

西北内陆河流域典型生态系统通量数据空间代表性研究

张琨, 韩拓, 朱高峰, 白岩, 马婷

(兰州大学西部环境教育部重点实验室, 干旱环境与气候变化协同创新中心, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 涡度通量数据的空间代表性问题是影响其数据质量不确定性的重要原因。选取了我国西北地区具有代表性的四个通量观测站生长季数据, 采用FSAM模型对各站点通量贡献源区范围以及通量贡献最大值点进行了计算, 给出了在不稳定与稳定两种大气层结条件下各站点源区的主要分布范围($P=80%$): 盈科站源区范围相对最小(90~200 m); 阿柔站源区范围约为(120~140 m); 关滩站源区范围约为(500~600 m); 敦煌站源区范围约为(140~280 m)。同时结合各站点仪器架设高度以及不同的下垫面生态环境等因素, 对通量源区的变化进行了初步分析, 仪器的架设高度直接影响涡度源区范围; 不同的下垫面生态环境形成不同的近地面湍流状态进而对通量源区的分布产生间接影响。结果表明各站点观测的通量信息基本均来源于所感兴趣的研究区域。

关键词: 涡度相关; 通量源区; FSAM; 西北内陆河流域

中图分类号: P41

文献标识码: A

文章编号: 1000-6060(2015)04-0743-10(743~752)

随着全球变化的日益加剧, 陆地表层地气间的碳通量与水热通量的变化也越来越受到关注^[1-2]。在近地层, 大气中的热量和水汽的传输受到湍流运动的支配^[3], 自20世纪90年代以来, 基于微气象理论的涡度相关技术逐渐发展成熟, 开辟了直接监测生态系统通量过程的途径。涡度相关技术(Eddy Covariance Technique)是目前测定地-气交换最好的方法之一, 已经广泛的应用于估算陆地生态系统中的物质与能量交换中^[4-7]。目前, 世界各地已经建立了多个通量观测网络: 美洲的AmeriFlux, 欧洲的EuroFlux, 亚洲的AsiaFlux以及我国的China Flux等。

但是, 涡度相关仪通常被架设于距离地面一定高度的位置, 其测得的观测值反映的是其周围某一定范围下垫面的情况。而在实际的生态系统中, 由于气象条件以及下垫面非均质性等问题的复杂程度, 仪器观测到的通量值可能不完全来自于感兴趣的研究区域, 这就导致了涡度观测值的不确定性。因此, 如何有效的寻找并确定涡度通量观测足迹与源区范围, 对于涡度观测数据的质量控制与数据运

用理解有很大的帮助, 也可以为建立通量塔选址问题提供一定的参考。

在涡度通量源区的研究方面, 国外学者的研究起步较早。目前为止已建立了多种计算涡度源区的模型, 主要有: 通量解析模型、拉格朗日随机粒子模型、大涡数值模拟等^[8-9]。相比较而言, 大涡数值模拟被认为是最具有潜力的湍流数值模拟方法^[10], 但该方法计算耗费巨大, 其实际应用受到一定的限制。此外, 由印地安那大学Schmid研究团队提出的FSAM(Flux Source Area Model, FSAM)模型^[11-12]作为通量解析模型的代表, 具有参数化程度高、运算机制简明的特点, 近些年来在国内的涡度源区研究工作中得到了广泛的应用: 赵晓松^[13]用该模型对东北长白山阔叶红松林全年通量观测数据进行了分析, 主要针对生长季与非生长季不同大气条件下涡度源区的范围进行了计算, 得到观测站点通量75%以上来自于目标观测区。米娜^[14]用该模型对China-Flux通量网中各个主要站点的观测数据进行了统计分析, 从观测高度、盛行风向、空气动力学粗糙度

收稿日期: 2014-11-12; 修订日期: 2015-01-17

基金项目: 国家重大科学研究计划(973计划)项目(2013CB956604); 国家自然科学基金项目(31370467)

作者简介: 张琨(1990-), 男, 甘肃天水人, 在读硕士研究生, 主要从事干旱区生态-水文过程研究. Email: zhangk12@lzu.edu.cn

通讯作者: 朱高峰(1978-), 男, 博士, 副教授. Email: zhugf@lzu.edu.cn

以及大气层结稳定度方面对源区的影响进行了系统分析。楚良海^[15]基于该模型计算了黄土高原沟壑区冬小麦不同生长阶段的通量数据空间代表性。周琪^[16]采用该模型对我国西北干旱区荒漠生态系统的通量观测源区进行了计算分析。

立足于我国西北内陆河流域,采用FSAM模型,通过对位于不同生态系统中的通量站的观测数据进行处理,计算得到各自通量源区的分布状况,为通量数据的空间代表性以及质量控制等问题提供必要的科学参考依据^[17]。

1 研究区与研究方法

1.1 研究区概况

共选取西北内陆河流域典型生态系统4个通量站数据进行分析,分别代表了绿洲农田、高寒草地、森林以及荒漠绿洲这几种西北内陆地区典型的生态系统类型。研究数据来源于中国科学院黑河流域生态-水文过程综合遥感观测联合试验以及兰州大学敦煌生态水文观测站。各站点具体情况以及研究时段如表1所示,位置分布如图1所示。

表1 各观测站点基本信息

Tab.1 Information about the observation stations

缩写	经度/°E	纬度/°N	传感器	架设高度/m	植被类型	植被均高/m	研究时段
盈科	100.41	38.86	CSAT3;Li-7500	2.81	玉米农田	1.5	2011.6.10 ~ 2011.6.19
阿柔	100.46	38.04	CSAT3;Li-7500	3.15	高寒草地	0.2 ~ 0.3	2011.6.10 ~ 2011.6.19
关滩	100.25	38.53	CSAT3;Li-7500	20.25	云杉森林	15 ~ 20	2011.6.10 ~ 2011.6.19
敦煌	94.1	39.9	WM Pro;Li-7500	4	绿洲葡萄园	2	2013.7.12 ~ 2013.7.23

