

文章编号: 1001-8166(2009)04-00372-11

# 涡动相关仪观测蒸散量的插补方法比较<sup>①</sup>

徐自为<sup>1</sup>, 刘绍民<sup>1</sup>, 徐同仁<sup>1</sup>, 王介民<sup>2</sup>

(1 北京师范大学遥感科学国家重点实验室, 地理学与遥感科学学院, 北京 100875

2 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000)

**摘 要:** 涡动相关仪在长时间连续观测中, 观测数据会有不同程度的缺失。应用 6 种不同的插补方法(平均昼夜变化法 MDV, 非线性回归方法 NLR, 动态线性回归方法 DLR, 查表法 LUT, FAO-PM 方法, HANTS 方法)对北京密云站 2007 年涡动相关仪观测蒸散量数据进行了插补。结果表明: LUT 方法在不同数据缺失时均得到较好结果(均方差小于  $8 \text{ W/m}^2$ ); MDV 和 NLR 方法更适合于短时间数据缺失的插补; DLR 和 FAO-PM 方法在观测数据出现连续波动时插补结果较差。由 LUT、DLR、NLR、HANTS、FAO-PM 方法得到的年蒸散量分别为  $395.8 \text{ mm}$ 、 $409.9 \text{ mm}$ 、 $393.5 \text{ mm}$ 、 $390.7 \text{ mm}$ 、 $399.4 \text{ mm}$ , 差异在  $2.3 \sim 19.2 \text{ mm}$  之间变化。对比分析了 LUT 方法得到的年蒸散量(潜热通量)与净辐射、降水量以及 LAS 观测潜热通量间的变化规律, 表明插补结果合理。

**关 键 词:** 涡动相关仪; 蒸散量; 缺失数据; 插补方法

中图分类号: P414

文献标志码: A

## 1 引 言

自 20 世纪 80 年代开始, 涡动相关仪被广泛用于测量地表与大气间的物质和能量交换<sup>[1]</sup>。此方法能够较准确地直接测量地表—大气间的湍流交换量, 并且在长时间连续观测中最小限度地减少环境及生态系统的干扰<sup>[2]</sup>, 被作为全球通量观测站网(FLUXNET)的主要观测仪器。基于此方法的观测数据通常以 30 分钟为一个周期, 采集到一天 24 小时, 一年 365 天的通量数据。然而由于仪器本身问题(传感器的损坏等)、维护和标定、自然环境的限制(降水、大风等)等原因, 通常一年中约有 17% ~ 50% 的观测数据缺失和被剔除<sup>[3]</sup>。将有关数据应用在水资源管理和分析、二氧化碳的季度和年的收支等情况研究时, 通常需要得到日、月、年不同时间尺度的数据。因此针对不同的数据缺失状况, 发展

一套数据插补方法, 获得较为完整、可靠的数据集成为了当前亟待解决的问题。

许多学者已经对涡动相关仪观测数据的插补方法进行了一些研究<sup>[3~8]</sup>, 然而到目前为止, 并没有一种插补方法被广泛接受<sup>[4]</sup>, 插补方法很大程度上取决于研究者的选择。针对蒸散量(潜热通量), 通常所采用的插补方法包括: 平均昼夜变化法(Mean Diurnal Variation MDV)<sup>[3,5]</sup>、查表法(Look Up Table LUT)<sup>[3,5,6]</sup>、非线性回归方法(Nonlinear Regression Method NLR)<sup>[3,6,7]</sup>、动态线性回归方法(Dynamic Linear Regression DLR)<sup>[4]</sup>和人工神经网络方法(Artificial Neural Networks ANN)<sup>[8]</sup>等。不同的插补方法有各自的优缺点。平均昼夜变化方法不需要气象数据, 因此这种方法能够在气象数据缺失情况下使用, 但当环境条件发生明显改变时, 插补的结果往往不能代表实际状况。非线性回归方法、查表法、

① 收稿日期: 2008-12-29 修回日期: 2009-03-04

\* 基金项目: 公益性行业(气象)科研专项“大尺度水热通量观测系统的研制与应用研究”(编号: GYHY 200706046); 中国高技术研究发展计划项目“非均匀下垫面条件下区域蒸散量遥感监测与验证的关键技术研究”(编号: 2007AA12Z175); 国家自然科学基金项目“非均匀下垫面上卫星像元尺度地表通量的研究”(编号: 40671128)资助。

作者简介: 徐自为(1981-), 男, 吉林梨树人, 博士研究生, 主要从事地表通量观测数据的处理与分析研究。E-mail: x\_ziwei@yahoo.com.cn

\* 通讯作者: 刘绍民(1967-), 男, 浙江绍兴人, 教授, 主要从事陆面过程观测与遥感应用研究。E-mail: snliu@bnu.edu.cn

动态线性回归方法和人工神经网络方法都需要相关的气象要素,能够反映出气象因子的变化对蒸散量的影响,但同时受到气象数据的制约。不同插补方法的计算结果也有一定的差异, A lavi等<sup>[4]</sup>对比了农田下垫面上动态线性回归法和非线性回归法的插补结果,表明两种方法计算的年蒸散量差异很小(仅有 3%),而差异主要集中在作物生长季; F a lge等<sup>[5]</sup>利用 28个全球通量观测网络(FLUXNET)站点数据对平均昼夜变化方法与查表法计算结果进行了比较,两种插补方法计算的年蒸散量差异在-48~86 mm之间变化。此外 HANTS方法(H a m o n i c A n a l y s i s o f T i m e S e r i e s)<sup>[9]</sup>与联合国粮农组织(Food and Agricultural Organization, FAO)推荐的 Penman-M o n t e i t h 公式(简称 FAO-PM 方法)<sup>[10]</sup>也常用于数据的插补, HANTS方法常常在遥感中被用于重新构建时间序列影像,此方法一般针对长时间有周期性变化的数据进行插补<sup>[11]</sup>,而 FAO-PM 方法则是结合相关气象数据并在一定假设条件下对蒸散量进行插补<sup>[12]</sup>。

本文利用密云站 2007年涡动相关仪观测数据,采用 MDV 方法、LUT 方法、NLR 方法、DLR 方法、FAO-PM 方法以及 HANTS方法对缺失的蒸散量(潜热通量)数据进行插补,并且比较了不同插补方法的效果。

