李宏宇, 张强, 王春玲, 等. 2020. 基于多源陆面通量数据相融合的新资料及其在中国夏季风影响过渡区的应用 [J]. 大气科学, 44(6): 1224−1242. LI Hongyu, ZHANG Qiang, WANG Chunling, et al. 2020. New Dataset Based on Multi-Source Land Surface Flux Data and Its Application in the East Asian Summer Monsoon Boundary Area [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 44(6): 1224−1242. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2005.19192

基于多源陆面通量数据相融合的新资料及其在中国夏季风影响过渡区的应用

李宏宇[1,2,3] 张强[3] 王春玲[4] 马贵东[1,2] 井元元[1,2] 岳平[3] 张良[3]

1 河北省气象与生态环境重点实验室，石家庄 050021
2 河北省气候中心，石家庄 050021
3 中国气象局兰州干旱气象研究所/甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室/中国气象局干旱气候变化与减灾重点开放实验室，兰州 730020
4 北京市气象服务中心，北京 100089

摘 要 夏季风影响过渡区是陆面能量交换与区域气候相互作用显著的热点区域。然而，目前缺乏适用于该区域的高精度长期通量数据集，这限制了陆面水热交换与气候相互作用的研究。如何融合目前已有的多源通量资料进行重构建以及应用显得十分必要。本研究综合包括中国北方协同观测试验和中国通量网的多种下垫面通量观测以及多种格点资料，试图重构中国夏季风影响过渡区的陆面能量通量数据集。在筛选具有优良下垫面代表性站点并考察模拟和观测散点分布规律的基础上，利用多元回归模型构建了一套适用于夏季风影响过渡区并且受观测资料约束的月平均感热、潜热和净辐射数据集。交叉验证结果表明构建的数据集相对于几种原始格点数据集精度有一定提高，最大程度上消除了原始格点资料的系统偏差。进一步分析表明在地表能量平衡分量中，陆面湍流通量对夏季风的响应更为显著，并且夏季风影响过渡区陆面湍流热通量对夏季风持续时间呈现对数分布的年际变化规律；当夏季风处于低持续影响状态时陆面湍流热通量年际变化更为显著，偏弱的夏季风系统可能导致陆面过程对气候变化更强的影响。本文基于多源通量数据融合构建的新数据集可以为气候变化研究提供数据支撑，同时增加了对陆面过程与季风系统相互作用的认识。

关键词 东亚夏季风 影响过渡区 陆面通量 数据集 夏季风持续时间
文章编号 1006-9895(2020)06-1224-19 **中图分类号** P468 **文献标识码** A
doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2005.19192

New Dataset Based on Multi-Source Land Surface Flux Data and Its Application in the East Asian Summer Monsoon Boundary Area

LI Hongyu[1,2,3], ZHANG Qiang[3], WANG Chunling[4], MA Guidong[1,2], JING Yuanyuan[1,2], YUE Ping[3], and ZHANG Liang[3]

1 *Key Laboratory of Meteorological and Ecological Environment of Hebei Province*, *Shijiazhuang* 050021

收稿日期 2019-07-26；**网络预出版日期** 2020-05-26
作者简介 李宏宇，男，1987 年出生，博士、副高级工程师，主要从事陆面过程研究。E-mail: aridlhy@qq.com
资助项目 国家自然科学基金项目 41705075、41630426、41975016、41875020，中国气象局气候变化专项 CCSF201940，河北省湿地生态与保护重点实验室（筹）开放基金项目 hklk201901

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grants 41705075, 41630426, 41975016, 41875020), Climate Change Special Fund from China Meteorological Administration (Grant CCSF201940), Open Foundation of Hebei Key Laboratory of Wetland Ecology and Conservation (Grant hklk201901)

2 *Climate Center of Hebei Province*, *Shijiazhuang* 050021
3 *Gansu Key Laboratory of Arid Climatic Change and Reducing Disaster/Key Open Laboratory of Arid Climatic Change and Disaster Reduction of Gansu Province/Institute of Arid Meteorology*, *China Meteorological Administration*, *Lanzhou* 730020
4 *Beijing Meteorological Service Center*, *Beijing* 100089

Abstract The EASM (East Asian summer monsoon) boundary area is active with intense interaction between the land surface process and the regional climate. However, the lack of high-quality long-term flux datasets for this region limits the study of the interaction among the land surface water, heat exchange, and climate. It is necessary to reconstruct a new dataset based on the currently available multiple flux data and then apply it in climate research. In this study, the datasets of land surface energy fluxes in the EASM boundary area in China were reconstructed by integrating the field observations conducted over northern China and several gridded datasets. Based on the selection of sites with good underlying representative surface and the investigation of the scattering distribution of simulations and observations, a set of monthly average sensible heat, latent heat, and net radiation datasets was generated using a multiple regression model. The cross-validation results showed that the accuracy of the constructed dataset was improved compared with several original gridded datasets, and the systematic deviation of the original lattice data was maximally eliminated. Further analysis suggests that among the surface energy balance components, the response of land surface turbulent flux to summer monsoon was more significant, and the interannual variation of the land surface turbulent heat flux with the summer monsoon duration in the EASM boundary area showed logarithmic distribution. The turbulent heat fluxes presented more significant interannual variations, as the summer monsoon was in a low persistent state. A weaker summer monsoon system may lead to a stronger impact of land surface processes on climate change. The new dataset based on multi-source flux data fusion can support climate change research and further clarify the interaction between land surface processes and monsoon climate.

Keywords EASM (East Asian summer monsoon), Boundary area, Land surface flux, Dataset, Summer monsoon duration

1 引言

季风系统是地球大气环流系统的重要组成部分，也是大气能量和物质循环的主要机制。在我国，东亚夏季风北边缘存在年际和年代际尺度上的摆动，形成了东亚夏季风边缘活动带，这一区域又被称作夏季风影响过渡区（胡豪然和钱维宏, 2007; 林祥和钱维宏, 2012）。该区域对夏季风的活动强度变化十分敏感，东亚夏季风的南北进退影响着气候干湿的演变（李栋梁等, 2013），导致气候干湿状态有着很强的波动性（欧廷海和钱维宏, 2006）。该区域属于气候和生态环境的敏感带和脆弱区，并成为频繁遭受干旱的地区之一（符淙斌和马柱国, 2008; 张强等, 2009）。夏季风影响过渡区域是陆面过程响应夏季风和降水时空变化的热点区域，具体表现为，在年际变化上，此区域是陆面能量和水分交换时间变率大值区域之一（Li et al., 2017），在气候平均态空间分布上，此区域也是空间梯度大值区域（曾剑等, 2016）。由于夏季风影响过渡区独特的气候和生态环境背景，这一区域陆面能量和水分交换与天气和气候之间存在深入的互馈过程，是全球陆气耦合程度最强的区域之一（Koster et al., 2004），深刻影响着天气和区域气候的形成和演变。该区域陆面过程大的时空波动性及与气候的紧密互馈联系，对于检验和验证地球不同圈层之间的联系规律可起到事半功倍的作用，因此深入研究夏季风过渡区在长时间尺度上的陆面能量交换十分必要。

