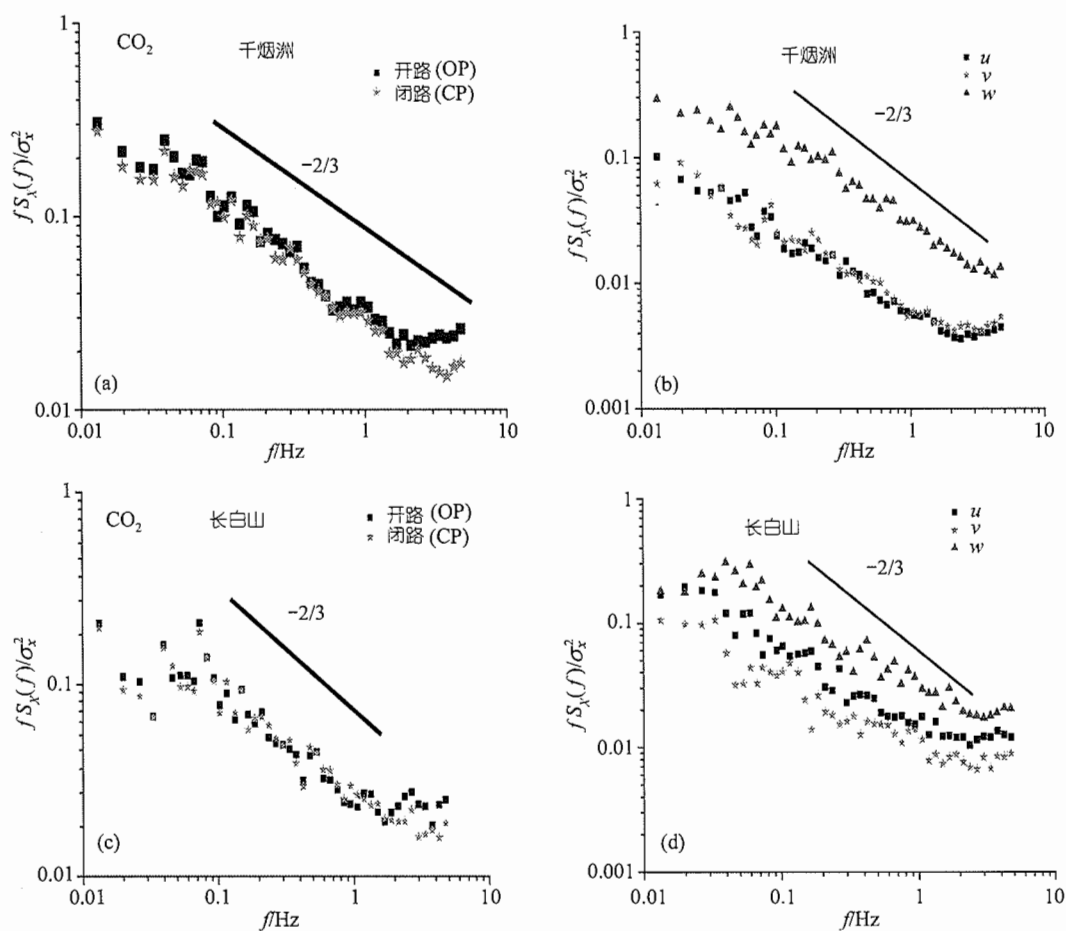


图 3 最大协方差决定延迟时间

(a) 三维超声风速仪观测垂直风速与闭路红外气体分析仪观测 CO₂ 气体浓度最大协方差; (b) 三维超声风速仪观测垂直风速与闭路红外气体分析仪观测 H₂O 汽浓度最大协方差

图 4 OPEC 与 CPEC 两种观测系统观测校正后 CO₂ 气体浓度、三维风速功率谱

(a)和(c)中的 X 为 CO₂ 气体浓度, 而 op 和 cp 分别为开路气体分析仪和闭路气体分析仪, (b)和(d)中的 X 分别为三维风速, u, v, w