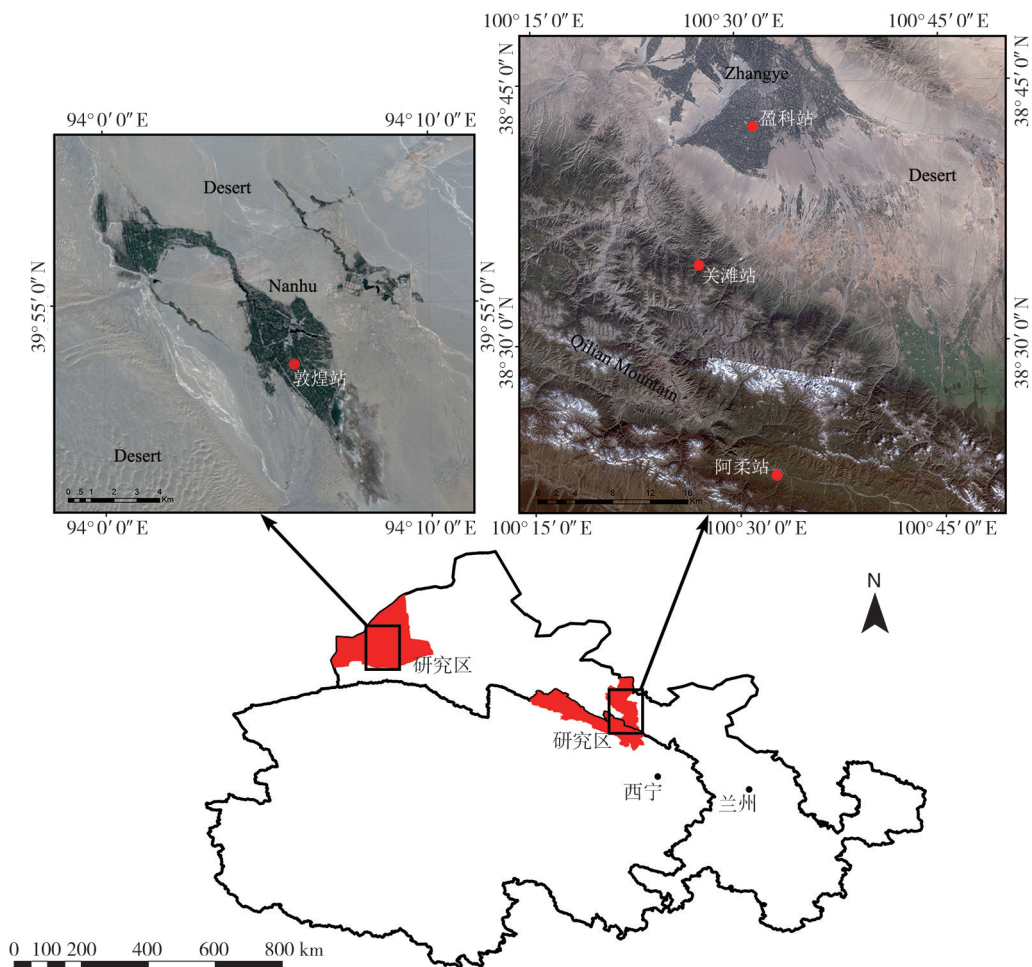


图1 研究区示意图

Fig.1 Location of study areas

1.2 研究方法

1.2.1 FSAM模型原理 在进行通量观测时,常将传感器安装至高于下垫面某一高度处,其测得的通量观测值是同时刻位于通量塔上风向某片区域通量贡献强度的综合反映。基于Horst-Weil方法^[18],假设观测塔位置为坐标原点,主风向方向为x轴,侧风向为y轴,以此建立空间直角三维坐标系,传感器所测得通量大小 $F(0,0,z_m)$ 可表示为:

$$F(0,0,z_m) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} Q(x,y,0) f(x,y,z_m) dx dy \quad (1)$$

式中: $Q(x,y,0)$ 表示为上风向下垫面某点 (x,y) 源或汇强度; $F(0,0,z_m)$ 即footprint函数,也称为源权重函数,表示为下垫面某点 (x,y) 对涡度传感器通量贡献率密度,将下垫面源或汇的分布与涡度传感器观测信息有效的联系起来。如图2所示,由于水平平流的作用,处于坐标原点附近区域对传感器观测高度处的贡献几乎趋近于零。因此,footprint函数在距离观测点近的地方较小,随着与坐标原点距离的增大其值逐步增大并达到最大值,随后在各个方向上逐渐下降。所以,footprint函数大小与其距观测原点的距离密切相关。图中虚线表示为当源权重函数为 P 时的等值线,它是用来衡量所关注的研究区域对观测通量的贡献度指标,其在下垫面的投影区域即为通量贡献度为 P 时源区的范围。选取不同的 P 值分别有不同的源区范围与之对应,FSAM模型可提供通量贡献度为10%~90%的水平范围内源区分布的情况。

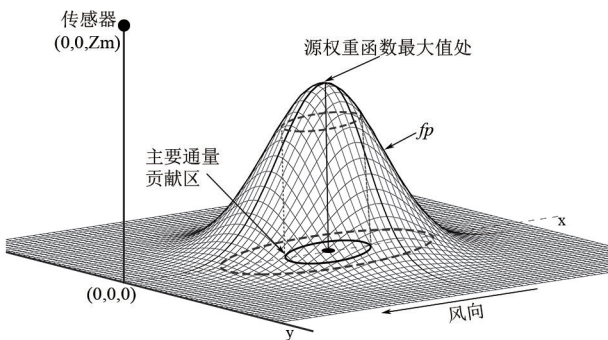


图2 FSAM模型空间示意图

Fig.2 Sketch map of the FSAM model

FSAM模型通过对连续点源浓度分布的模拟近似求得footprint函数,首先假设下垫面单位点源浓度分布符合下式^[18]:

$$C(x,y,z) = \frac{D_y(x,y) D_z(x,z)}{U(x)} \quad (2)$$

式中: $U(x)$ 为x方向平流有效扩散速度; D_y 与 D_z 分别表示侧风向与垂直向的浓度分布函数;基于梯度输送 K 理论,表面点源垂直涡度通量可表示为:

$$F(x,y,z) = -K_c(z) \frac{\partial C(x,y,z)}{\partial z} - K_c(z) \frac{D_y(x,y)}{U(x)} \times \frac{\partial D_z(x,z)}{\partial z} \quad (3)$$