为了了解夏季风过渡区陆气能量和物质交换的规律，到目前为止已有多个陆面过程观测试验在该区域开展，例如在夏季风影响过渡区西段的“黑河地区地气相互作用观测试验研究”（胡隐樵等, 1994）和“黄土高原陆面过程试验研究（LOPEX）”（张强等, 2009），在过渡区中东部的“内蒙古半干旱草原土壤—植被—大气相互作用（IMGRASS）”（吕达仁等, 2002），以及多个研究机构参与的“中国干旱/半干旱区实验观测协同与集成研究”。这些试验加深了对夏季风影响过渡区内典型下垫面的物质和能量交换以及边界层发展规律的认识，但是

受到观测站点空间分布稀疏和时间长度较短的限制，尚不能获得区域尺度上陆面能量交换的细致认识。

随着同化和卫星遥感技术的发展及应用，多种基于不同设计思路的全球陆面通量数据集产生。这些通量数据集主要包括遥感反演的陆面通量（Fisher et al., 2008; Wang and Liang, 2008; Sheffield et al., 2010）、再分析资料和离线陆面模式输出（Rodell et al., 2004; Simmons et al., 2006; Roberts et al., 2012）和全球气候模式的陆面通量输出。这些根据不同方法构建的全球通量数据集在地表能量、水分收支评估（Trenberth and Stepaniak, 2004; Stephens et al., 2012）和区域气候变化（Seneviratne et al., 2010; Kumar and Merwade, 2011）等诸多方面得到了广泛应用。然而，现有格点通量产品由于缺乏实际通量观测的约束和检验，数据精度受到诸多质疑。研究表明现有不同格点通量产品的模拟误差在月时间尺度上可达到数 W m^{-2} 甚至数十 W m^{-2}，并且在关键区域上误差很大（Decker et al., 2012）。现有陆面模式显著的通量模拟误差势必通过陆气耦合过程传递给大气和气候数值模式，给天气预报和气候预测带来困扰。因此，提高陆面通量数据集的准确度对气候研究很有必要。

目前，格点数据集精度提高的方法包括将全球通量网的实测通量资料与物理模型相结合进一步反演全球格点化的通量数据，或者将观测通量和模式模拟资料进行多类型数据的统计融合以及重构建，使重新构建的格点资料受到实际观测的约束和修正。根据前一种思路，Jung et al.（2009）和 Tramontana et al.（2016）采用机器学习方法并综合常规气象观测资料和遥感反演资料将全球通量网多个站点的通量数据升尺度，获得了全球范围陆表能量、水汽和二氧化碳通量格点数据集，已应用于气候变化和水分循环评估研究中（Jung et al., 2010）。基于后一种思路，以青藏高原为研究对象，Shi and Liang（2013, 2014）实现了通量修正方案由单点向区域尺度的扩展，得到了一个受观测资料约束的适用于区域尺度的格点通量数据集。

目前，针对夏季风影响过渡区的通量再构建研究，已经有了相关成果产生（王澄海和王蕾迪, 2010; 张强等, 2013; 李杉和符淙斌, 2015）。这些成果获得了不少陆面过程规律上的认识，但是往往只关注单点通量观测，或者依赖于某一种格点数据集。站点观测的匮乏限制了构建结果的空间适用性和代表性；而单个格点通量资料在模式参数化方案等方面尚存在不足，模拟偏差可能通过构建过程传递给构建结果。另外，目前全球或者其他区域上的通量构建研究普遍缺乏针对站点下垫面代表性的定量化讨论。基于此，本研究在筛选具有良好下垫面代表性站点的基础上，融合夏季风影响过渡区内多种类型下垫面通量观测和多个格点通量产品，构建一个受实际通量观测约束的格点数据集，以期为此区域陆气能量交换与气候相互作用研究提供数据支撑，并将构建的数据集应用于陆面过程响应夏季风的研究。

2 数据资料

2.1 夏季风影响过渡区范围

以往主要是从降水量分布、水汽分布等单气象要素（史正涛, 1996; 欧廷海和钱维宏，2006; 汤绪等, 2009）或者综合温度、降水和位温等多种气象要素（汤绪等, 2006; 胡豪然和钱维宏, 2007）角度来确定夏季风影响过渡区的范围。由于降水是指示夏季风活跃程度的重要变量，而且夏半年形成透雨的天气过程往往处于夏季风影响之下，因此夏季风影响过渡区的范围采用过程透雨量的方法来定义：即 4～10 月出现 3 次和 8 次过程透雨之间的区域（黄菲等, 2009）。夏季风影响过渡区主要包括黑龙江和吉林西部地区、内蒙古中东部区域以及黄土高原半干旱区，是连接干旱区和湿润地区的纽带。此区域虽然是一个狭窄的气候过渡带，但是植被覆盖和净生产力等生态指标、大气边界层高度和陆面水热交换能力在指向干旱和湿润区的轴线方向上具有很大的变化梯度，而且夏季风年代际尺度上的进退也使此区域气候和生态因子具有很高的时间变率。

2.2 夏季风北边缘和持续时间指数

胡豪然和钱维宏（2007）提出了结合了气团、降水两方面因素定义季风边缘带的标准，此季风边缘带标准满足下列 3 个条件：（1）850 hPa 候平均风场为西南风，即 u（纬向风）>0 m s^{-1}, v（经向风）>0 m s^{-1}；（2）850 hPa 候平均的假相当位温 θ_{se}≥335 K；（3）候平均的降水量 P≥4 mm d^{-1}。

将一年中满足以上三个条件的最北纬度定义为夏季风边缘指数，若夏季风边缘达到或超过某个地点的纬度可认为此地受到了夏季风的影响，将受影响的持续时间定义为此地点的夏季风持续时间指数。

我们利用 1979～2010 年欧洲中心再分析资料（ERA-Int）0.75°×0.75°分辨率的数据计算获得夏季风持续时间指数，根据特定区域内所有格点的持续时间平均可得到区域上的持续时间指数。依据此标准反演的夏季风北边缘和持续时间指数相对于传统夏季风指数更能准确反映夏季风过渡区的季风活动和进退情况（Zhang et al., 2016）。

2.3　观测和格点资料

本研究使用三类数据来构建适用于夏季风影响过渡区的长期数据集，包括中国北方陆面过程观测站的通量资料、四种再分析资料（NCEP/DOE、JRA-25、ERA-Int 和 MERRA）和 GLDAS 数据集驱动的通量输出（GLDAS2-NOAH）。三种资料的产生机构、时空分辨率和时间长度等具体情况详见表 1。其中，观测资料作为单点上的实际观测，具有较高的精度，可看作是陆气能量交换的真值，用于订正格点产品并构建新的长期数据集；而通量格点资料拥有时空连续性好和覆盖范围大的优点，但是其数据精度偏低，因此作为被订正的对象。

2.3.1　观测资料

为获取中国北方干旱/半干旱区关键陆面过程和生态参数，进一步深化对陆面过程的认识，中国干旱/半干旱区实验观测协同与集成研究项目联合多家研究机构，使位于中国北方的多个陆面过程观测站在统一的观测技术规范和数据质量控制条件下开展协同观测试验，并实现了数据共享。目前，已经有 18 个通量观测试验站加入“中国北方协同观测试验”中，其中在夏季风过渡区范围内及临近区域的站点有 15 个，包括沙坡头、张掖、榆中、奈曼、阿柔、通榆、东苏、平凉、锦州、庆阳、密云、长武、盈科、定西和大野口。另外，本研究还获取了中国通量网位于内蒙古锡林格勒草原站的观测资料。图 1 给出了不同下垫面类型观测站的地理分布，红线为夏季风活动边缘线。