以 f , 功率谱通过变量本身的方差进行标准化, 而协谱则是利用两个变量协方差的绝对值进行了标准化。

下面分别分析了 ρ_{CO_2} , w , u , v 的功率谱, 见图 4。由 CO_2 气体浓度功率谱可以看出, 在所有频率范围内 OPEC 与 CPEC 分析仪的频率响应基本一致, 但是 CPEC 的频率响应稍有降低的现象。用 $-2/3$ 斜线来检验功率谱的技术已经用来检验海洋和湖泊的湍流结构^[26], 在本研究中用 log-log 尺度作图时, 在 0.01~10 Hz 频率范围内 CO_2 气体浓度和三维风速功率谱与 $-2/3$ 斜线非常一致。由于 CPEC 采样管道具有高频过滤作用, 当频率大于 2 时, CPEC 观测的 CO_2 气体浓度信号稍有衰减现象, 而 Leuning 和 Yasuda 的研究都发现, 当频率大于 0.1 Hz 时, CPEC 观测的 CO_2 气体功率谱会出现急剧衰减现象^[8,12]。

OPEC 系统观测的 WC 与 WT 协谱对比如图 5(a), (c), 图为 log-log 尺度图。由图可以看出: 开路气体分析仪所观测的 WC 与超声风速仪所观测的 WT 协谱与 $-4/3$ 斜线非常一致^[23,24]。两个试验站的 WC 与 WT 协谱在整个分析频率范围内谱线比较一致, 没有明显差别, 从而验证了 CO_2 通量和感热通量两种通量的谱类似。根据 Brach 和 Lee 的假定(假设超声风速计的热电偶在频率响应方面为一理想传感器), 则图 5 则说明, 超声风速仪与开路红外分析仪之间的空间间隔并没有导致明显的碳通量丢失^[5,10]。

OPEC 和 CPEC 两种观测系统的 WC 协谱比较如图 5(b), (d), 对两种协谱也分别进行了标准化, 图为 log-log 尺度图, 两个试验站的 OPEC 和 CPEC 两种观测系统的 WC 协谱与 $-4/3$ 斜线非常一致, 当频率小于