式中: $K_c(z)$ 为湍流扩散率。通常情况下,使表面点源侧风向扩散浓度符合高斯分布,对上式y方向积分,得到侧风向的积分通量:

$$\overline{F^y} = - \frac{\partial D_z(x,z)}{\partial z} \times \frac{K_c(z)}{U(x)} \quad (4)$$

$$D_y(x,y) = \frac{e^{-\frac{(y-\mu)^2}{2\sigma_y^2}}}{\sigma_y \cdot \sqrt{2\pi}} \quad (5)$$

式中: σ_y 为侧风向风速标准差; μ 指服从高斯分布点源浓度的均值,由于是侧风向浓度分布,因此 $\mu=0$;将(3)、(4)、(5)联立,得:

$$F(x,y,z) = D_y(x,y) \cdot \overline{F^y} \quad (6)$$

对于侧风向源权重函数累积,可通过二维平流扩散方程与侧风向浓度积分 $\overline{C^y}$ 和平均风速廓线 $\overline{U}(z)$ 相联系起来:

$$\overline{U}(z) = \frac{\partial}{\partial x} \overline{C^y} = - \frac{\partial}{\partial z} \overline{F^y} \quad (7)$$

通过对(7)式在z方向上积分,得:

$$\overline{F^y} = - \int_0^{z_m} \overline{U}(z) \times \frac{\partial}{\partial x} \overline{C^y} \times dz \quad (8)$$

综上,则二维通量footprint函数可表示为:

$$f(x,y,z) = \frac{F(x,y,z)}{F_u} = \frac{1}{F_u} \times D_y(x,y) \quad (9)$$

式中: F_u 表示表面源强; $f(x,y,z)$ 为垂直湍流通量。在 P 水平下,通量源区的范围可表示为在能够达到 P 水平贡献度时的最小范围 Ω_p 上对footprint函数的积分,即 P 水平源区范围是footprint上风向整体积分的一部分。

$$P = \frac{\Phi_p}{\Phi_{total}} = \frac{\int_{\Omega_p} F(x,y,z_m) dx dy}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} F(x,y,z_m) dx dy} \quad (10)$$

1.2.2 FSAM模型参数计算 FSAM模型由于物理机制明确,运算相对简单,在通量源区的计算方面得到了广泛的应用。该模型主要由3个输入参数驱动,分别是 z_m/z_0 ; z_m/L ; σ_y/u_* 3个复合参数函数。其中, z_m 表示为传感器有效高度, z_0 表示为粗糙度, L 为奥布霍夫长度, σ_y 为侧风向风速标准差, u_* 为摩擦风速。

(1) z_m/z_0 的计算:地表粗糙度作为模型中最为重要的参数之一,其计算的准确与否对于模型结果有着至关重要的影响。对于粗糙度的求解目前有多种方法^[19-21],如:拟合迭代法、风速廓线法等。利用Monion-Obukhov相似性理论,选择属于中性层结条件的数据,结合摩擦风速对 z_0 进行求解。大气层结中性条件下,在相对平滑的平面和矮杆作物上,风速可以表示成高度的函数^[22]:

$$u = \frac{1}{k} u_* \ln\left(\frac{z}{z_0}\right), \quad (11)$$

式中: u 为风速($m \cdot s^{-1}$); k 为卡曼常数,取0.4; u_* 为摩擦风速($m \cdot s^{-1}$)。为了进一步减弱风速与摩擦风速观测异常值对计算结果的影响,可通过经验公式结果对计算过程进行控制。 z_m 为考虑了零平面位移状态下的有效观测高度,对于零平面位移的求解采取由Stanhill提出的经验公式^[23]进行计算:

$$\lg d = 0.979 \lg H - 0.154, \quad (12)$$

式中: H 为热通量。

(2) z_m/L 的计算:作为稳定度参数,Obukhov长度(L)可根据以下公式进行求解^[24]:

$$L = \frac{-\rho \times u_*^3 \times C_p \times T_a}{k \times g \times H}, \quad (13)$$

式中, g 为重力加速度,取 $9.81 m \cdot s^{-2}$; ρ 为空气密度($kg \cdot m^{-3}$); C_p 为定压比热,取 $1.005 J \cdot (kg \cdot K)^{-1}$; T_a 为大气温度(K); k 为卡曼常数,取0.4; H 为热通量($W \cdot m^{-2}$); u_* 为摩擦风速($m \cdot s^{-1}$)。 H 与 u_* 均由涡度传感器直接测出,再根据大气稳定状态分别计算出不同条件下的稳定度参数。

(3) σ_y/u_* 的计算:侧风向风速标准差与摩擦风速,可直接由超声风速仪测得,再根据不同条件选择相应的数据进行计算。另外,为保证FSAM模型的正常运行,输入参数理论上应达到以下条件^[11]:

表2 FSAM模型参数输入要求

Tab.2 Input variables of the FSAM model

	z_m/z_0	z_m/L	σ_y/u_*
稳定条件	$1.2 \times 10^{-2} \sim 5.0 \times 10^{-2}$	$2.0 \times 10^{-4} \sim 1.0 \times 10^{-1}$	1.0 ~ 6.0
不稳定条件	$4.0 \times 10^{-2} \sim 1.0 \times 10^{-1}$	$4.0 \times 10^{-4} \sim 1.0$	1.0 ~ 6.0