表 2 给出了所选站点所处的地理位置、下垫面特征和观测时段。观测站点囊括了裸地、荒漠、草地、森林和农田等多种下垫面类型。荒漠/裸地、农田、森林和草原观测站分别有 2、7、1 和 6 个。通榆、锡林格勒和榆中站观测资料时段最长，分别为 6 年、5 年和 4 年，平凉和庆阳站观测时段分别为 18 和 20 个月，其他站均为 6 个月。各站观测项目和安装的仪器比较一致，如空气温湿计（HMP45C）和雨量计（TE525；RM Young 52202/52203）分别用于常规大气温湿度和降水观测，辐射计（Kipp& Zonen, CNR-1; Eppley, PSP and PIR）用于观测向上和向下长短波辐射分量，三维超声风温仪（Campbell, CSAT-3）和气体分析仪（Li-Cor, Li-7500）组成的涡动相关系统观测湍流热通量，土壤湿度计（Campbell, CS616）、土壤温度计（Campbell, 107/109 probe）和土壤热通量板（REBS, HFT-3；HFP01 probe）分别用来观测土壤温湿度和热流量。

北方协同观测试验的所有观测仪器均经过了统一标定和维护，并且后期以相同的质量控制标准来处理观测数据。观测仪器具有较高的精度，不同仪器对比也表明观测仪器一致性较强，可以满足基础的研究需要（Zhang et al., 2012）。很多发表的研究成果也证明本文涉及的实际观测资料拥有较高的可靠性，可以满足陆面过程和气候变化的研究需求（李正泉等, 2004; 曾剑等, 2011; Zhang et al., 2012）。

2.3.2　格点通量产品

格点资料涉及到的要素包括陆面感热、潜热和净辐射通量等三种陆面能量平衡分量，格点资料简要介绍：

（1）NCEP/DOE（Kanamitsu et al., 2002）再

表 1　使用资料简介

Table 1　Introduction of data used in the study

数据类型	名称	机构名称	空间分辨率	时间分辨率	时间长度
再分析资料	NCEP/DOE	NCEP/DOE	T62 (200 km)	6 h	1979年1月至今
	JRA-25	JMA	T106 (110 km)	3 h	1979年1月至2014年2月
	ERA-Int	ECMWF	1.5°×1.5°	6 h	1979年1月至今
	MERRA	NASA	0.5°×0.67°	1 h	1979年1月至今
离线陆面模式数据集	GLDAS2-NOAH	NASA	1°×1°	3 h	1979年1月至2010年12月
陆面观测	中国北方陆面过程观测	中国科学院大气物理研究所/地理科学与资源所	16个站点	30 min	详见表2

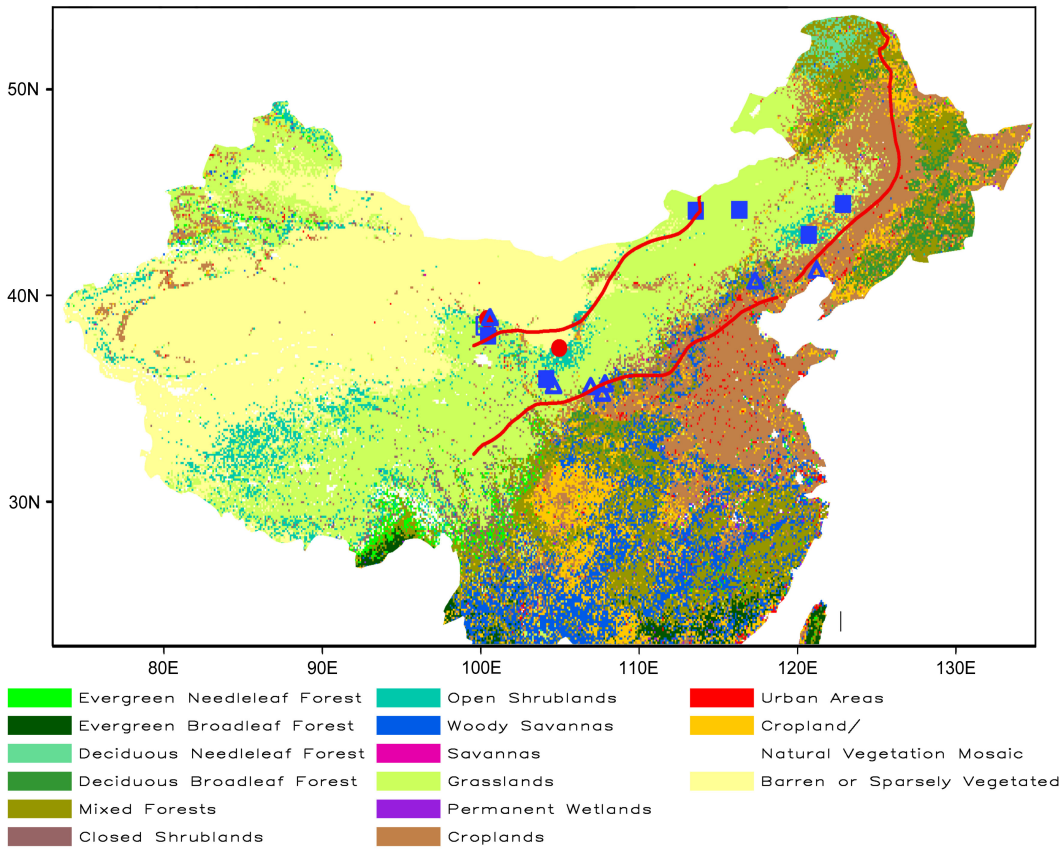

图 1 夏季风影响过渡区内所选观测站点的地理分布。红线代表夏季风活动的南北边缘，蓝色实框、蓝色空三角形和红色实圆点分别代表草原站、农田站和裸地/荒漠站

Fig. 1 Geographical distribution of observation sites in EASM (East Asian summer monsoon) boundary area. Red lines represent the north and south edge of summer monsoon. Blue solid frames, blue hollow triangles, and red solid dots represent grassland, cropland, and bare land/desert sites, respectively

表 2 所选观测站点基本情况

Table 2 Basic information on selected observation sites

站点名称	纬度	经度	下垫面类型	观测时段
沙坡头	37.45°N	104.95°S	荒漠	2008年7～9月；2009年7～9月
张掖	38.86°N	100.41°S	裸地	2008年7～9月；2009年7～9月
长武	35.2°N	107.67°S	农田	2008年7～9月；2009年7～9月
定西	35.56°N	104.59°S	旱作农田	2008年7～9月；2009年7～9月
锦州	41.15°N	121.2°S	农田（玉米）	2008年7～9月；2009年7～9月
密云	40.63°N	117.32°S	农田/果林	2008年7～9月；2009年7～9月
平凉	35.53°N	106.94°S	农田	2009年7月至2010年12月
庆阳	35.66°N	107.84°S	农田（小麦）	2009年5月至2010年12月
盈科	38.86°N	100.58°S	绿洲农田（玉米）	2008年7～9月；2009年7～9月
大野口	38.53°N	100.25°S	常绿针叶林	2008年7～9月；2009年7～9月
阿柔	38.04°N	100.46°S	亚高山草甸	2008年7～9月；2009年7～9月
东苏	44.09°N	113.57°S	荒漠化草原	2008年7～9月；2009年7～9月
奈曼	42.93°N	120.7°S	荒漠化草原	2008年7～9月；2009年7～9月
通榆	44.88°N	122.88°S	退化草原	2003年1月至2008年12月
榆中	35.95°N	104.13°S	草原	2007年1月至2010年12月
锡林格勒	44.13°N	116.32°S	草原	2004年1月至2008年12月