## 2 数据与方法

### 2.1 观测站点

密云站位于北京市密云县新城子镇一个宽度约 500~1 000 m,长度约 2 420 m,西南—东北走向的山谷中。盛行风向为西南风(白天)与北风(夜间),

年平均温度约 10.93℃,年降水量约 615 mm,观测站示意图见图 1。观测站于 2006年 6月初建成,8月开始正式投入运行,观测仪器包括大孔径闪烁仪(L a r g e A p e r t u r e S c i n t i l l m e t e r LAS)、涡动相关仪以及自动气象站等。涡动相关仪与自动气象站等安装在高度为 31.5 m的铁塔上,涡动相关仪所用数据采集器为 CR5000(C a m p b e l l),采集频率为 10 H z 输出 30分钟平均值。LAS发射端与接收端分别安装在相距 2 420 m的两座小山上,光径路线与正北夹角约 29°。观测仪器具体见表 1。

### 2.2 观测数据的处理

本文选用观测站 2007年涡动相关仪与自动气象站的观测数据进行分析,并且对观测数据进行了严格的质量控制。

#### 2.2.1 涡动相关仪数据

采用英国爱丁堡大学发展的 EdRe软件对涡动相关仪观测数据进行处理,包括野点值的剔除、延迟时间的校正、超声虚温转化为空气温度、坐标旋转处理、空气密度效应的修正(即 WPL修正)等<sup>[13]</sup>。并且在此基础上对观测数据进行了严格的筛选,筛选标准为:

- (1)剔除传感器状态异常数据。
- (2)剔除降水时次及该时次前后一小时数据。
- (3)剔除了原始 30分钟记录不完整(缺测大于 3%)的时次。
- (4)剔除湍流混合较弱时次的的数据(摩擦风速  $u_{*} < 0.1 \text{ m/s}$ <sup>[4]</sup>)。

#### 2.2.2 自动气象站数据

文中所用气象数据包括净辐射( $R_n$ )、土壤热通量( $G$ )、空气温度( $T_a$ )、相对湿度( $RH$ )等,这些气象

表 1 观测仪器一览表  
Table 1 Instruments used in the experiment

名 称	型 号	架 高 (m)	产 地
大孔径闪烁仪	LAS Kipp&Zonen	35.86	荷兰
涡动相关仪	CSAT3, Campbell LI7500, Campbell	26.66	美国
风速、风向	WS03001	30.56(上层), 10.66(下层)	美国
空气温、湿度	HMP45C	30.56(上层), 10.66(下层)	芬兰
净辐射	CNR-1	30.76	荷兰
降水量	Young-52203	31.46	美国
地表辐射温度	RTC-3	30.56	美国
土壤温度	107	0.05 0.1 0.2 0.4 0.6 0.8 1	美国
土壤湿度	ECH <sub>2</sub> O-10	0.05 0.1 0.2 0.4 0.6 1	美国
土壤热通量	HFT-3	0.02	美国
气压	AV-410	10.16	美国

数据缺失很少 (缺失率小于 1%) , 对缺失数据采用线性插值方法进行填补。

2 3 涡动相关仪观测数据的插补方法

本文采用插补方法包括: MDV 方法、LUT 方法、NLR 方法、DLR 方法、FAO-PM 方法以及 HANTS 方法, 各方法的具体说明如下:

(1) 平均昼夜变化法 (MDV)。平均昼夜变化法指对缺失数据采用临近天同时刻数据进行填补<sup>[3 5]</sup>, 这种方法的精度很大程度上取决于选取窗口的大小。一般窗口大小选取 4~ 15 天。窗口过小 (小于 4 天) 不足以反映出一段时间的平均状况<sup>[3 14]</sup>, 另一方面由于显热、潜热通量与环境变量之间呈非线性关系, 窗口过大则会带来较大的误差。本文选取白天和夜间窗口大小分别为 14 天和 9 天。

(2) 查表法 (LUT)。此方法一般将一年划分为 6 个双月或 4 个季节, 根据需插值要素的主要影响因子进行分类, 并针对每个双月 (或季节) 结合各类影响因子建立查找表。二氧化碳通量一般根据光合光子通量密度 (PPFD) 和气温进行插补<sup>[3]</sup>。针对潜热通量建立查找表的较少, Falge 等<sup>[5]</sup>根据光合光子通量密度和饱和水汽压差 (饱和水汽压与实际水汽压之差) 建立了查找表。本文将一年分为 4 个季节 (春、夏、秋、冬), 根据净辐射和饱和水汽压差建立查找表。净辐射的变化范围为 - 200~ 800 W / m<sup>2</sup>, 50 W / m<sup>2</sup> 为一个间隔, 而饱和水汽压差的变化范围为 0~ 5 1 kPa, 0 15 kPa 为一个间隔, 最后建立的查找表为 4 个季节 × 20 个净辐射类别 × 35 个饱和水汽压差类别。然后依据缺失数据同期的净辐射和饱和水汽压差到已建立的表中查找相应值, 填补缺失蒸散量 (潜热通量)。

(3) 非线性回归方法 (NLR)。此方法一般建立潜热通量与其主要影响因子的回归方程。本文选取缺失数据前后 10 天的观测数据建立潜热通量与净辐射的二次幂函数方程, 如果相关系数 ( $R^2$ ) 大于 0 5 则可利用已建立的方程对缺失数据进行填补, 否则应适当扩大窗口。

(4) 动态线性回归方法 (DLR)。Perm an-M onteith 公式可以表示为<sup>[15]</sup>:

$$LE = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma^*} (Rn - G) + \frac{\rho_a C_p}{r_a (\Delta + \gamma^*)} D \quad (1)$$

式中:  $LE$  为潜热通量,  $\rho_a$  为空气密度,  $C_p$  为空气定压比热,  $\gamma^* = \gamma (1 + r_c / r_a)$ ,  $r_a$  为空气动力学阻抗,  $r_c$  为冠层阻抗,  $\gamma$  为干湿表常数,  $\Delta$  为饱和水汽压—温度曲线的斜率,  $Rn$  为净辐射,  $G$  为土壤热通量,  $D$  为