输入满足模型要求的参数,即可得到不同 P 水平的源区范围参数。FSAM模型可输出通量贡献率为10%~90%的不同源区的范围参数,包括: a/z_0 , d/z_0 , e/z_0 , X_m/z_0 , X_d/z_0 ;如图3所示, a 代表源区等值线近端距观测原点的距离, d 表示源区等值线上距 x 轴最大距离, e 表示源区等值线远端距观测原点的距离, X_m 为footprint函数最大值距观测原点的距离, X_d 为源区等值线上距 x 轴最大距离的点到轴的距离。

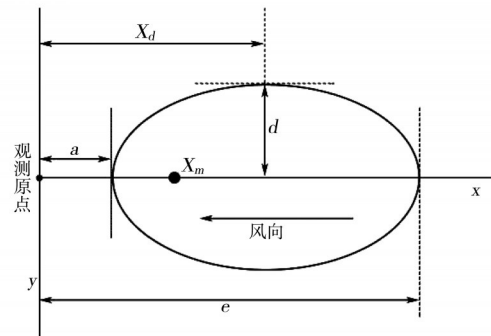


图3 模型输出参数示意图

Fig.3 Output variables of the FSAM model

2 结果与分析

2.1 各站点风向信息统计

涡度源区的分布范围与当地风向状况密切相关,在研究评价通量站点的源区分布范围时必须重点考虑研究时期风速风向的影响。本文对各研究站点在各自研究期内的风向信息做了统计分析,并据此给出了以22.5度为步长的风向频率统计图,可以清楚的看出各站点主风向的差异情况。如图4所示,在研究期内,阿柔站以南风-西南风为主(52.4%),关滩站则以南风-东南风为主(53.1%),敦煌站以北风-东北风为主(60.7%),盈科站在其研究期内风向状况较为复杂(东北:18.8%;东南:15.6%;西南:30.3%;西北:35.3%),因此主要还是以西风为主。

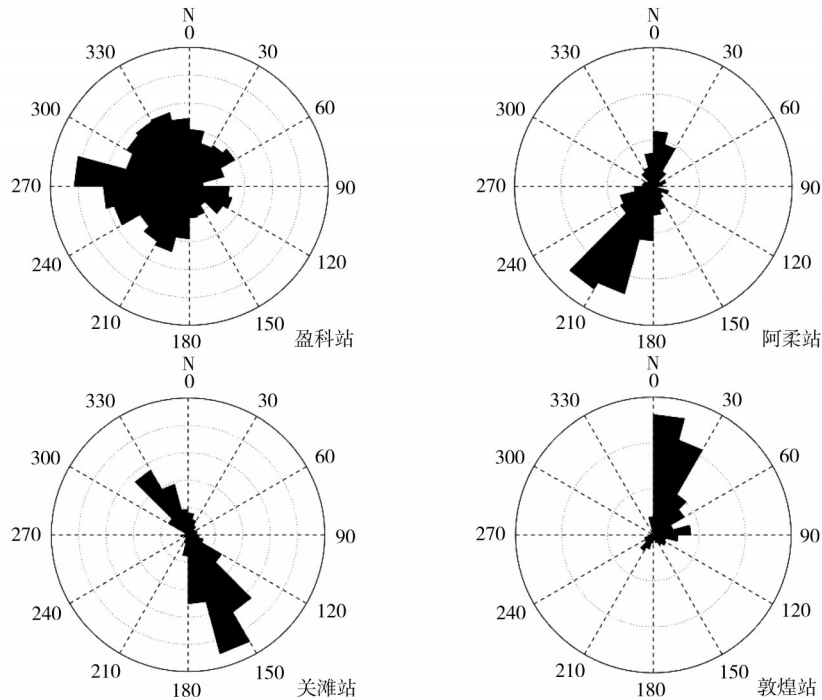


图4 各研究站点在研究期内风向频率图

Fig.4 Wind direction frequency of each study site during the study period

2.2 不同大气层结状态下对各站点通量源区范围

由于涡度相关技术是基于不连续涡流中水汽浓度上下扩散的测量,通过对各种属性的湍流脉动值来直接测量它们的通量^[25],而大气边界层的稳定度与大气湍流密切相关,大气层结的稳定与否是决定了湍流的强弱。目前常用的衡量大气稳定度的参数主要有两种,分别是基于湍流能量方程的理查逊数 R_i 和基于 $Monion-Obukhov$ 相似理论使用量纲分析法的 $Monion-Obukhov$ 参数,即 $\zeta=z/L$ 。大气稳定时, L 与 ζ 均 >0 , ζ 越大, L 越小,表示大气越稳定;不稳定时, ζ 与 L 均 <0 , $|\zeta|$ 越大, $|L|$ 越小,表示大气越不稳定;中性时,由于 $H=0$,则 $L\rightarrow\infty$, $\zeta=0$ 。通过对各站点在研究期内的数据进行处理,分别计算得到了各站点在稳定与不稳定两种大气

层结下的源区范围分布。模型输入参数如表3所示。可以看出白天大气层结以不稳定状态为主,湍流活动较强,而夜间大气层结比较稳定,湍流活动较弱。

按照源区对通量观测贡献度的不同,绘制了4种不同贡献度源区的基本范围,图中由内至外贡献度分别为20%、40%、60%、80%。在稳定层结下各站点源区的分布范围如图5所示。结合当地主风向,可以看出:(1)关滩森林站的源区范围最大,80%贡献度的源区长度已接近600 m,20%贡献度源区长度约200 m。这是由于关滩站属于森林生态系统,其中以15~20 m的云杉林为主,该站点湍流系统的架设高度远高于其他3个观测站(表1)。因此,其通量源区的范围远大于其它站;(2)阿柔草原