分析资料内部使用 OSU 陆面模式和中尺度全球谱大气模式（GSM），并且采用三维变分同化方案同化了上层大气和地表常规观测资料以及卫星遥感数据。与第一代 NCEP/NCAR 资料相比，NCEP/DOE 再分析资料更正了同化系统中的人为错误，引入了新的短波辐射传输方案，改进了边界层参数化方案，并利用观测的降水驱动陆面模式修正了模式模拟的降水，同时提高了土壤湿度的模拟效果。（2）ERA-Int（Simmons et al., 2006）再分析资料使用了 TESSEL 陆面模式，模式系统采用了四维变分同化方案，有效提高了各方面的模拟能力，同化的资料包括 2 m 的地表气温、相对湿度和卫星辐射资料，尤其增强了对土壤湿度和温度场的预报能力。此外，模式同化了全球常规气象观测站收集的雪深资料以及地球轨道测地卫星（GEOS）和欧洲地球同步气象卫星（METEOSAT）遥感反演的积雪资料，有效改进了模式对雪量的模拟。（3）JRA-25（Onogi et al., 2007）再分析资料采用 T106 谱分辨率的 JRA2000 模式作为大气模式，陆面模式为改进的简单生物模式（SiB），SiB 陆面模式对长期陆气交换的模拟更加真实。JRA-25 再分析资料同化了丰富的观测资料，尤其是对中国区域积雪资料的同化增强了东亚地区气候模拟的能力。MERRA（Roberts et al., 2012）再分析资料采用了新版本的戈达德地球观测系统同化系统（GEOS-5），使用了大气动力模式 GEOS-5AGCM，并耦合了一个基于地表流域划分的陆面模式，三维同化系统同化的资料包括卫星辐射资料和遥感反演的瞬时降水率等。（4）MERRA 再分析资料有着较高的时空分辨率，时间分辨率为 1 小时，水平分辨率是 (1/2)°×(2/3)°。MERRA 再分析资料不仅输出地表湍流和辐射通量等能量分量，还提供地表粗糙度、摩擦速度和稳定度等陆面或近地层大气状态诊断参数。

与再分析资料内部陆面模式和大气模式相耦合不同，GLDAS2-NOAH 模拟资料是陆面模式 NOAH 在全球陆面同化系统（GLDAS）第二版本强迫数据驱动下的模拟结果输出，陆面模式并未与大气模式耦合（Rodell et al., 2004）。GLDAS 第二版本强迫场比第一版本更加稳定，第一版本强迫场在 20 世纪 90 年代中期进行过更换，导致陆面结果输出存在异常突变。为避免强迫资料更换引起的潜在数据问题，对于长期气候变化方面的数据需求，GLDAS 官网建议使用第二版本的模式模拟结果。

GLDAS2-NOAH 模拟资料时间跨度是从 1979 年至 2010 年，JRA-25 再分析资料截止至 2014 年 2 月，而其他再分析资料一直更新到现在，几种资料共同的时间跨度是 1979～2010 年，因此将此时间段作为陆面通量数据构建的时间范围。涉及到的几种格点资料已经广泛应用在气象和水文研究中，多项全球和区域能量和水分评估的研究（Trenberth and Stepaniak, 2004; Zhou and Wang, 2016）表明几种资料具有较好的可信性。

3　数据处理和研究方法

以往在夏季风过渡区的格点通量数据订正或构建研究往往只专注于单一格点资料，并且受限于通量观测站点有限的数量，因此很难获得区域尺度上受观测资料约束的格点数据集。与之不同的是，本研究在对下垫面代表性站点进行筛选以及对格点资料误差规律分析的基础上，通过融合多个站点实际通量观测和多种格点资料进行通量长期数据集的构建，这对区域尺度上多类型下垫面的通量数据集构建有着一定帮助。图 2 给出了陆面通量数据构建具体步骤的框图。

3.1　代表性站点的选择

由于不同观测站点设立的初衷和目的不同，站点所处位置和周围地理环境也不尽相同，另外设置的涡动相关系统通量足迹通常只有几百米，无法与格点资料几十到上百公里的空间分辨率相匹配（Steinfeld et al., 2007; Decker and Zeng, 2009），因此某些站点可能存在一定的区域代表性问题。站点周围格点尺度范围的下垫面均匀程度如何是考察观测站点区域代表性程度以及能否与格点资料进行比较的关键。而下垫面类型是反映下垫面均匀性的重要指标，直接影响地表反照率、粗糙度、空气动力学阻抗和气孔导度等决定陆气能量和水分交换的参数，在陆面模式和遥感模型中也是关键的陆面基础参数。实际观测表明即使在相同的气候和天气背景下土地覆盖类型和利用方式的改变会显著影响陆气之间的水分和能量交换（Betts et al., 1996; da Rocha et al., 2009）。为了定量化观测站点在区域尺度上的下垫面均一程度，我们统计了站点所属下垫面种类在模式网格尺度上所有下垫面类型中所占的比例。根据 MODIS（Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer）反演的 500 m 空间分辨率的地表覆盖类型产品（MCD12Q1），得到了以站点为