饱和水汽压差。

Alav i 等<sup>[4]</sup>将数据同化的方法应用到潜热通量缺失数据的插补中。该算法依据 Perm an-M onteith 公式, 将潜热通量 ( $LE$ ) 与净辐射 ( $Rn$ )、土壤热通量 ( $G$ )、饱和水汽压差 ( $D$ ) 建立回归方程, 并将该方程作为该同化算法的模型算子, 利用集合卡尔曼滤波<sup>[16]</sup>作为最优化方法, 将未缺失时刻的潜热通量同化到该算法中, 通过优化模型参数, 可以得到各时刻的潜热通量最优估算值。该同化算法公式如下:

$$LE(t) = \alpha(t) [Rn(t) - G(t)] + \beta(t) D(t) + \zeta(t) \quad (2)$$

式中:  $\alpha(t)$ 、 $\beta(t)$  为模型参数,  $\zeta$  为模型误差,  $t$  为时间。在该算法中, 模型的参数是随时间变化的, 可用下面公式表述:

$$\begin{aligned} \alpha(t) &= \alpha(t-1) + \eta_\alpha(t), \\ \beta(t) &= \beta(t-1) + \eta_\beta(t) \end{aligned} \quad (3)$$

式中:  $\eta_\alpha$ 、 $\eta_\beta$  为均值为零的随机噪声。

在该算法中, 净辐射、土壤热通量、饱和水汽压差为驱动数据。通过给定  $\alpha(t)$ 、 $\beta(t)$  一个初值, 可以得到潜热通量随时间的变化值。当潜热通量未缺失时, 则将其同化到该算法中, 通过集合卡尔曼滤波算法优化模型参数  $\alpha(t)$ 、 $\beta(t)$ 。当潜热通量有缺失时, 则根据公式 (3) 得到该时刻模型参数  $\alpha(t)$ 、 $\beta(t)$ , 并估算出该时刻的潜热通量, 从而实现对潜热通量数据的插补。

模型参数 ( $\alpha(t)$ 、 $\beta(t)$ ) 的估算精度对数据插补结果非常重要, 而未缺失时刻的潜热通量则会影响模型参数的估算精度。此外, 该算法需要气象数据作为驱动数据, 在转折天气可能会表现得更好, 但同时也受到驱动数据精度的影响。

(5) FAO-PM 方法 (FAO-PM)。依据联合国粮农组织 (FAO) 推荐的 Perm an-M onteith 公式<sup>[10]</sup>, 计算出每天的参考作物蒸散量, 并且结合当天涡动相关仪测量的蒸散量数据, 可得到每天的参考蒸发比 (实际蒸散量与参考蒸散量的比值)。针对观测数据缺失日, 先根据 FAO 推荐的 Perm an-M onteith 公式计算出该天的参考蒸散量, 然后结合未缺失日的参考蒸发比 (假设参考蒸发比不变), 推算出数据缺失日的蒸散量。FAO 推荐的 Perm an-M onteith 公式表示为:

$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta (Rn - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 D}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)} \quad (4)$$

式中:  $ET_0$  为参考蒸散量,  $T$  为 2 m 高处空气温度,  $u_2$

为 2 m 高处风速。

数据缺失日的蒸散量可表示为<sup>[12]</sup>:

$$ET = ET_{ref} \times ET_0 \tag{5}$$

式中:  $ET_{ref}$  为参考蒸发比。如果数据有较长时间的缺失, 则采取“就近”原则, 即结合临近未缺失日的  $ET_{ref}$  来推算缺失日的蒸散量。

该算法需结合气象数据并在假设参考蒸发比不变条件下进行, 缺失日与未缺失日参考蒸发比的“相似程度”决定了插补的精度。此外, FAO-PM 方法插补的对象是日缺失数据, 不能对单个时次数据的缺失 (30 分钟数据) 进行插补。

(6) HANTS 方法。该 HANTS 方法是在傅立叶变换基础上改进的一种时间序列分析方法<sup>[9]</sup>。它是根据谐波的余弦分解, 将图像信息分解成幅值信息和相位信息进行分析。这种时间序列分析方法允许数据在时间序列上不等间距, 以及允许使用者选择周期性函数的频率去模拟观测值的时间序列数据。因此, 该方法在一定程度上可以反映由于气象和地表水分等状况不同引起的蒸散量变化<sup>[17]</sup>。HANTS 方法相对于快速傅立叶变换更具有灵活性, 可以根据权重矩阵排除一些无效的数据样本, 从而得出比较可靠的插补数据。

HANTS 方法一般对长时间有周期变化的数据进行插补, 该方法常常用来重新构建时间序列遥感影像<sup>[11, 18]</sup>。由于蒸散量 (潜热通量) 具有年变化特征, 本文将该方法用在蒸散量 (潜热通量) 的日缺失数据的插补。

3 结果分析

3.1 通量观测数据的缺失状况

对密云站 2007 年的涡动相关仪观测数据进行分析, 得到不同原因引起观测数据缺失的日变化 (图 2), 以及涡动相关仪观测数据日缺失状况 (表 2)。

表 2 涡动相关仪观测数据缺失状况  
Table 2 Data missing conditions of eddy covariance system

缺失天数	1	2	3	4	6	15	22
次数	29	5	4	1	1	1	1

注: 如观测数据缺失大于 50%, 该天作为缺失日

从图 2 可知, 2007 年密云站一年中约 61.4% 数据为有效数据, 剔除湍流混合较弱 ( $u_* < 0.1 \text{ m/s}$ ) 的数据为 20.7%, 剔除降水时次的数据为 7.2%, 其它原因 (停电或仪器标定等) 引起的数据缺失为 10.7%。摩擦风速小于  $0.1 \text{ m/s}$  的数据几乎均集中在夜间, 即夜间湍流混合较弱。降水多数发生在白天, 夜间相对较少。另外由于停电或仪器标定等原因引起的缺失数据则无明显日变化特征。

表 2 统计了密云站 2007 年日缺失状况, 全年数据缺失日共 98 天, 分为缺失 1 天 (29 次), 连续缺失 2 天 (5 次)、3 天 (4 次)、4 天 (1 次)、6 天 (1 次)、15 天 (1 次)、22 天 (1 次)。其中两次较长时间的缺失 (第 66~87 天和第 190~204 天) 分别由于仪器标定