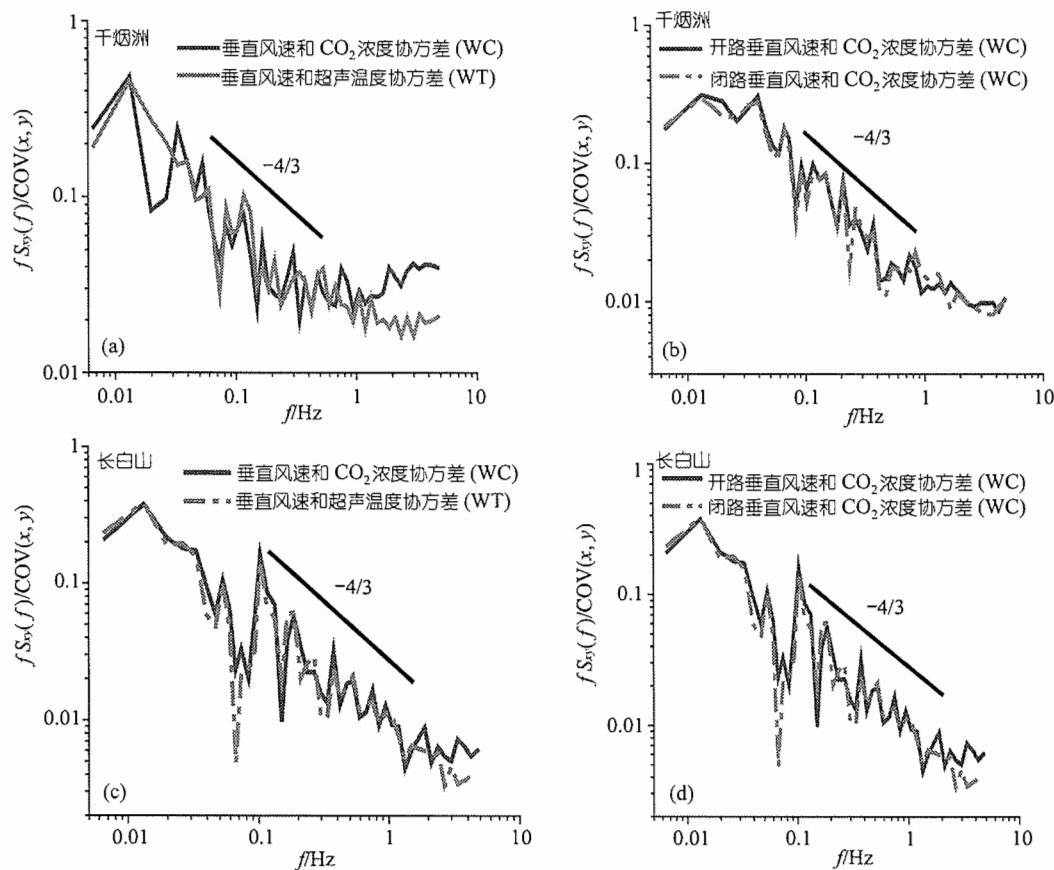


图 5 协谱比较

(a)和(c)为 OPEC 的 WC 与 WT 协谱比较, 其中的 x, y 分别为 OPEC 观测系统观测的垂直风速和 CO_2 浓度、垂直风速和超声温度, (b)和(d)为 OPEC 与 CPEC 观测系统的 WC 协谱比较, 其中的 x, y 分别为 OPEC 与 CPEC 观测系统观测的垂直风速和 CO_2 浓度

1 Hz 时, 开路分析仪和闭路分析仪的观测结果非常一致. 大约在 0.3 Hz 左右, WC 协谱达到最大值, 既然本研究的目标为森林, 且观测系统安装在冠层以上, 那么谱的最大值所对应的频率范围应该低于农田生态系统的观测值, 这正是闭路涡度相关系统更适用于观测较高植被通量的优势所在, 因为观测较高植被时, 对通量有用的频率段趋向于低频范围, 而这些低频区域恰好可以被一种响应速度相对较慢的观测系统所涵盖. Leuning 在 OPEC 与 CPEC 观测系统的协谱图比较中发现^[8]: 当频率大于 0.1 Hz 时, 由于 CPEC 气体浓度在管道内发生衰减, 因而导致 CPEC 系统所

观测通量明显小于 OPEC 系统. 但是在本研究中当频率大于 1 Hz 以后, 闭路分析仪所观测的协谱开始小于开路分析仪的观测结果.

3.3 OPEC 与 CPEC 两种观测系统的通量比较

在评价 CPEC 系统的通量观测结果时, 通常假定 OPEC 系统的通量观测结果为比较标准^[9]. 图 6 通过线性回归对两个试验站开闭路观测系统的 CO_2 和潜热通量进行了分析, 分析所用数据均为白天半小时数据. 由图可以看出, 两个系统观测通量模拟直线的斜率都在 0.8 以上, 其中干烟洲试验站水汽通量的斜