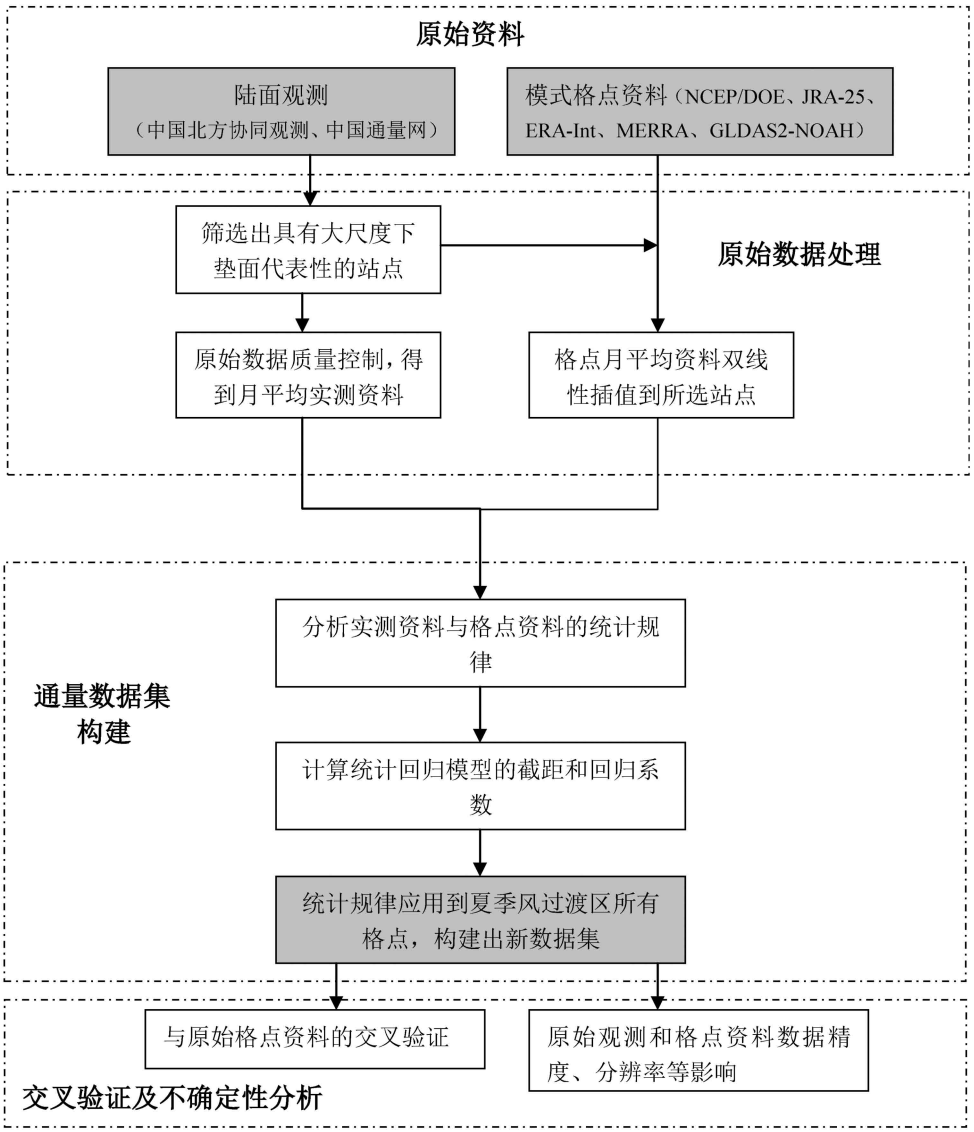

图 2 陆面通量数据构建步骤的框图

Fig. 2 Flowchart of the procedure of land surface fluxes data construction

圆心，不同距离为半径的圆形区域内观测站点所属下垫面类型所占比例的分布（图 3）。

由图 3 可以看出，草原站锡林格勒和东苏在不同空间尺度上均有着很好的下垫面均一性，从局地到百公里区域尺度的范围内草原下垫面的比例大体上均为 100%。而农田站定西、盈科和森林站大野口在局地到区域尺度上所处的下垫面比例均低于 20%。事实上，定西和盈科站下垫面分别属于旱作农田和绿洲灌溉农田，所在模式网格尺度上的主要地表覆盖类型分别为草原、荒漠，而大野口森林站在区域尺度上主要的下垫面类型是草原。这三站只有局地下垫面代表性，不具有模式网格尺度上地表覆盖类型的代表性，因此将这三个站点剔除。另外，观测和格点资料比较也表明，大野口净辐射观测值相对于几种格点资料显著偏大，而盈科潜热观测值比几种格点资料要大很多，这应该分别与森林低反照率和绿洲农田人为灌溉有关系。经过下垫面代表性筛选，剩余 13 个站点的实际观测用来订正格点资料，它们的下垫面类型主要包括草原、农田和裸地/戈壁等，可以代表夏季风影响过渡区范围内基本的下垫面。

此外，通量站点的陆面能量收支闭合程度是诊断陆面通量数据质量的重要标准，本文涉及到的北方协同观测试验和中国通量网站点的能量收支基本能达到 0.7 以上的闭合程度（李正泉等, 2004; 曾剑等, 2011），保证了较好的通量观测数据质量。原

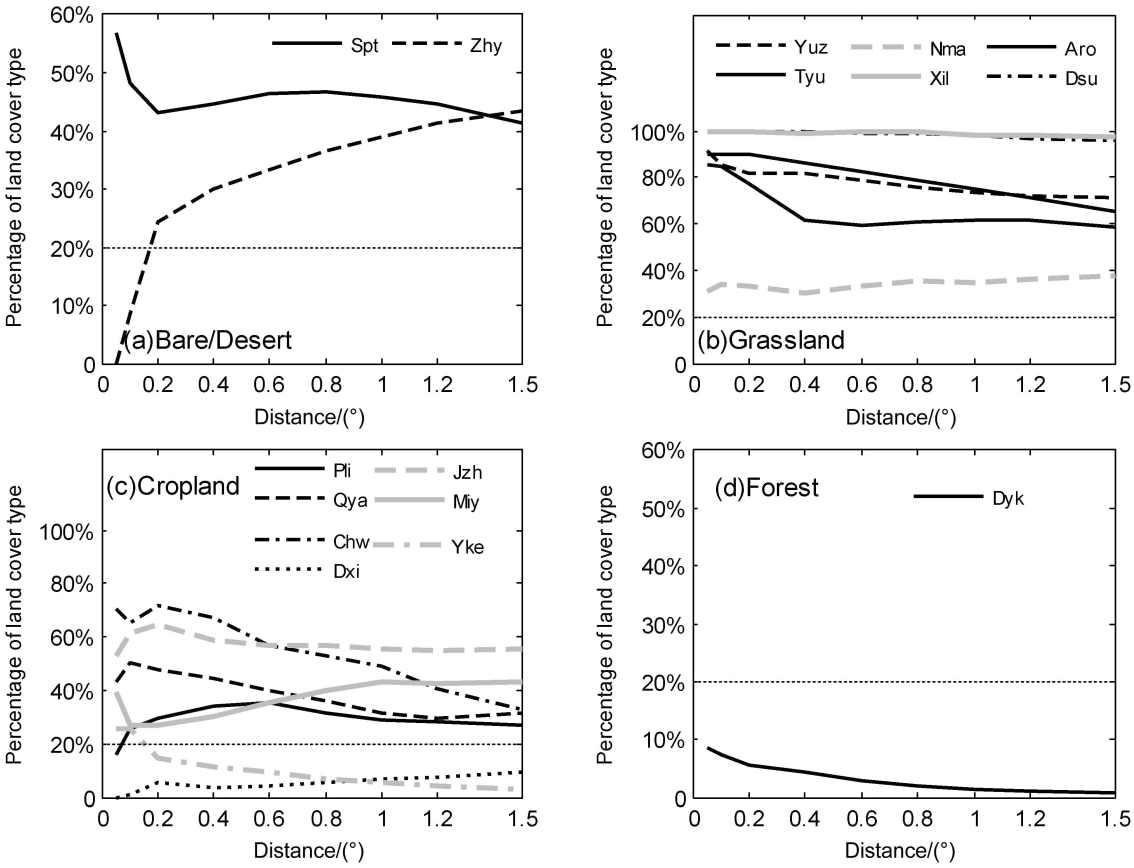

图 3　以站点为圆心、不同距离为半径的圆形区域内观测站点所属下垫面类型所占比例：（a）裸地/戈壁；（b）草原；（c）农田；（d）森林。Spt 和 Zhy 分别代表沙坡头和张掖站，Yuz、Nma、Aro、Tyu、Xil 和 Dsu 分别代表榆中、奈曼、阿柔、通榆、锡林格勒和东苏站，Pli、Jzh、Qya、Miy、Chw、Yke 和 Dxi 分别代表平凉、锦州、庆阳、密云、长武、盈科和定西站，Dyk 代表大野口站

Fig. 3　Percentage of land cover types at measurement sites within the circular area with different radii for (a) bare land/desert, (b) grassland, (c) cropland, and (d) forest. Spt and Zhy represent Shapotou and Zhangye sites, respectively; Yuz, Nma, Aro, Tyu, Xil, and Dsu represent Yuzhong, Naiman, Arou, Tongyu, Xilingele, and Dongsu sites, respectively; Pli, Jzh, Qya, Miy, Chw, Yke, and Dxi represent Pingliang, Jinzhou, Qingyang, Miyun, Changwu, Yingke, and Dingxi sites, respectively; Dyk represents Dayekou site