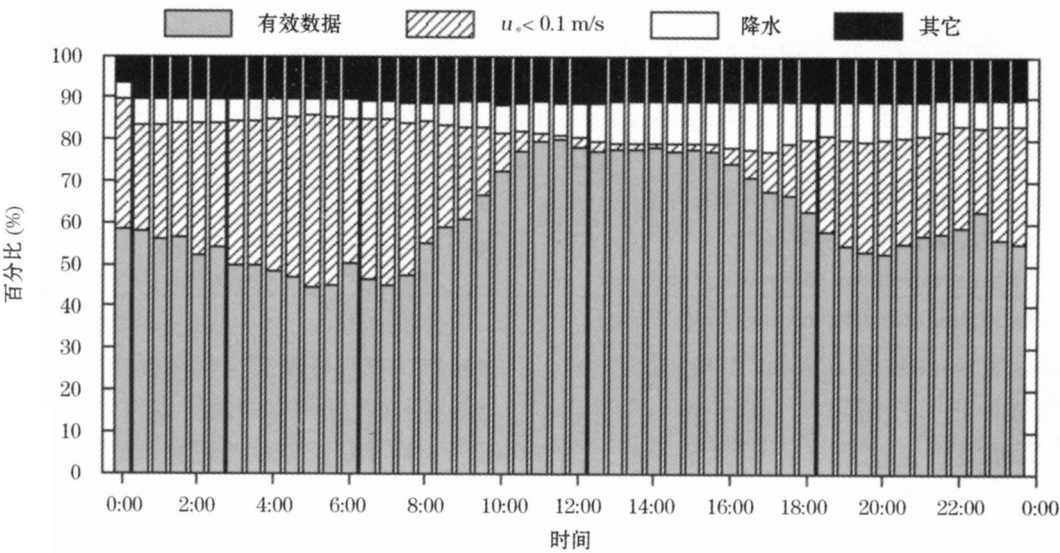


图 2 涡动相关仪观测数据缺失的日变化  
Fig 2 Diurnal variation of missing data from eddy covariance system

和供电装置损坏引起, 其余数据缺失是由于剔除降水时次、湍流混合较弱数据或停电等原因引起。

3 2 各种插补方法的比较

通过对观测数据的分析, 将缺失数据分为两种情况: 短时间数据缺失 (30 分钟数据缺失) 和长时间数据缺失 (日缺失)。针对这两种数据缺失情况, 利用各种方法进行插补。为检验各种插补方法的精度, 本文选取观测数据较完整的时间段 (第 213 ~ 303 天), 人工删除数据, 形成 30 分钟数据缺失和日数据缺失两种情景, 并且使两种情景涵盖观测数据缺失的多种情况: 包含了晴天和阴天天气条件。其中 30 分钟缺失包含白天与夜间单个时次缺失、连续几个时次缺失, 日缺失则包含了单日缺失、连续多日缺失。下面比较了 30 分钟数据缺失和日数据缺失条件下各种插补方法的插补效果, 并计算了各种插补方法的均方差 (RM SD)。

图 3 为 30 分钟数据缺失情况下各种方法的插

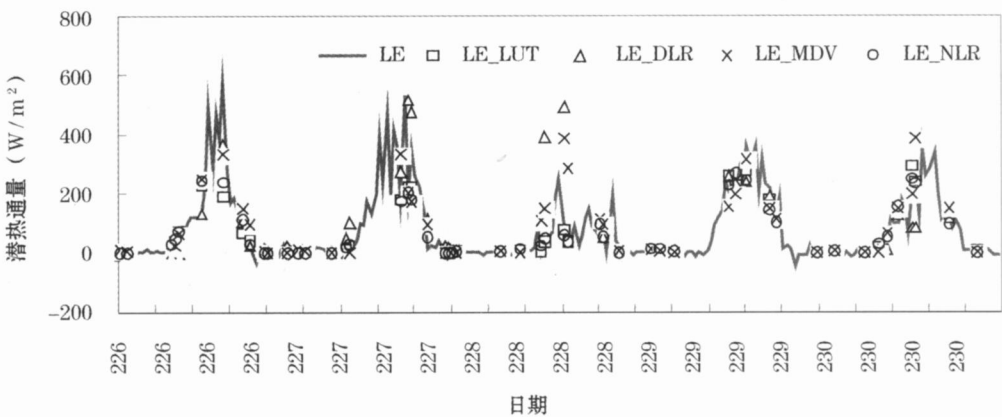


图 3 30 分钟数据缺失情况下不同插补方法的比较

Fig 3 Comparison of different gap filling methods in 30 minutes data missing

表 3 30 分钟数据缺失情况不同插补方法的均方差 (单位:  $W/m^2$ )

Table 3 Root mean square difference of different methods in 30 minutes data missing (Unit  $W/m^2$ )

	RM SD (LUT)	RM SD (DLR)	RM SD (MDV)	RM SD (NLR)
晴天	4.18	10.08	3.2	2.9
阴天	0.32	22.84	16.49	0.3
白天	3.88	14.64	8.98	2.91
夜间	0.75	1.36	0.51	0.78

通过比较各种插补方法对 30 分钟数据缺失和日数据缺失的插补结果, 可以发现:

(1) LUT 方法在两种数据缺失各种情形下均得

补结果 (226 ~ 230 天), 表 3 统计了不同条件下各种方法产生的均方差。其中第 228 天为阴天, 其它几天为晴天。总体上, 各种插补结果在夜间较白天好, 晴天较阴天好; DLR 和 MDV 方法的插补效果在不同数据缺失情况下差别较大; NLR 和 LUT 方法较稳定 (在各种情形下差异不大), 且插补效果较好 (RM SD 小于  $5 W/m^2$ )。

图 4 为日数据缺失情况下各种方法的插补结果 (224 ~ 299 天), 人为设定 1 天 (第 225 天)、2 天 (第 232、233 天)、10 天 (第 247 ~ 256 天) 和 24 天 (274 ~ 297 天, 其中第 279 天观测数据缺失) 连续数据缺失 4 种情形, 表 4 统计了不同数据缺失情形下各种插补方法的均方差。LUT 在各种数据缺失条件下均得到较好的插补结果 (均方差小于  $8 W/m^2$ ), NLR、DLR 和 FAO-PM 方法在不同数据缺失情形下有一定差异, 均方差在  $1.13 \sim 12.36 W/m^2$  间变化, MDV 方法在连续多日数据缺失会产生较大误差。