表3 不同大气层结稳定度各站点输入参数

Tab.3 Input parameters for each site with different atmospheric stability

	YK		AR		GT		DH	
	稳定	不稳定	稳定	不稳定	稳定	不稳定	稳定	不稳定
z_m/z_0	13.8		180.1		13.1		12.3	
z_m/L	0.028	-0.082	0.015	-0.019	0.006	-0.013	0.043	-0.025
σ_y/u_*	3.886	3.875	4.233	4.071	2.119	1.952	2.36	2.34
日间数据量	7.8%	76.9%	10.3%	88.6%	22.6%	87.7%	30.7%	70.1%
夜间数据量	92.2%	23.1%	89.7%	11.4%	77.4%	12.3%	69.3%	29.9%

站源区范围则相对最小,且不同的通量贡献度范围分布比较均匀。这是由于该站点仪器架设高度较低,下垫面平坦且均一性较好。其80%贡献度的源区长度接近150 m,20%~60%贡献度的源区长度基本处于50~100 m之间;(3)敦煌绿洲站80%贡献度源区长度接近300 m,20%贡献度源区长度接近80 m,80%贡献度的源区范围较其他贡献度源区范围增长较大;(4)盈科农田站80%贡献度的通量源区长度接近200 m,60%贡献度源区长度骤降至约100 m,20%贡献度源区长度约50 m,且源区形状呈扁椭圆状,这说明该站点最主要的通量来源是分布在通量塔上风向100 m以内的区域。

非稳定层结条件下各站点源区的范围如图6所示,相比较稳定条件其源区范围明显减小。可以看出:(1)关滩森林站的源区范围依旧最大,80%贡献度的源区长度约400 m,20%贡献度的源区长度接近150 m;(2)阿柔草原站源区范围相对较小,相较稳定层结,其80%贡献度的源区长度缩短至120 m,20%贡献度源区长度约为60 m,不同贡献度源区范围变化均匀;(3)敦煌绿洲站80%贡献度源区长度接近150 m,20%贡献度源区长度约50 m;(4)盈科

农田站由于其仪器架设高度最低,80%贡献度通量源区长度约90 m,20%贡献度源区长度约30 m,相比较其稳定层结条件,不同贡献度源区范围的变化较为均匀,但扁椭圆程度更加明显,这是该站点在研究期内侧风向风速较强且处于不稳定层结条件所致。

2.3 通量贡献最大值与最小值距离

通量贡献最大最小值位置具体是指 *footprint* 函数的最大值与最小值在下垫面的投影位置。 d_{max} 表示通量贡献最大点处距观测原点的距离; d_{min} 表示近塔端通量贡献最小点处距观测原点的距离,小于该距离的区域对观测通量不产生影响。本文分别计算了各站点的通量贡献最大与最小点位置,具体情况如表4所示。可以看出,四个站点在不稳定层结下通量贡献最大最小点距离均小于稳定层结。关滩站 d_{max} 与 d_{min} 大于其它3个站点,这与观测站点的仪器安装高度有关。其他3个站点 d_{max} 与 d_{min} 比较接近且相对较小,盈科站在两种层结状态下 d_{max} 均不超过40 m, d_{min} 约为10 m左右,这主要是由于其农田生态系统下垫面粗糙度较大且仪器安装高度较低所致。对比图5与图6,两种大气层结状况下各站点 d_{max} 与其源区范围大小趋势基本一致。