始的净辐射、感热和潜热观测通过一系列步骤处理为月平均数据。为了严格控制观测数据的质量，剔除了受降水影响的原始半小时通量数据，以及超过阈值（净辐射：−200～900 W m^{-2}；感热：−200～500 W m^{-2}；潜热：−200～500 W m^{-2}）的通量观测值，其次把一天中高于 50% 有效数据的半小时通量观测平均作为日平均值，再将某月高于 18 天有效观测的通量日平均值作为当月的月平均值。为了减少站点能量不平衡问题的影响，根据 Twine et al.（2000）提出的方案对月平均感热和潜热进行修正，具体是将能量不平衡量按照波文比分配给实际观测的感热和潜热，从而得到修正的感热和潜热通量，修正公式如下：

$$H_{\mathrm{S}} = \frac{R_{\mathrm{n}} - G}{H_{\mathrm{Sori}} + H_{\mathrm{Lori}}} H_{\mathrm{Sori}}, \qquad (1)$$

$$H_{\mathrm{L}} = \frac{R_{\mathrm{n}} - G}{H_{\mathrm{Sori}} + H_{\mathrm{Lori}}} H_{\mathrm{Lori}}, \qquad (2)$$

其中，H_{S} 是修正的月平均感热通量，H_{L} 是修正的月平均潜热通量，R_{n} 是净辐射，G 是地表土壤热通量，H_{Sori} 和 H_{Lori} 分别是由原始观测计算的月平均感热和潜热通量。

另外，由于原始 5 种格点通量资料空间分辨率存在差异，因此采用双线性插值方法将格点资料重新插值到 0.5°×0.5°的格点上。

3.2　长期数据集构建方法

为了方便将格点资料与观测资料进行比较，将统一插值到相同网格上的格点资料再双线性插值到通量观测站点上。图 4 给出了两类资料在不同下垫面类型下的散点分布。由图可见，5 种格点资料模拟的陆面通量存在一定的误差。对于 5 种格点资料，

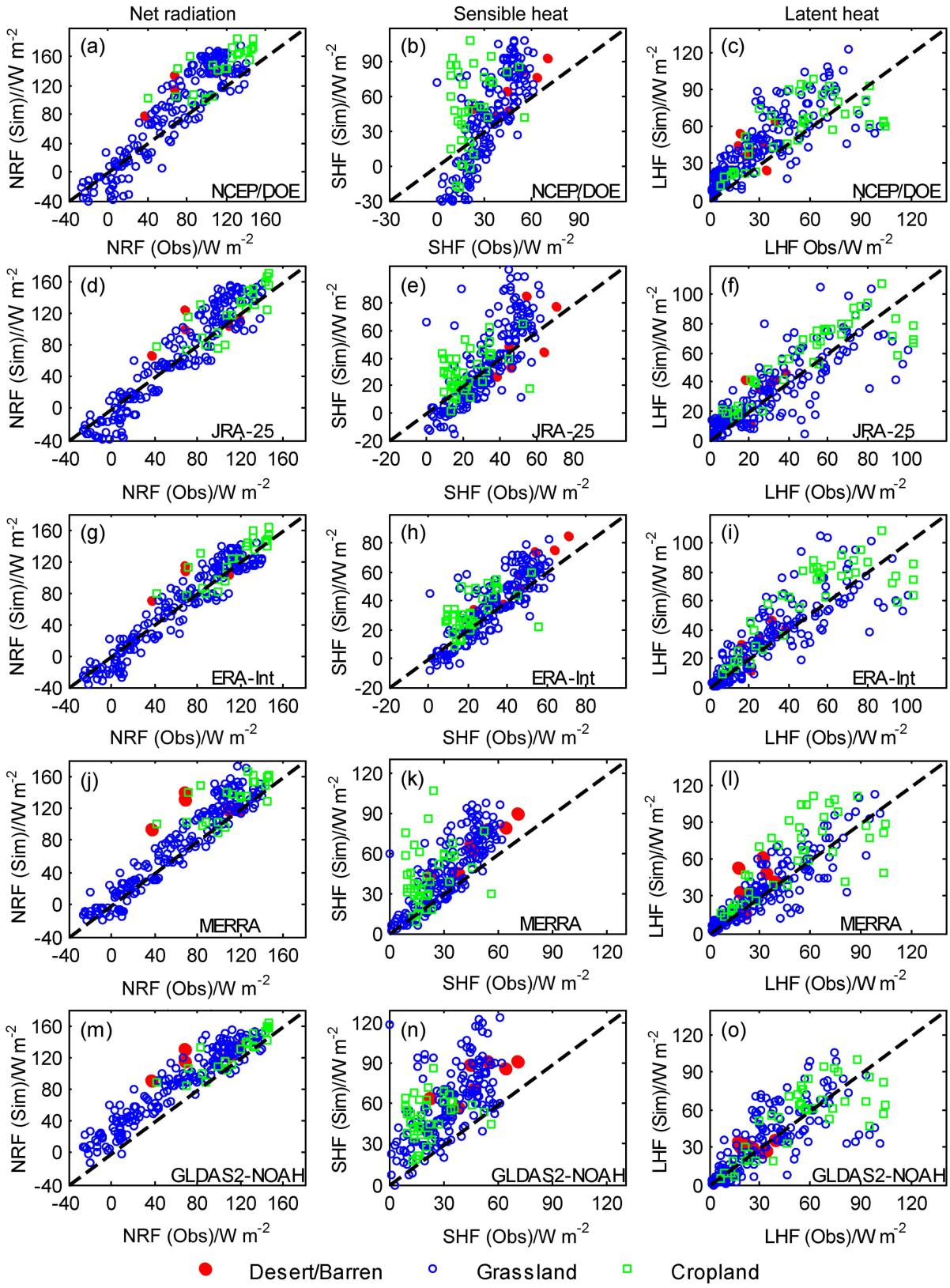

图 4 草地（蓝色圆圈）、农田（绿色方框）、裸地/荒漠（红色实心圆点）三种下垫面类型净辐射通量（左）、感热通量（中）、潜热通量（右）的模拟值与观测值的散点分布

Fig. 4 The scatter distributions of net radiation fluxes (NRF, left), sensible heat fluxes (SHF, middle), latent heat fluxes (LHF, right) from simulation (Sim) and observations (Obs) for grassland (blue circles), farmland (green squares), and bare land/desert (solid red points)

净辐射的平均值偏差在 1～20 W m^{-2} 之间；均方根误差处于 20～40 W m^{-2} 之间，ERA-Int 资料最低为 20.4 W m^{-2}，NCEP/DOE 资料最大达到 34.1 W m^{-2}，湍流热通量的误差则略低于净辐射。虽然几种格点资料自身有着较为明显的统计误差，但与实际观测数据存在显著的线性趋势，在全球其他区域也表现出相似的分布（Zhou and Wang, 2016）。5 种格点资料净辐射模拟值与实际观测的线性相关系数均能超过 0.9，感热模拟值与实测资料的相关系数分布在 0.63～0.83 之间，相应的潜热相关系数处于 0.79～0.86 之间（表 3）。我们还将模拟值与实际观测散点拟合为指数、对数、幂次和二次多项式等基本函数，对比发现线性函数拟合相关系数均不低于上述函数的拟合相关系数，这在数学上证明了线性关系的合理性。格点资料的净辐射模拟值相对于感热和潜热与观测更为接近，散点分布更为靠近 1∶1 线，各格点资料潜热与实测数据相关程度略高于感热，而低于净辐射。格点资料和实际观测的显著相关性表明格点资料的模拟误差很大程度上是可以进行订正的系统偏差，与 Decker et al.（2012）的结论一致。然而，不同格点资料与观测值拟合直线的斜率存在一定差异。5 种格点资料模拟的感热通量与实际观测线性回归方程斜率分别为 1.79、1.32、1.08、1.24 和 1.02，斜率普遍大于 1。其中，NCEP/DOE 资料感热模拟值与观测值散点明显偏离 1∶1 线，而 ERA-Int 资料感热模拟值与观测资料则比较接近。