到较好的插补结果。

(2) NLR 方法更适合于短时间数据缺失的插补, 对于较长时间的数据缺失插补结果变得不稳定。

(3) MDV 方法对 30 分钟数据缺失插补结果较好, 但在有明显天气变化以及连续多日数据缺失时插补结果较差。

(4) DLR 方法和 FAO-PM 方法可以很好地反映出数据的变化趋势, 但在观测数据 (潜热通量) 出现连续波动时插补结果较差。

LUT、NLR 和 DLR 插补方法的原理均为建立潜热通量与其主要驱动因子的相关关系来填补缺失数据。LUT 方法以季节为一个周期, 将净辐射和饱和

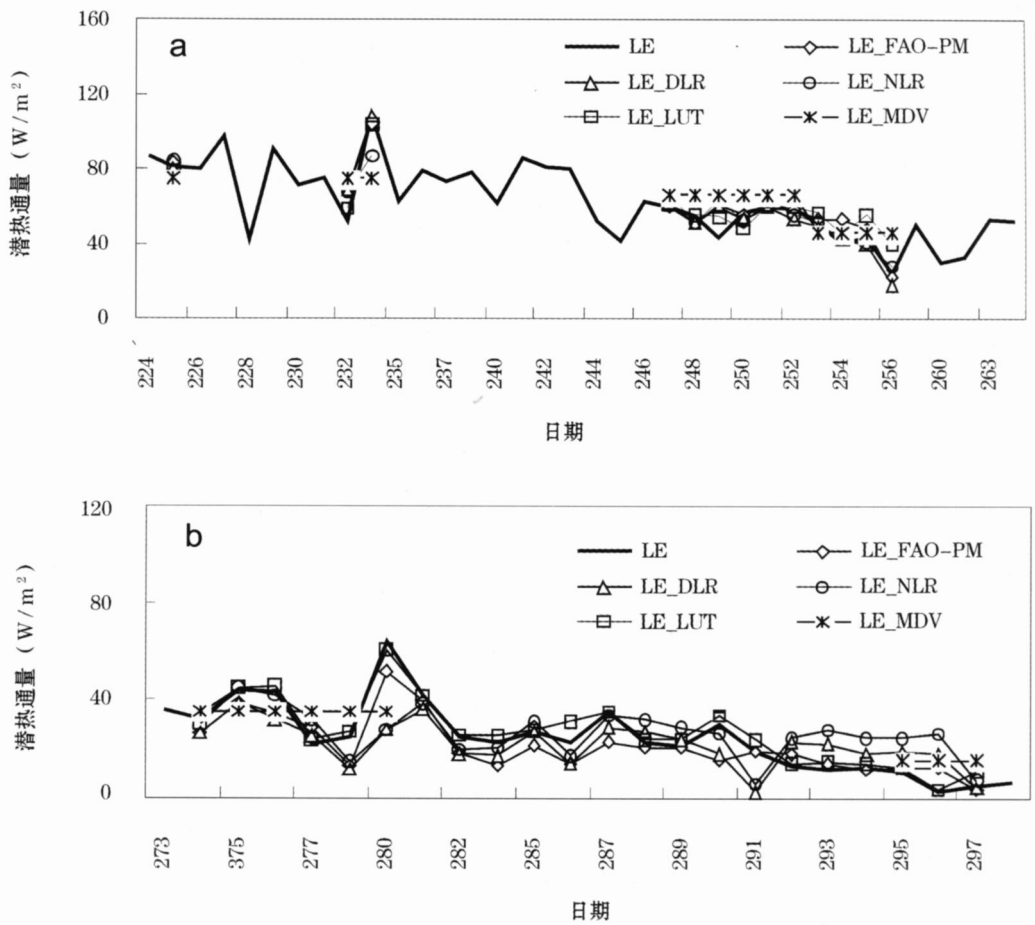


图 4 日数据缺失情况下不同插补方法的比较

Fig 4 Comparison of different gap filling method in diurnal data missing

a 为 224~259 天, b 为 273~299 天

a is 224 to 259 day, b is 273 to 299 day

表 4 日数据缺失情况下不同插补方法的均方差 (单位:  $W/m^2$ )

Table 4 Root mean square difference of different methods in diurnal data missing (Unit  $W/m^2$ )

	RM SD (LUT)	RMSD (DLR)	RM SD (MDV)	RMSD (NLR)	RMSD (FAO-PM)
缺失 1 天	1.83	1.13	6.26	2.96	2.08
缺失 2 天	6.00	11.15	29.15	11.03	12.36
缺失 10 天	7.99	6.37	12.16	7.44	7.36
缺失 24 天	3.05	11.50	-	12.16	7.57

水汽压差分成不同的类别建立查找表对缺失数据进行插补,该方法在各种数据缺失条件下均得到较好的结果;NLR方法主要考虑潜热通量与净辐射的相关关系,通过相关系数( $R^2$ )的限制来插补,如 $R^2$ 太小,需适当扩大所选数据窗口;MDV插补方法主要利用缺失数据前后观测数据进行填补缺失数据,不需要气象数据,可以反映出通量的非线性变化特征,但当环境条件发生明显改变(第228天)以及连续

数据缺失(第247~256天)时,插补结果不能反映出实际环境条件下的通量值。DLR方法除了受气象要素影响外,还与缺失数据前面观测数据(潜热通量)有关系(公式2),当观测数据(潜热通量)波动较大(第228天)时,对缺失数据的插补结果较差。FAO-PM方法用于日缺失数据插补中,该方法是在一定假设条件下(参考蒸发比不变)建立起来的,当假设条件不成立时,该方法会带来较大误差

(第 232 254天)。

下面采用不同的方法插补得到 2007年密云站蒸散量。LUT、DLR、NLR 方法对 30 分钟数据缺失及日数据缺失均可采用,而 FAO-PM 方法及 HANTS 方法只针对日缺失数据进行插补,30分钟数据缺失的插补则结合 NLR 方法。MDV 方法在连续多天数据缺失时会带来较大的误差,以下计算年蒸散量时并未使用。图 5 为 5 种不同的插补方法计算的 2007年密云站的蒸散量。

从图 5看到:各种插补方法插补蒸散量的变化趋势比较一致,大小上存在一定的差异。由 LUT、DLR、NLR、HANTS、FAO-PM 方法得到的年蒸散量分别为 395.8mm、409.9mm、393.5mm、390.7mm、399.4mm。不同方法计算年蒸散量的差异在 2.3~19.2mm之间变化(0.6%~5%),对年蒸散量影响很小。这一研究结果与以往的研究结论类似,如 Alavizadeh等<sup>[4]</sup>比较了 DLR方法与 NLR方法,两者的年蒸散量可产生 3%的差别;而 Falge等<sup>[5]</sup>利用 28个全球通量观测网络(FluxNet)站点数据对 MDV方法与 LUT方法计算结果进行了比较,两种插补方法计算的年蒸散量差异在-48~86mm之间变化。

3.3 2007年密云站涡动相关仪观测蒸散量的插补效果的分析

通过上面分析可知,无论对 30分钟数据缺失还是日数据缺失,LUT方法均得到较好的插补效果。本文采用 LUT方法对密云站 2007年一年观测数据进行插补,得到一年连续的蒸散量(潜热通量),并将插补结果与净辐射、降水量以及 LAS观测潜热通量进行比较和分析,结果见图 6~8。