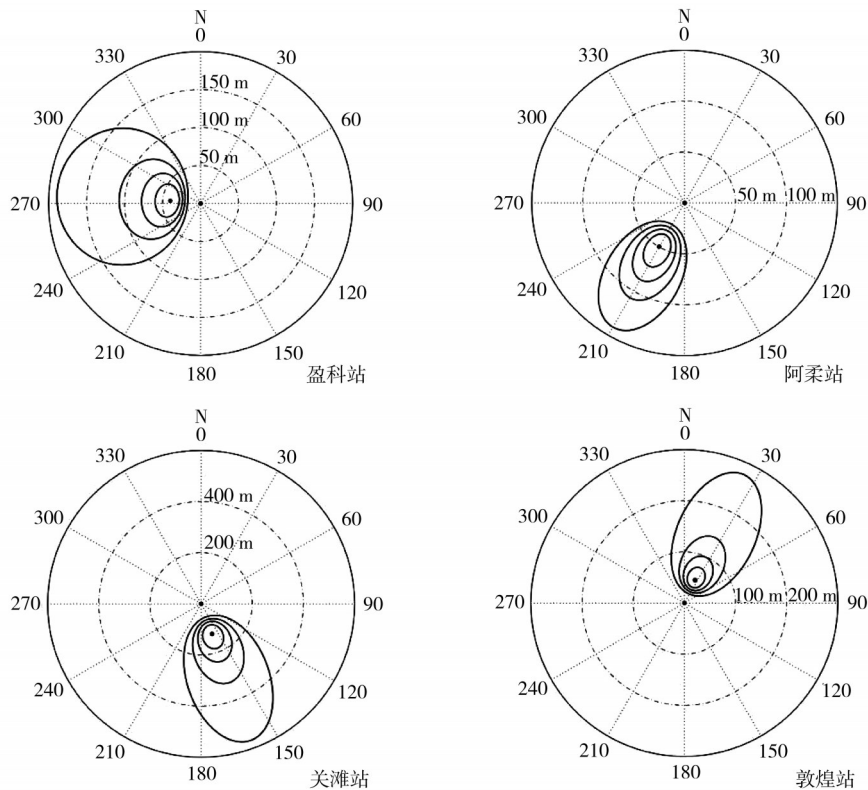


图5 大气层结稳定时各站点源区范围

Fig.5 Source area for each site under stable atmospheric conditions

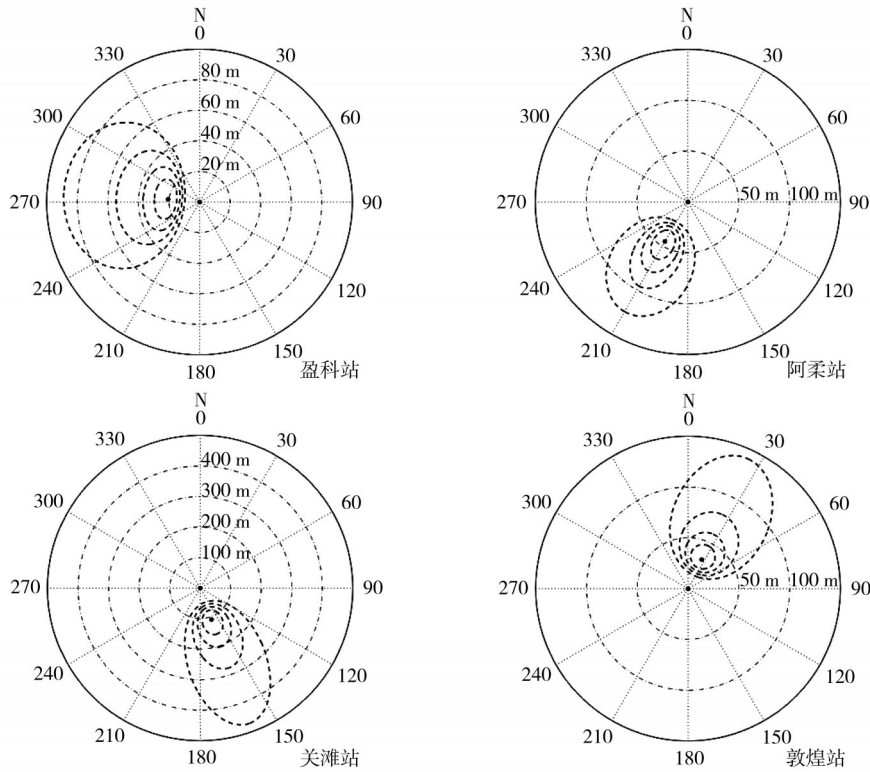


图6 大气层结不稳定时各站点源区范围

Fig.6 Source area for each site under unstable atmospheric conditions

表4 各站点通量贡献最大值(最小值)处距观测原点的距离

Tab.4 Distance between the maximum (minimum) of flux contribution and the observation point

层结状态	YK		AR		GT		DH	
	稳定	不稳定	稳定	不稳定	稳定	不稳定	稳定	不稳定
d_{max}/m	39.8	20.7	49.6	44.8	124.7	109.3	49.3	31.7
d_{min}/m	13.7	7.6	15.9	14.3	43.6	38.5	16.8	11.3

刘绍民等^[26]采用K-M(Kormann and Meixner)模型^[27]对阿柔(2008, 2009)、盈科(2008)和关滩站(2008)不同月份的涡度源区范围做了计算:盈科站源区主要的贡献源区集中在观测站点180 m以内,最大贡献点约在30 m处;阿柔站主要通量贡献源区以观测站点为中心,东西方向长度约400 m南北约200 m,最大贡献点集中在距站点30 m处;关滩站主要通量贡献范围长度距站点约为450 m左右,最大贡献点位于距站点约50 m处。结果对比表明,本文计算的阿柔站主要通量源区范围较小,但最大通量贡献点距离则稍大;盈科站主要源区贡献范围与最大通量贡献点长度比较一致;关滩站的主要通量源区范围本文中计算稍大,而且最大通量贡献点的距离要远>50 m,约110~120 m左右(表4)。造成这

种差异的原因主要是采用通量解析模型的不同以及所选研究时期的不同而造成。

2.4 各站点通量源区范围分析

各站点所在地分别代表着不同的生态系统类型,其下垫面有着不同的物理性质:生态结构与组分、辐射性质、土壤质地和含水量、异质性程度等,而这些因素与各自所在区域的大气运动、温度状态等密切相关,对各区域的湍流状态产生直接影响,进而影响着其通量源区的范围。

盈科站在研究期内下垫面类型为成熟玉米农田,四周均有防风林,防风林间距东西向500 m,南北向距离300 m,观测试验场东西长20 m,南北宽15 m,涡度相关系统安装至观测场西边,相比阿柔与关滩站,人为活动扰动较强。从图4中可以看出

盈科站风向条件比较混乱,并无特别强的主风向。结合图5和图6,由于强烈的侧风向风速扰动,其通量源区呈现扁椭圆状,这可能是由于防护林的作用,大气湍流运动比较复杂,不同贡献度源区的范围分布并不像其他站点规则。在研究期内,其主风向上80%的通量源区均分布在防风林内的农田下垫面上。

敦煌站在研究期内下垫面类型为成熟葡萄,葡萄园四周设有防风林,东西防风林间距160 m,南北间距450 m,涡度相关系统安装在葡萄园内南边的中部区域,在此期间所观测到的通量基本来自于所感兴趣的葡萄下垫面。

阿柔站是草原站,观测试验场东西宽12 m,南北长16 m,涡度相关系统安装在观测场西边,周围地势相对平坦开阔,其下垫面与周围环境比较单一,均为长势良好的夏季牧草,没有绿洲防风林对大气运动的干扰,其不同贡献度源区范围的分布比较规则。在研究期内,该站点通量的主要来源均是所要观测的草原下垫面。

关滩森林站下垫面为15~20 m高的大面积云杉森林,涡度相关系统安装在观测塔上约20 m处,在研究期内,该站点的观测的通量基本来自于所观测云杉森林。

因此,这4个站点的涡度观测数据基本代表了下垫面的性质特征,可为西北内陆河流域典型生态系统与大气之间物质-能量交换特征及其对全球的响应和适应性等相关研究提供可靠的基础数据。