因此格点资料的陆面热通量模拟值均可认为是实际观测的线性函数，并且对某种格点资料来说观测与模拟的线性趋势在不同下垫面状况下差异并不大。因此，可认为夏季风影响过渡区不同下垫面即所有格点的通量模拟有着相同的线性统计偏差。由于格点资料与观测资料之间的显著线性关系，观测值可以表示成单个格点资料线性函数的形式，即 $O_{\mathrm{obs}} = a_i + b_i S_{\mathrm{sim}i}$，$O_{\mathrm{obs}}$是观测资料，$S_{\mathrm{sim}i}$是某种原始格点资料。由此，观测资料也可以进一步改写成多种格点资料多元线性函数形式，即

$$O_{\mathrm{obs}} = a + \sum_n b_i S_{\mathrm{sim}i}. \tag{3}$$

因此，根据已有的观测数据和多种格点资料，并结合多元线性回归可反推获得公式（3）里的截距 a 和回归系数b_i。若将已知的截距和回归系数与格点资料相结合，可反演得到受实际通量观测约束的新格点资料。

3.3　数据集构建的精度验证方法

为了验证构建方法的有效性，我们引入交叉验证方法对其进行检验。具体步骤是：将 12 个站的观测资料作为多元回归模型的训练样本进一步构建得到一套新数据集，剩余一个站的观测资料用作验证样本，新数据集双线性插值到验证站点得到模拟值。为保证验证方法的客观性和公平性，每个站点都轮流作为验证站点，剩余站点资料作为模型构建的训练样本进行操作，此步骤在所有站点重复一次。把所有验证站点的模拟值综合起来，与观测值进行比较得到平均的交叉验证均方根误差（RMSE_CV）。将构建数据集的交叉验证均方根误差与其他原始格点数据集相应的均方根误差比较，可考察数据集构建方法的有效性。由于交叉验证方法将模型构建样本和验证样本分离开来，验证结果能够有效的检验统计模型的客观性和稳定性，因此这种方法在统计建模中被广泛使用（Yao et al., 2016; Tramontana et al., 2016）。

通量格点资料的均方差可以表示成三个偏差项组合的形式，包括模拟结果的平均偏差、与观测资料的相关偏差和标准差偏差贡献（Gupta et al., 2009），具体分解为

表 3　5种格点资料的误差统计情况

Table 3　Errors statistics of five gridded data

资料名称	净辐射通量R_{n}			感热通量H_{S}			潜热通量H_{L}		
	RMSE/W m^{-2}	Bias/W m^{-2}	R	RMSE/W m^{-2}	Bias/W m^{-2}	R	RMSE/W m^{-2}	Bias/W m^{-2}	R
NCEP/DOE	34.06	12.46	0.90	32.93	9.23	0.69	20.76	11.45	0.79
JRA-25	23.76	3.08	0.92	18.77	4.48	0.76	14.67	2.21	0.85
ERA-Int	20.40	−0.78	0.93	12.66	4.98	0.83	15.16	3.40	0.86
MERRA	24.45	10.55	0.92	22.21	14.85	0.77	15.47	3.50	0.86
GLDAS2-NOAH	27.97	19.94	0.93	32.92	26.31	0.63	17.22	1.04	0.80

注：RMSE、Bias、R分别表示格点资料的均方根误差、系统误差以及格点资料与观测资料的线性相关系数。

$$E_{\mathrm{MSE}} = 2\sigma_{\mathrm{d}}\sigma_{\mathrm{obs}}(1-\rho) + (\sigma_{\mathrm{d}} - \sigma_{\mathrm{obs}})^2 + (\mu_{\mathrm{d}} - \mu_{\mathrm{obs}})^2, \quad (4)$$

其中，ρ是观测数据和格点资料的相关系数，σ_{d}是格点资料的标准差，σ_{obs}是观测数据的标准差，μ_{d}是格点资料的平均值，μ_{obs}是观测数据的平均值。

这种分解方法可以帮助从通量变率和平均值等不同方面检验本文构建方法的模拟效果。

4 结果和讨论

4.1 通量数据集的构建

根据公式（3）计算得到三种热通量多元回归方程的截距和系数（表 4）。在净辐射和感热的多元回归模型中，ERA-Int 资料的系数分别是 0.6218 和 0.594，在几种原始格点资料里回归系数最大，多元回归模型赋予其最高的权重，说明 ERA-Int 资料在数据构建过程中占据主导地位。对于潜热，MERRA、JRA-25 和 ERA-Int 资料的回归系数较大，在数据构建中占有较大比重。从表 4 还可以看出，NCEP/DOE 资料在三个多元回归模型中的系数均呈现为负值，而其他原始格点数据集的系数均为正值，可能与 NCEP/DOE 资料模拟与观测值的拟合直线斜率大于 1 有直接关系，回归模型中负的回归系数修正了 NCEP/DOE 资料对陆面通量数值的过大模拟。

结合 1979～2010 年格点资料的月平均数据将表 4 中观测资料与格点资料之间的统计关系应用到夏季风影响过渡区所处的格点上，就产生出了观测资料和格点资料相融合的新数据集。再将构建的数据集双线性插值至 13 个观测站点上，便得到构建的通量数据与实际观测在所有站点上的散点分布（图 5）。由图可见，数据散点比较集中的分布在 1∶1 线两侧，比原始格点资料模拟值散点（图 4）更为接近实际观测，特别是构建的感热和潜热数据集更明显。构建的新数据集与原始的格点资料相比有显著的精度提高。构建的净辐射、感热和潜热数据集均方根误差分别为 17.5 W m^{-2}、8.7 W m^{-2} 和 12.2 W m^{-2}，相对于 ERA-Int 资料（表 3 所示）分别减小了 2.9 W m^{-2}、4.0 W m^{-2} 和 3.0 W m^{-2}，与

表 4 三种陆面通量多元回归模型的截距和回归系数

Table 4 Interception and regression coefficients of three multiple regression models for land surface fluxes

陆面通量	截距/W m^{-2}	回归系数				
		NCEP/DOE	JRA-25	ERA-Int	MERRA	GLDAS2-NOAH
R_{n}	−8.1894	−0.4522	0.2826	0.6218	0.2019	0.3943
H_{S}	5.1904	−0.1113	0.0596	0.594	0.1396	0.0093
H_{L}	2.854	−0.1512	0.2401	0.2057	0.3972	0.191