净辐射是蒸散过程的能量供给源,同时在密云观测场没有人工灌溉,降水是果树与作物的水分来源,因此净辐射与降水量是影响蒸散量(潜热通量)变化的主要因子,从蒸散量(潜热通量)与两者之间

的变化趋势可对蒸散量(潜热通量)的插补效果做出定性的评价。

图 6为插补后涡动相关仪观测潜热通量与净辐射的比较,可以看到两者有较好的相关关系,并且两次较长时间数据缺失的插补结果与净辐射有明显的正相关关系。

降水发生后,地表较湿润,可供蒸发的水分较多,蒸散量会明显增大,由图 7看到 2007年蒸散量年变化符合这种趋势,一定程度上说明插补结果的准确性。2007年密云站年降水量为 623.8mm,插补后年蒸散量为 395.8mm,年蒸散量占降水量的 63.4%。利用涡动相关仪观测地表通量存在能量平衡不闭合现象<sup>[1,19]</sup>,2007年密云站能量闭合率为 85%(土壤热通量采用 Yang等<sup>[20]</sup>方法订正至地表)。本文采用两种方法进行能量闭合订正<sup>[21]</sup>,一是认为感热通量的测量准确,潜热通量作为能量平衡的余项求出,得到年蒸散量为 545.2mm,占降水量的 87.4%;二是利用涡动相关仪测量的显热和潜热通量计算出波文比系数,然后重新分配可利用能量,得到显热和潜热通量,其中得到的年蒸散量为 509.9mm,占降水量的 81.7%,与 Li等<sup>[22]</sup>结论一致。

密云站有 LAS的观测,LAS与涡动相关仪测量的潜热通量代表了不同的空间观测尺度(其中 LAS具有更大的观测尺度)。由于观测场下垫面的非均一性(图 1),两者通量贡献源区内的地物差异较大,同时涡动相关仪测量的通量存在低估现象,因此两者观测的潜热通量在数值上存在一定的差异,但变化趋势上是比较一致的,因此可以利用 LAS观测数据来检验涡动相关仪观测数据的插补效果。图 8为插补后的涡动相关仪测量潜热通量与 LAS测量潜热通量的比较。从图中看到:LAS测量潜热通量与涡动相关仪测量潜热通量变化趋势比较一致,但在

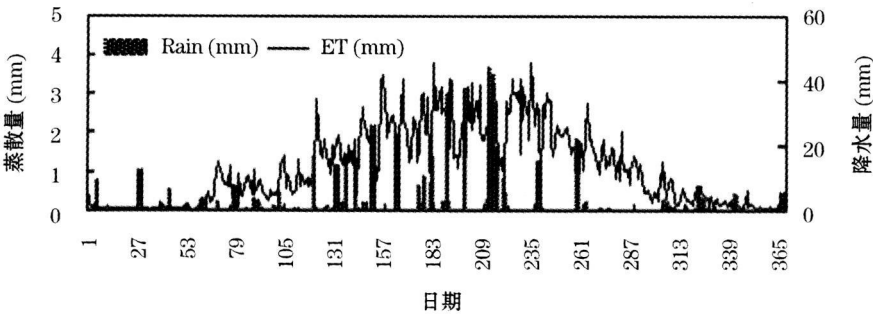


图 7 涡动相关仪观测的蒸散量与降水量的比较

Fig 7 Comparison of latent heat flux measured by EC with rainfall



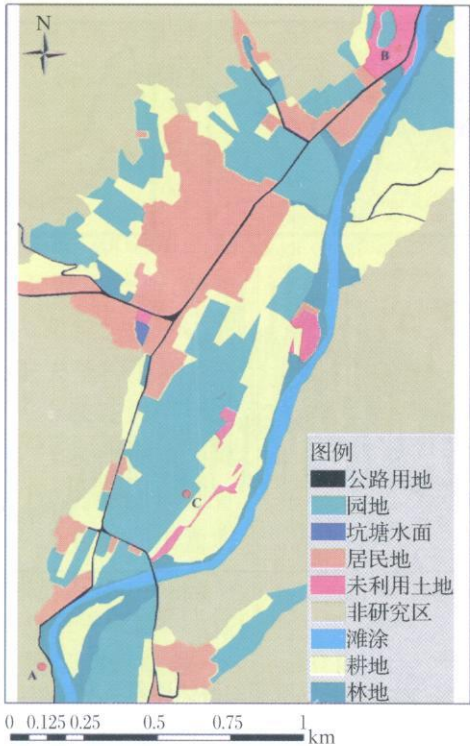


图 1 观测站示意图

Fig.1 Map of observed station

A 点为 LAS 接收端,B 点为 LAS 发射端,C 点为涡动相关仪与自动气象站

A is the receiver part of LAS, B is the transmitter part of LAS, C is the location of eddy covariance system and automatic weather station

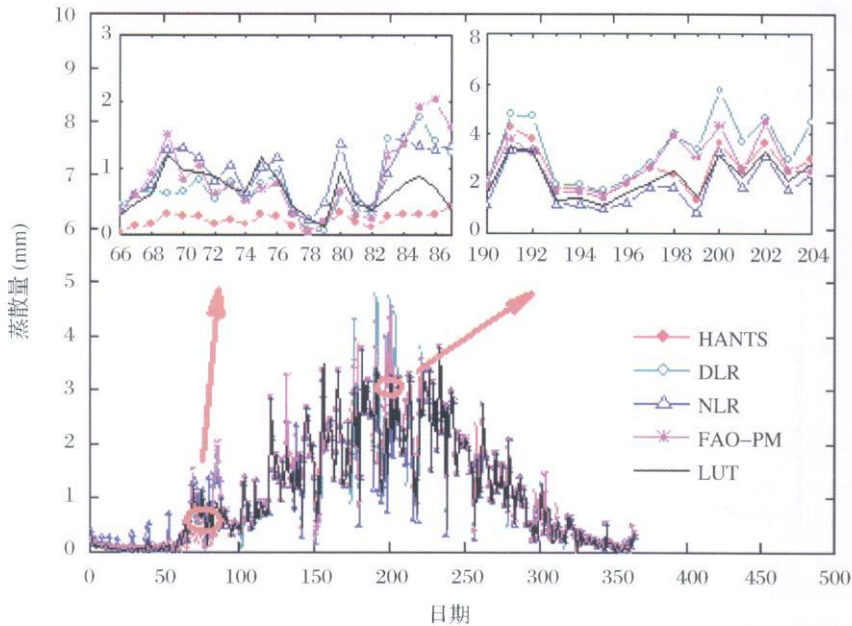


图 5 不同插补方法计算的密云站 2007 年蒸散量

Fig.5 Comparison of evapotranspiration filled by different gap filling methods in 2007