3 结 论

本文通过FSAM模型,对我国西北内陆地区几种典型生态系统的涡度通量源区范围进行了计算。结果表明:以研究期内的主风向为基础(图4),在稳定和不稳定两种大气层结条件下,关滩森林站80%的通量来源于距观测塔约500~600 m处,通量贡献度最大点距观测塔约110~120 m;敦煌绿洲站次之,其80%的通量来源于距观测塔约140~280 m处,通量贡献度最大点距观测塔约31.7~49.3 m;阿柔草原站主要通量贡献范围约在120~140 m之间,通量贡献度最大点距观测塔约44.8~49.6 m;盈科农田站通量源区范围相对最小,80%的通量来源控

制在200 m以内,其中主要的通量贡献长度<100 m,通量贡献度最大点距观测塔约20.7~39.8 m。另外,结合下垫面特征,分析得出在生长季各站点通量观测的主要来源均位于所感兴趣的区域。

对于模型本身,由于FSAM模型是一种简化的通量解析模型,认为观测站周围下垫面是单层均一模式,其不能描述冠层内部的湍流状况,所以在计算高大植被时会存在一定的误差,但目前并没有一种直接准确的方法对涡度通量源区的范围进行有效验证。因此,本文计算结果可作为实际应用中的一种参考,能够为各站点涡度数据的质量评价、通量塔选址以及尺度扩展方面提供一定的科学依据。

参考文献(References)

- [1] 于贵瑞,伏玉玲,孙晓敏,等. 中国陆地生态系统通量观测研究网络(ChinaFLUX)的研究进展及其发展思路[J]. 中国科学: D辑, 2006, 36(A01): 1-21. [YU Guirui, FU Yulin, SUN Xiaomin, et al. Recent progress and future directions of ChinaFLUX [J]. Science in China, Ser.D, Earth Sciences, 2006, 36(A01): 1-21.]
- [2] 陈新芳,居为民,陈镜明,等. 陆地生态系统碳水循环的相互作用及其模拟[J]. 生态学杂志, 2009, 28(8): 1630-1639. [CHEN Xinfang, JU Weimin, CHEN Jingming, et al. Interactions between terrestrial ecosystem water and carbon cycles and their simulation methods [J]. Chinese Journal of Ecology, 2009, 28(8): 1630-1639.]
- [3] 胡隐樵,陈晋北,吕世华. 从湍流经典理论到大气湍流非平衡态热力学理论[J]. 高原气象, 2012, 31(1): 1-27. [HU Yinqiao, CHEN Jinbei, LV Shihua. From the classic theory of turbulence to the nonequilibrium thermodynamic theory of atmospheric turbulence [J]. Plateau Meteorology, 2012, 31(1): 1-27.]
- [4] 赵文智,吉喜斌,刘鹤. 蒸散发观测研究进展及绿洲蒸散发研究展望[J]. 干旱区研究, 2011, 3: 463-470. [ZHAO Wenzhi, JI Xibin, LIU Hu. Progresses in evapotranspiration research and prospect in desert oasis evapotranspiration research [J]. Arid Zone Research, 2011, 3: 463-470.]
- [5] 黄妙芬. 地表通量研究进展[J]. 干旱区地理, 2003, 26(2): 159-165. [HUANG Miaofen. Advance of research on surface flux [J]. Arid Land Geography, 2003, 26(2): 159-165.]
- [6] 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(4): 479-492.