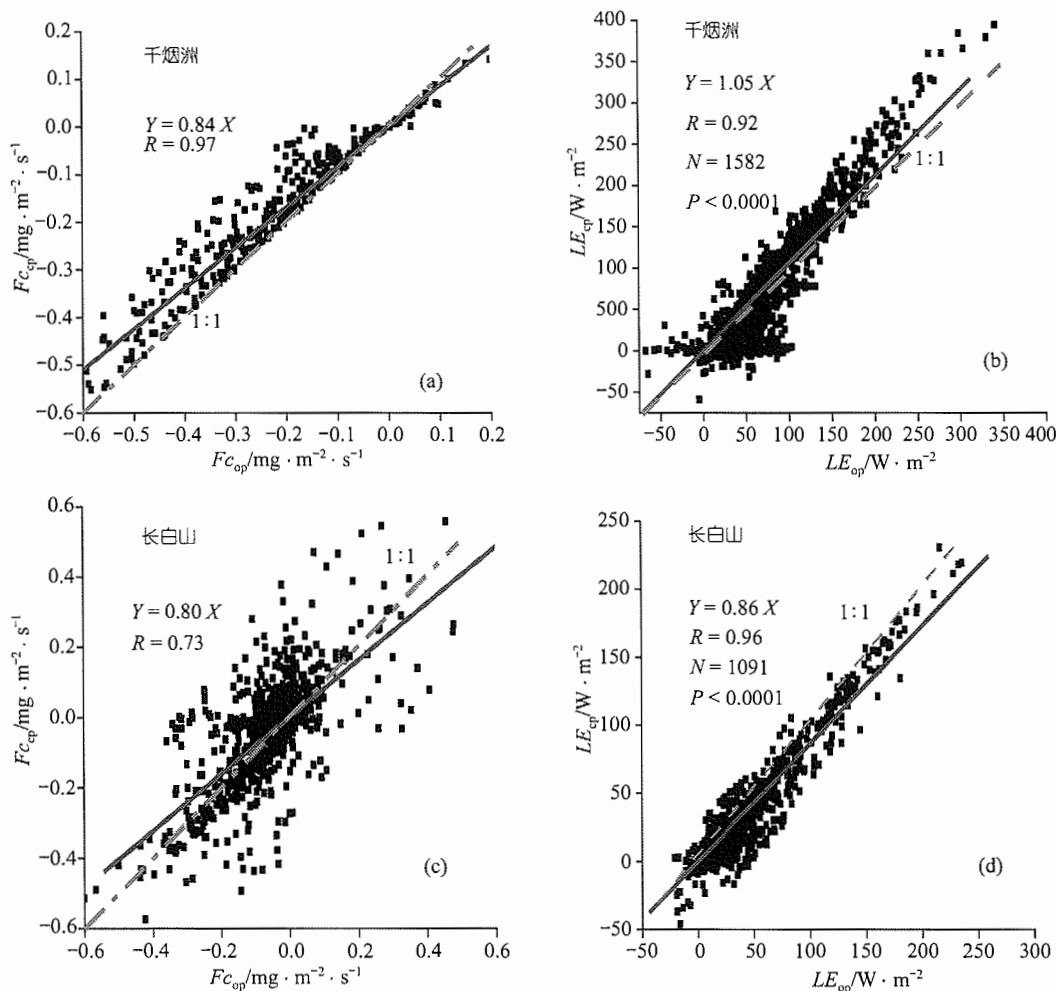


图 6 OPEC 与 CPEC 观测系统的碳通量、潜热通量比较图

(a)为 QYZ 试验站 OPEC 与 CPEC 观测系统的 CO_2 通量的线性比较; (b)为 QYZ 试验站 OPEC 与 CPEC 观测系统的潜热通量的线性比较; (c)为 CBS 试验站 OPEC 与 CPEC 观测系统的 CO_2 通量的线性比较; (d)为 CBS 试验站 OPEC 与 CPEC 观测系统的潜热通量的线性比较

率大于 1. 由此可见两个试验站的 OPEC 与 CPEC 观测系统的通量观测结果差异不大. 在以 OPEC 的观测结果为基准的假设前提下, QYZ 试验站的 CPEC 的 CO_2 通量为 OPEC 的观测结果的 84%, 而两种观测系统的潜热通量基本一致; CBS 试验站的 CPEC 的 CO_2 通量、潜热通量分别为 OPEC 观测结果的 80%, 86%. 由两个试验站的 OPEC 与 CPEC 观测系统的 CO_2 和潜热通量的差异可以看出, CPEC 抽气管道的衰减作用对碳通量的影响大于对水汽通量的影响, 不管是 CO_2 通量还是潜热通量 QYZ 试验站两种观测系统观测结果的差异小于 CBS 试验站, 尤其是潜热通量, 这可能是由于系统误差及两个试验站点的环境条件不同所造成的.

图 7 为选取的两天观测数据, 对开闭路两种观测

系统所观测的 CO_2 通量日变化的比较. 从两天的碳通量日变化可以看出: 不管白天还是夜间两个试验站的开闭路通量观测结果都非常一致, 在 9, 10 两个月内 QYZ 森林生态系统的碳通量仍具有非常明显的日变化趋势, 而 CBS 试验站森林生态系统 9 月份的碳通量日变化趋势明显, 10 月份基本没有日变化趋势. OPEC 与 CPEC 观测系统所观测的碳通量非常一致, 通量日变化的观测结果比较进一步证明了 CPEC 系统观测结果的可靠性.