内部小图为两次连续数据缺失(66~87 天和 190~204 天)各种方法的插补效果

Inner figure explicates the results of different gap filling methods from 66 to 87 day and 190 to 204 day



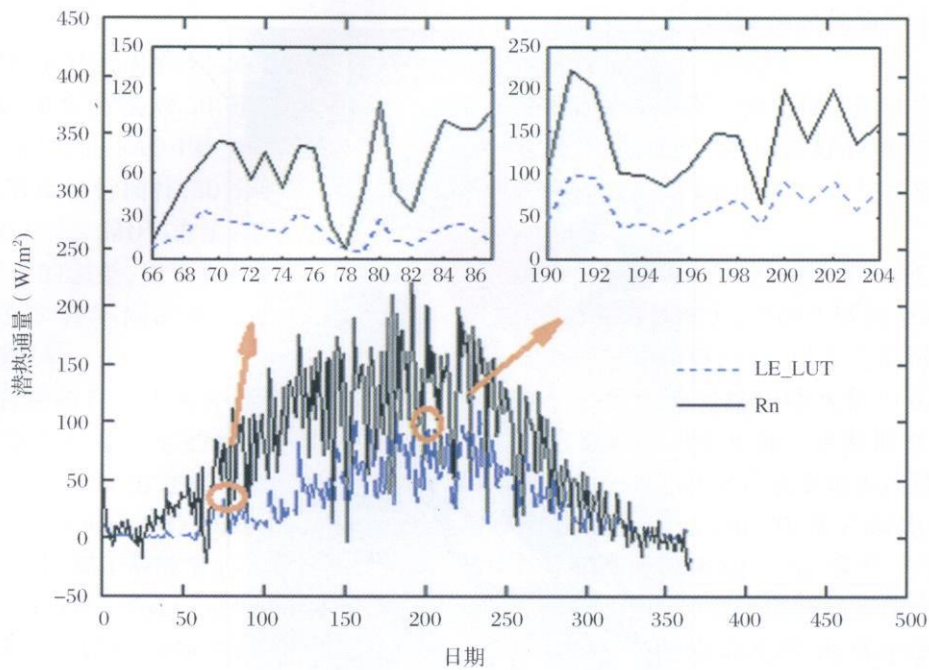


图 6 涡动相关仪观测的潜热通量与净辐射的比较

Fig. 6 Comparison of latent heat flux measured by EC with net radiation

内部小图为两次连续数据缺失(66 ~ 87 天和 190 ~ 204 天)的插补效果

Inner figure explicates the results of gap filling method from 66 to 87 day and 190 to 204 day

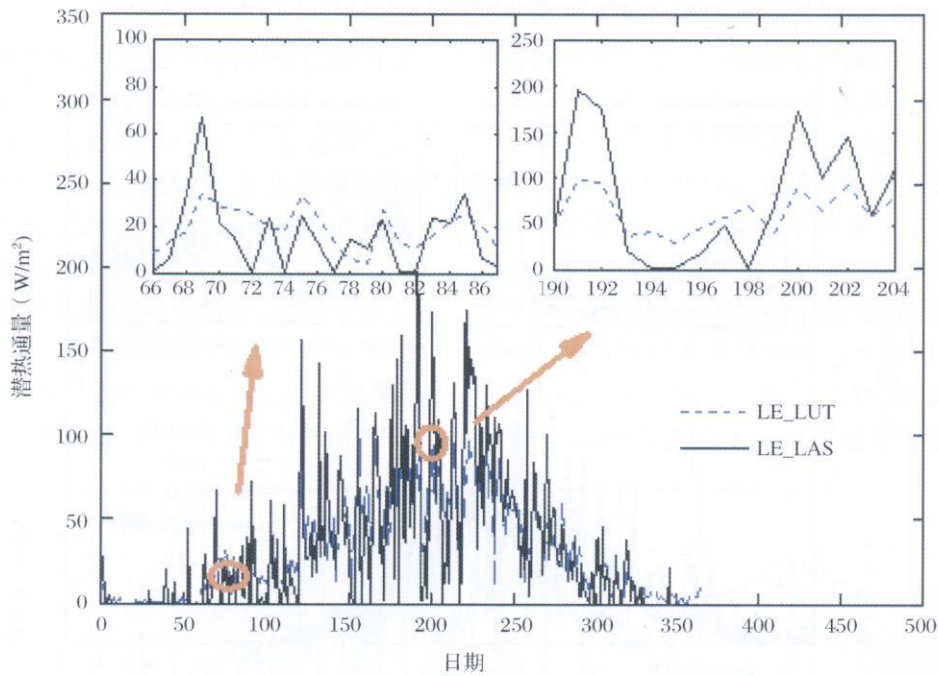


图 8 涡动相关仪观测的潜热通量与 LAS 观测的潜热通量比较

Fig. 8 Comparison of latent heat flux measured by EC with LAS

内部小图为两次连续数据缺失(66 ~ 87 天和 190 ~ 204 天)的插补效果

Inner figure explicates the results of gap filling method from 66 to 87 day and 190 to 204 day

数值上存在一定的差异。

通过对插补后蒸散量(潜热通量)与净辐射、降水量和 LAS 测量潜热通量的比较分析,表明插补结果是合理可信的。

## 4 结论与讨论

文中采用 6 种不同方法对密云站 2007 年的涡动相关仪观测的蒸散量进行插补和效果分析,结果表明:

(1) LUT 方法在不同的数据缺失条件下插补结果较稳定,且插补效果较好;MDV 方法在短时间数据缺失时插补效果较好,且可用于气象数据缺失时数据的插补;NLR、DLR 以及 FAO-PM 方法可以很好地反映出数据的变化趋势,NLR 方法更适合于短时间数据缺失的插补,DLR 及 FAO-PM 方法在观测数据(潜热通量)出现连续波动时插补结果较差。

(2) 不同的插补方法对年蒸散量的影响较小,由 LUT、DLR、NLR、HANTS、FAO-PM 方法得到的年蒸散量分别为 395.8 mm、409.9 mm、393.5 mm、390.7 mm、399.4 mm,差异在 2.3~19.2 mm 之间变化。对 LUT 方法得到的年蒸散量(潜热通量)与净辐射、降雨量以及 LAS 观测的潜热通量作了比较分析,表明插补结果合理。