- [7] 严坤, 李生宇, 雷加强, 等. 沙漠腹地人工绿地地表能量交换特征[J]. 干旱区地理, 2013, 36(3): 433-440. [YAN Kun, LI Shengyu, LEI Jiaqiang, et al. Characteristics of surface energy exchange in the artificial shelter forest land of the hinterland of Takimakan Desert[J]. Arid Land Geography, 2013, 36(3): 433-440.]
- [8] SCHUEPP P H, LECLERC M Y, MACPHERSON J I, et al. Footprint prediction of scalar fluxes from analytical solutions of the diffusion equation[J]. Boundary-Layer Meteorology, 1990, 50(1-4): 355-373.
- [9] LECLERC M Y, SHEN S, LAMB B. Observations and large-eddy simulation modeling of footprints in the lower convective boundary layer[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres(1984-2012), 1997, 102(D8): 9323-9334.
- [10] FOKEN T, LECLERC M Y. Methods and limitations in validation of footprint models[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2004, 127(3): 223-234.
- [11] SCHMID H P. Source areas for scalars and scalar fluxes[J]. Boundary-Layer Meteorology, 1994, 67(3): 293-318.
- [12] SCHMID H P. Experimental design for flux measurements: matching scales of observations and fluxes[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1997, 87(2): 179-200.
- [13] 赵晓松, 关德新, 吴家兵, 等. 长白山阔叶红松林通量观测的 footprint 及源区分布[J]. 北京林业大学学报, 2005, 27(3): 17-23. [ZHAO Xiaosong, GUAN Dexin, WU Jiabing, et al. Distribution of footprint and flux source area of the mixed forest of broadleaved and Korean pine in Changbai Mountain[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2005, 27(3): 17-23.]
- [14] 米娜, 于贵瑞, 温学发, 等. 中国通量观测网络(ChinaFLUX)通量观测空间代表性初步研究[J]. 中国科学, 2006, 36(1): 22-33. [MI Na, YU Guirui, WEN Xuefa, et al. A preliminary study for spatial representiveness of flux observation at ChinaFlux sites[J]. Science in China(Series D), 2006, 36(1): 22-33.]
- [15] 楚良海, 刘文兆, 朱元骏, 等. 黄土高原沟壑区通量数据空间代表性研究[J]. 地球科学进展, 2009, (2): 211-218. [CHU Lianghai, LIU Wenzhao, ZHU Yuanjun, et al. Spatial representation of flux data in gully region on the Loess Plateau[J]. Advances in Earth Science, 2009, (2): 211-218.]
- [16] 周琪, 李平衡, 王权, 等. 西北干旱区荒漠生态系统通量贡献区模型研究[J]. 中国沙漠, 2014, (1): 98-107. [ZHOU Qi, LI Pingheng, WANG Quan, et al. A footprint analysis on a desert ecosystem in West China[J]. Journal of Desert Research, 2014, 1: 98-107.]
- [17] GÖCKEDE M, REBMANN C, FOKEN T. A combination of quality assessment tools for eddy covariance measurements with footprint modelling for the characterisation of complex sites[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2004, 127(3): 175-188.
- [18] HORST T W, WEIL J C. Footprint estimation for scalar flux measurements in the atmospheric surface layer[J]. Boundary-Layer Meteorology, 1992, 59(3): 279-296.
- [19] 陈世强, 吕世华. 荒漠区粗糙度长度的确定及在模式中的应用[J]. 中国沙漠, 2013, (1): 174-178. [CHEN Shiqiang, LV Shihua. Calculation of roughness length of desert and its application in land surface process model[J]. Journal of Desert Research, 2013, (1): 174-178.]
- [20] 何清, 胡文峰, 杨兴华, 等. 内蒙古拐子湖地区风沙运动若干参数计算[J]. 干旱区地理, 2012, 35(2): 187-192. [HE Qing, HU Wenfeng, YANG Xinghua, et al. Several calculations of parameters of wind-sand movement at Guaizi Lake area of Inner Mongolia[J]. Arid Land Geography, 2012, 35(2): 187-192.]
- [21] 张雅静, 申向东. 植被覆盖地表空气动力学粗糙度与零平面位移高度的模拟分析[J]. 中国沙漠, 2008, (1): 21-26. [ZHANG Yajing, SHEN Xiangdong. Simulation analysis of vegetation covered surface's aerodynamics roughness length and zero displacement[J]. Journal of Desert Research, 2008, (1): 21-26.]
- [22] ROSENBERG N J, BLAD B L, VERMA S B. Microclimate: the biological environment[M]. New York: Wiley, 1974.
- [23] STANHILL G. Observations on the reduction of soil temperature[J]. Agricultural Meteorology, 1965, 2(3): 197-203.
- [24] 赵鸣. 大气边界层动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006. [ZHAO Ming. Dynamics of atmospheric boundary layer[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.]
- [25] 陈曦. 亚洲中部干旱区蒸散发研究[M]. 北京: 气象出版社, 2012. [CHEN Xi. Retrieval and analysis of evapotranspiration in central areas of Asia[M]. Beijing: Meteorological Press, 2012.]
- [26] LIU S M, XU Z W, WANG W Z, et al. A comparison of eddy-covariance and large aperture scintillometer measurements with respect to the energy balance closure problem[J]. Hydrology & Earth System Sciences, 2011, 15(4).
- [27] KORMANN R, MEIXNER F X. An analytical footprint model for non-neutral stratification[J]. Boundary-Layer Meteorology, 2001, 99(2): 207-224.

Investigation of spatial representativeness for flux data of continental river basin in arid region of northwestern China

ZHANG Kun, HAN Tuo, ZHU Gao-feng, BAI Yan, MA Ting

(Key Laboratory of Western China's Environmental Systems with the Ministry of Education, Collaborative Innovation Centre for Arid Environments and Climate Change, Lanzhou University, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: With the increasing of global change, the change of surface heat flux is becoming more and more attention. But the quality and uncertainty of flux data is seriously affected by the spatial representativeness. Therefore, the paper selected the data during the growing season from four observation stations in northwestern China. Then, the paper calculated the flux source area and the point of maximum flux contribution for each site by FSAM model. In this paper, the main source areas ($P=80\%$, 60% , 40% , 20%) was given for each site under the different condition of atmosphere (Stable & Unstable). It turned out that each station under the condition of stable stratification, the source area are as follows: Yingke-station (190 m, 110 m, 80 m, 60 m); Arou-station (140 m, 115 m, 85 m, 65 m); Guantan-station (580 m, 320 m, 240 m, 180 m); Dunhuang-station (280 m, 140 m, 100 m, 80 m). Under the condition of unstable stratification, the source area of the four stations are as follows: Yingke-station (90 m, 55 m, 35 m, 30 m); Arou-station (120 m, 95 m, 80 m, 65 m); Guantan-station (480 m, 280 m, 200 m, 160 m); Dunhuang-station (140 m, 80 m, 60 m, 40 m). From the results, the source area of Guantan-station is the largest in these three stations, because its underlying surface is the forest ecological system and its instrument installation location also is the highest of all. The source area of Yingke-station is not only the minimum but also in a flat elliptical shape. That is the place of the station was surrounded by windbreaks and had a strong disturbance of human activity, so that the turbulence movement for atmospheric is more complex. As a consequence, the direction of the wind is not always stable but very easy to form a strong side wind, especially under the condition of instability. For Arou-station, by the reason of its lowest instrument installation location and the homogeneous underlying surface, the change of source area is more uniform than the other three stations. The source area of Dunhuang-station is between Guantan-station and Arou-station. Thus, it is concluded that the changes of the flux source area were preliminarily analyzed with the height of the instrument and the different underlying surface, etc. Obviously, the erection height of the instrument had a direct influence on the extent of the flux source and different underlying surfaces form different turbulence and thus indirectly affected the distribution of flux source area. In the present paper, we also calculated the point of maximum flux contribution under the different atmospheric stratification for each site (Yingke 20.7–39.8 m; Arou 44.8–49.6 m; Guantan 109.3–124.7 m; Dunhuang 31.7–49.3 m). Its length is consistent with its source area size. In addition, in combination with characteristics of underlying surface for each station, the major source area of the observation is located in the area where we interested and the observation data of the four stations can represent the underlying surface properties. It is able to provide the reliable basic data for the research that the matter and energy exchange in continental river basin in northwest China. There is some errors when calculating the tall vegetation due to the model itself. Because it is a simplified analytical model, so it can not describe the turbulence conditions inside of the canopy.

Key Words: eddy covariance; footprint analysis; FSAM; northwestern China