4 结论

通过对两个试验站的 CPEC 系统的延迟时间的计算分析、OPEC 与 CPEC 观测系统的观测数据谱分析及两种观测系统的通量观测结果的比较研究得到

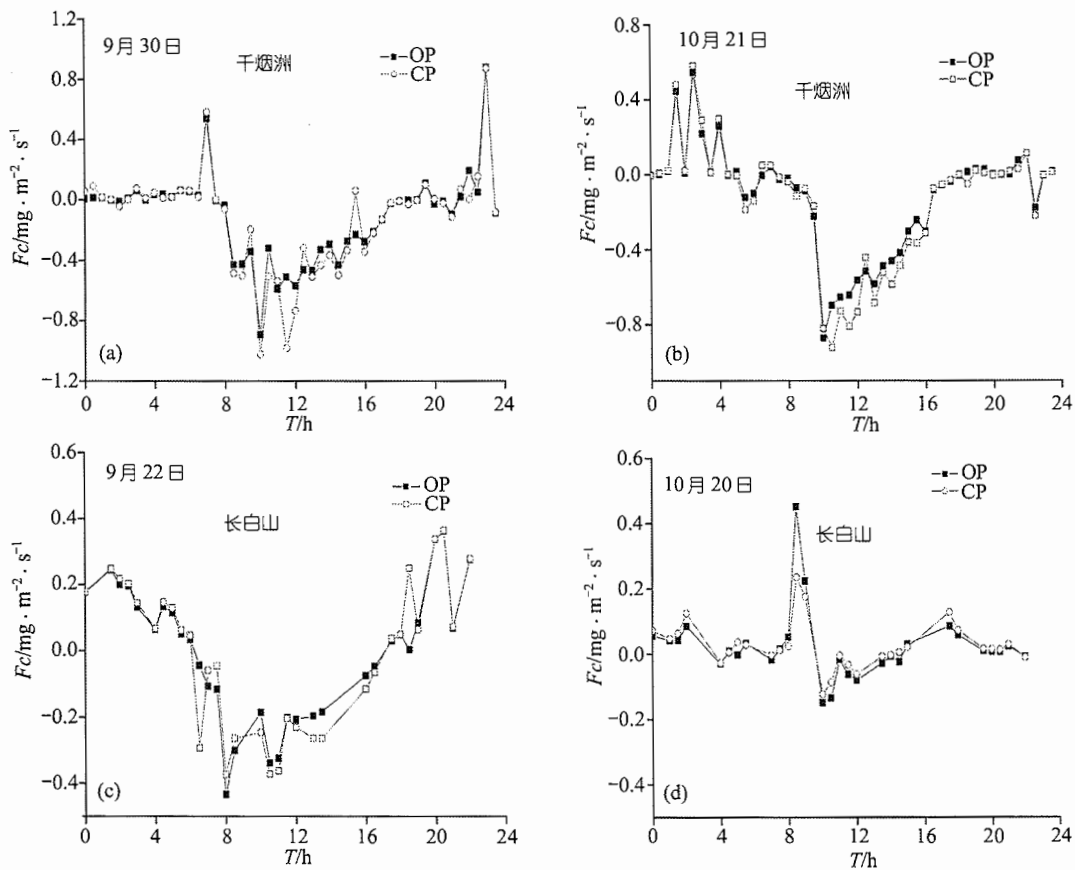


图 7 开路和闭路两种观测系统碳通量日变化比较图

(a)和(b)干烟洲试验站开路和闭路系统 CO_2 通量日变化比较图; (c)和(d)长白山试验站开路和闭路系统 CO_2 通量日变化比较图

如下结论:

(1) 垂直风速与闭路观测系统的 CO_2 气体、水汽浓度协方差的最大值所决定两个试验站闭路分析仪观测的 CO_2 和 H_2O 的延迟时间分别为 7.0 s ~ 8.0 s 和 8.0 s ~ 9.0 s 左右, 因为相对于 CO_2 气体水汽更容易与管道内壁之间发生相互粘滞作用, 两站水汽的延迟时间都大于 CO_2 的延迟时间.

(2) 实时数据谱分析表明两个试验站的 OPEC 与 CPEC 观测系统的 ρ_{CO_2} , w , u , v 的功率谱与 -2/3 斜线非常一致, WC 与 WT 协谱与 -4/3 斜线非常一致, OPEC 与 CPEC 观测系统的 WC 协谱非常一致, 开路系统的 WC 与 WT 协谱一致. 由此可以推断, 两种观测系统的观测数据质量比较高, 观测结果可靠, 两种湍度相关系统并没有造成明显的通量差异, 超声风速仪与开路红外分析仪之间的空间位置分离并没有导致明显的碳通量差异.

(3) 以 OPEC 系统的观测结果为标准, 根据半小时数据对开闭路两种观测系统的通量进行了相关性分析, 分析结果表明: QYZ 试验站 CPEC 观测系统的 CO_2 通量为开路系统的观测结果的 84%, 而两种观测系统的潜热通量基本一致, CBS 试验站 CPEC 观测系统的 CO_2 通量、潜热通量分别为开路系统观测结果的 80%、82%. 其中 CPEC 观测系统对二氧化碳通量的影响要大于对水汽通量的影响. 两个试验站点的 OPEC 与 CPEC 观测系统的 CO_2 通量日变化非常一致.