(3) 目前针对涡动相关仪观测数据的插补还没有统一的方法,尤其针对潜热通量,插补方法还在不断的发展之中。本文是一个简单的尝试,还存在很多的不确定性,需要在以后的研究中不断完善。

## 参考文献 (References):

- [1] Aubinet M, Grelle A, Brm A, *et al*. Estimates of the annual net carbon and water exchange of European forests: The EUROFLUX methodology [J]. *Advances in Ecological Research*, 2000, 30: 113-175.
- [2] Baldocchi D D. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: Past, present and future [J]. *Global Change Biology*, 2003, 9: 479-492.
- [3] Falge E, Baldocchi D D, Olson R, *et al*. Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 107: 43-69.
- [4] Alavi N, Warkand J S, Berg A A. Filling gaps in evapotranspiration measurements for water budget studies: Evaluation of a Kalman filtering approach [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 141: 57-66.
- [5] Falge E, Baldocchi D D, Olson R, *et al*. Gap filling strategies for long term energy flux data sets [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 107: 71-77.
- [6] Moffat A M, Papale D, Reichstein M, *et al*. Comprehensive comparison of gap-filling techniques for eddy covariance net carbon fluxes [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2007, 147: 209-232.
- [7] Bebigier P, Bonnefond J, Melmann P. CO<sub>2</sub> and water vapour fluxes for 2 years above Euroflux forest site [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 108: 183-197.
- [8] Schmit A, Wzesinsky T, Klemm O. Gap filling and quality assessment of CO<sub>2</sub> and water vapour fluxes above an urban area with radial basis function neural networks [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2008, 126: 389-413.
- [9] Verhoef W. Application of Harmonic Analysis of NDVI Time Series (HANTS) [C] // Azzali Menenti eds. Fourier Analysis of Temporal NDVI in the Southern African and American continents. Wageningen: Report of DLO Winand Staring Centre, The Netherlands, 1996.
- [10] Allen R G, Pereira L A, Raes D, *et al*. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements [M]. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. FAO, Rome, Italy, 1998.
- [11] Andrés V, Scott Beare, Hem in Zhang, *et al*. Evaluating MODIS data for mapping wildlife habitat distribution [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112: 2160-2169.
- [12] Waters R, Allen R G, Bastiaansen W. Surface energy balance algorithms for land: Advanced Training and Users Manual, Version 1.0 [Z], 2002.
- [13] Xu Z wei, Liu Shaomin, Gong Lijuan, *et al*. A study on the data processing and quality assessment of the eddy covariance system [J]. *Advances in Earth Science*, 2008, 23(4): 357-370. [徐自为, 刘绍民, 宫丽娟, 等. 涡动相关仪观测数据的处理与质量评价研究 [J]. 地球科学进展, 2008, 23(4): 357-370.]
- [14] Baldocchi D D, Falge E, Wilson K. A spectral analysis of biosphere-atmosphere trace gas flux densities and meteorological variables across hour to multi-year time scales [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 107: 1-27.
- [15] Sumner D M, Jacobs J M. Utility of Penman-Monteith Priestley-Taylor reference evapotranspiration and pan evaporation methods to estimate pasture evapotranspiration [J]. *Journal of Hydrology*, 2005, 308: 81-104.
- [16] Geir E. The ensemble Kalman filter: Theoretical formulation and practical implementation [J]. *Ocean Dynamics*, 2003, 53: 343-367.
- [17] Xi Ge, Liu Shaomin, Jia Li. Estimation of regional evapotranspiration and ecological water requirement of vegetation by remote sensing in the yellow river delta wetland [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(11): 5356-5369. [奚歌, 刘绍民, 贾立. 黄河三角洲湿地蒸散量与典型植被生态需水量的遥感研究 [J]. 生态学报, 2008, 28(11): 5356-5369.]
- [18] Wang D an, Jiang Xiaoguang, Tang Lingli, *et al*. The application of time-series Fourier analysis to reconstructing cloud-free NDVI images [J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2005, 64(2): 29-32. [王丹, 姜小光, 唐伶俐, 等. 利用时间序列傅立叶分析重构无云 NDVI 图像 [J]. 国土资源遥感, 2005, 64(2):

29-32 ]

[ 19] Wilson K B, Goldstein A H, Falge E, *et al*. Energy balance closure at FLUXNET sites[ J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002 113: 223-243

[ 20] Yang Kun, Wang Jiem in. A temperature prediction-correction method for estimating surface soil heat flux from soil temperature and moisture data[ J]. *Science in China (Series D)*, 2008, 51

( 5): 721-729

[ 21] Twine T E, Kustas W P, Norman J M, *et al*. Correcting eddy-covariance flux underestimates over a grassland[ J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000 103: 279-300.

[ 22] Li Shenggong, Asanuma J, Kotani A, *et al*. Evapotranspiration from a Mongolian steppe under grazing and its environmental constraints[ J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 333: 133-143

# Comparison of the Gap Filling Methods of Evapotranspiration Measured by Eddy Covariance System

XU Ziwei<sup>1</sup>, LIU Shaomin<sup>1</sup>, XU Tongren<sup>1</sup>, WANG Jiem in<sup>2</sup>

( 1 State Key Laboratory of Remote Sensing Science, School of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2 Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

**Abstract** Data missing is inevitable in long-term eddy covariance system measurement. Several gap filling methods are chosen and applied in the data sets of Miyun station in 2007. These methods include mean diurnal variation (MDV), look-up tables (LUT), nonlinear regressions (NLR), Dynamic linear regression (DLR), Harmonic analysis of time series (HANTS) as well as the method of Penman-Monteith recommended by Food and Agricultural Organization (FAO-PM). The impacts of different gap filling methods on the evapotranspiration are investigated and the results are tested. The result shows LUT method is stable in every data missing cases (RMSE less than 8 W/m<sup>2</sup>); MDV and NLR methods are more suitable for short data missing. The gap filling results of DLR and FAO-PM methods are not good if the observed data have large change continuously. The Annual ET obtained by LUT, DLR, NLR, HANTS, FAO-PM methods are 395.8mm, 409.9mm, 393.5mm, 390.7mm, 399.4mm. The difference between annual ET filled by different methods resulted in a range of 2~19.2mm per year. The annual ET obtained by LUT method is compared to net radiation, precipitation and latent heat flux measured by LAS. It is shown that the results are reasonable.

**Key words** Eddy covariance system; Evapotranspiration; Data missing; Gap filling methods