(4) 从以上的比较分析可以看出 QYZ 和 CBS 两个试验站的 OPEC 和 CPEC 两种观测系统观测结果是可靠的, 数据观测质量比较高, 在今后的通量观测试验中 OPEC 和 CPEC 两种观测系统可以作为并行观测相互弥补的观测技术手段.

参 考 文 献

- Desjardins R L. A technique to measure CO_2 exchange under field conditions. *Int J Biometeorol*, 1974, 18: 76~83
- Desjardins R L, Lemon E R. Limitations of an eddy covariance technique for the determination of the carbon dioxide and sensible heat fluxes. *Bound.-Lay. Meteorol*, 1974, 5: 475~488
- Jones E P, Zwick H, Ward T V. A fast response atmospheric CO_2 sensor for eddy correlation flux measurement. *Atmos. Environ*, 1978, 12: 845~851
- Bingham G E, Gillespie C H, McQuaid J H. Development of a miniature, rapid response CO_2 sensor. *Lawrence Livermore National Lab, Report UCRL-52440*, 1978
- Brach E J, Desjardins R L, StAmour G T. Open path CO_2 analyser. *J Phys E Sci Instrum*, 1978, 14: 1415~1419
- Ohtaki E, Matsui T. Infrared device for simultaneous measurements of fluctuations of atmospheric CO_2 and water vapor. *Boun.-Lay. Meteorol*, 1982, 24: 109~119
- Leuning R, Moncrieff J. Eddy-covariance CO_2 Flux measurements using open- and closed-path CO_2 analyzers: corrections for analyzer water vapor sensitivity and damping of fluctuations in air sampling tubes. *Boundary-Layer Meteorol*, 1990, 53: 63~76
- Leuning R, King K M. Comparison of eddy covariance measurements of CO_2 fluxes by open- and closed-path analyzers. *Boundary-Layer Meteorol*, 1992, 59: 297~311
- Suyker A E, Verma S B. Eddy correlation measurement of CO_2 flux using a closed-path sensor: Theory and field tests against an open-path sensor. *Boundary-Layer Meteorol*, 1993, 64: 391~407
- Lee X, Black T A, Novak M D. Comparison of flux measurements with open- and closed-path gas analyzers above an agricultural field and a forest floor. *Boundary-Layer Meteorol*, 1994, 67: 195~202
- Leuning R, Judd M D. The relative merits of open- and closed-path analyzers for measurements of eddy fluxes. *Global Changes Biology*, 1996, 2: 241~253
- Yasuda Y, Watanabe T. Comparative Measurements Of CO_2 Flux over a Forest Using Closed-Path and Open-Path CO_2 Analysers. *Boundary-Layer Meteorol*, 2001, 100: 191~208
- 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
- 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
- Reynolds O. On the dynamical theory of incompressible viscous fluids and the determination of criterion. *Phil Trans Roy Soc London*, 1895, A174: 935~982
- Webb E K, Pearman G I, Leuning R. Correction of Flux Measurements for Density Effects due to Heat and Water Vapour Transfer. *Quart J Roy Meteorol Soc*, 1980, 106: 85~100
- Massman WJ, Lee X. Eddy covariance flux corrections and uncertainties in long term studies of carbon and energy exchanges. *Agric For Meteorol*, 2002, 113: 121~144
- 宋霞, 刘允芬, 徐小峰, 等. 红壤丘陵区人工林冬春时段碳、水、热通量的观测与分析. *资源科学*, 2004, 26(3): 96~104
- 李金中, 裴铁璠, 李晓晏, 等. 森林流域土壤饱和渗透系数与有效孔隙度模型的研究. *应用生态学报*, 1998, 9(6): 597~602
- 金昌杰, 关德新, 朱廷曜. 长白山阔叶红松林太阳辐射分光谱特征. *应用生态学报*, 2000, 11(1): 19~21
- 吴刚, 梁秀英, 张旭东, 等. 长白山红松阔叶林主要树种高度生态位的研究. *应用生态学报*, 1999, 9(3): 262~264
- 丁裕国, 江志红. 气象数据时间序列的信号处理. 北京: 气象出版社, 1998
- Kaimal J C, Finnigan J J. *Atmospheric Boundary Layer Flows: Their Structure and Measurement*. Oxford University Press, 1994. 289
- Wyngaard J C, Cote O R. Cospectral similarity in the atmospheric surface layer. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1972, 98: 590~603