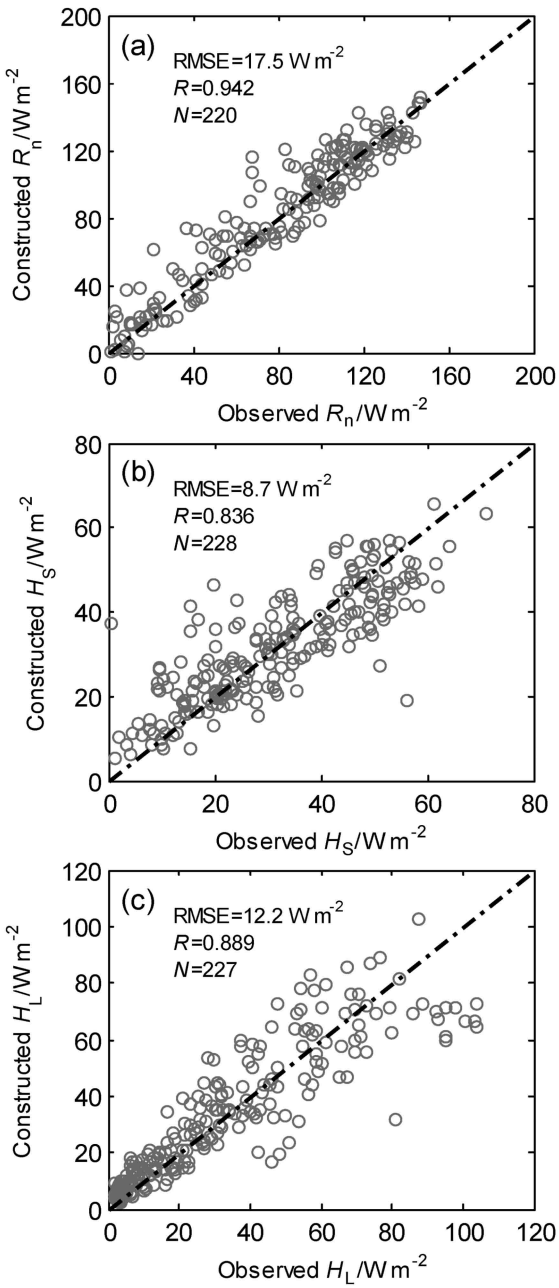

图 5 新构建的（a）净辐射通量、（b）感热通量和（c）潜热通量数据集与观测值的散点图，RMSE、R、N 分别表示格点资料的均方根误差、格点资料与观测资料的线性相关系数、样本数

Fig. 5 Scatter plots of newly constructed (a) net radiation fluxes (R_{n}), (b) sensible heat fluxes (H_{S}), and (c) latent heat fluxes (H_{L}) datasets and observations, RMSE, R, N represent the root mean square error of grid datasets, linear correlation coefficients between grid data and observation, sample number, respectively

其他原始格点资料相比，降低程度普遍更大，而构建的三种通量数据集与实际观测的相关系数分别为 0.942、0.836 和 0.889，相对于 ERA-Int 分别提高了 0.01、0.01 和 0.03。这表明观测资料很大程度上限制和约束了构建数据集的误差，提高了构建数据集的精度。

4.2　构建方法的验证

然而，由于数据集构建过程已经充分利用了观测资料的信息，构建结果本身已经包含了实际观测的贡献，构建的数据集精度上的提高并不能证明通量数据构建方法本身的有效性。因此，有必要采用交叉验证的方法检验数据构建方法是否会提高通量构建结果的精度。我们计算了原始格点数据集的均方根误差和构建的新数据集交叉验证均方根误差（表 5）。对于净辐射、感热和潜热，与将所有站点数据作为回归模型训练样本的验证结果相比，构建数据集的交叉验证均方根误差分别增大了 4.6 W m^{-2}、0.7 W m^{-2} 和 1.6 W m^{-2}，说明数据集构建所用的多元回归模型对作为训练样本的观测资料存在一定的依赖性。尽管如此，感热和潜热构建数据集交叉验证的均方根误差依旧要小于所有原始格点资料，例如，相对于 ERA-Int 资料分别降低了 3.3 W m^{-2} 和 1.4 W m^{-2}。尽管净辐射的交叉验证均方根误差略高于 ERA-Int 资料，但仍然小于其他原始格点资料，而且净辐射交叉验证数据集的标准差偏差和平均值偏差均要低于所有原始格点资料，表明本文的数据构建方法有自身的优势和有效性，在多种统计指标上构建数据集的精度要普遍优于原始格点资料。

本文数据构建方法依托于多元线性回归模型，

表 5　构建数据集与原始格点数据交叉验证的均方根误差（RMSE_CV）

Table 5　Root mean square error of cross-validation (RMSE-CV) between constructed and original gridded datasets

数据集	交叉验证的均方根误差		
	R_n/W m^{-2}	H_S/W m^{-2}	H_L/W m^{-2}
构建数据集	**22.1**	**9.4**	**13.8**
NCEP/DOE	34.1	32.9	20.8
JRA-25	23.8	18.8	**14.7**
ERA-Int	**20.4**	**12.7**	15.2
MERRA	24.5	22.2	15.5
GLDAS2-NOAH	28.0	32.9	17.2

注：黑色字体数字表示一列中最小的两个数。

前人的研究（Shi and Liang, 2013; Yao et al., 2016）还讨论了逐步回归、贝叶斯平均以及支持向量回归等其他线性回归修正方案的效果。总体上，不同统计方案反演的结果没有太大差异，但均优于对单个格点资料订正后的结果，由于多元回归方案较为简单并且易于提高构建数据集的精度，不失为一种优秀的统计订正方法。实际上，以上几种基于线性回归的统计订正方案均借鉴了多模式集合预报的思想，本质上是带有权重的多模式集合平均方法。本研究涉及的多模式集合用实际通量观测来确定单个模式的权重，可以降低单个模式的随机和系统性偏差以及不稳定性，并反映出总体的预报趋势，降低了模拟的不确定性，预报效果总体上高于单个集合成员（周兵等, 2006; 柯宗建等, 2009）。

根据公式（4），格点资料的均方差可以分解为相关偏差项、标准差偏差项和平均值偏差项等三种偏差贡献项的形式，这种分解方法可以帮助评估分解的各个偏差项对格点数据集的贡献程度。由图 6 可以看出，在三种偏差贡献项之中，5 种原始格点资料和构建数据集的相关偏差贡献项基本都是最大的，NCEP/DOE 资料最为显著。在原始格点资料之中，ERA-Int 资料对三种陆面热通量模拟能力均比较突出，平均值偏差和标准差偏差贡献均很小，其良好的陆面通量模拟性能在其他的研究中也有所体现（Decker et al., 2012; Li et al., 2017）。而构建的数据集相对于原始格点资料表现更为优异，均方差贡献主要是相关偏差项，其他两个偏差项则很小，其实是在 ERA-Int 资料基础上进一步消除了存在的平均值偏差和标准差偏差项，尤其感热和潜热更显著。从三个偏差贡献项的分布看，通量构建方法降低了平均值偏差项和标准差偏差项等系统性偏差，因此新数据集能够较好的抓住通量趋势变化，并且反映出的平均值也比较准确，这有利于减少气候变化研究的不确定性（Jung et al., 2009; Decker et al., 2012）。值得一提的是，本文的数据集构建方法处于数学统计订正的范畴，对于非系统性误差尚缺乏有效的修正能力，减小陆面通量的非系统性模拟偏差仍旧需要对数值模式的物理过程和参数化方案的科学改进。

4.3　不确定性分析

4.3.1　原始格点数据集的影响

原始格点数据集本身存在的误差可能会通过数据构建过程传递给构建的新数据集，由此给数据集

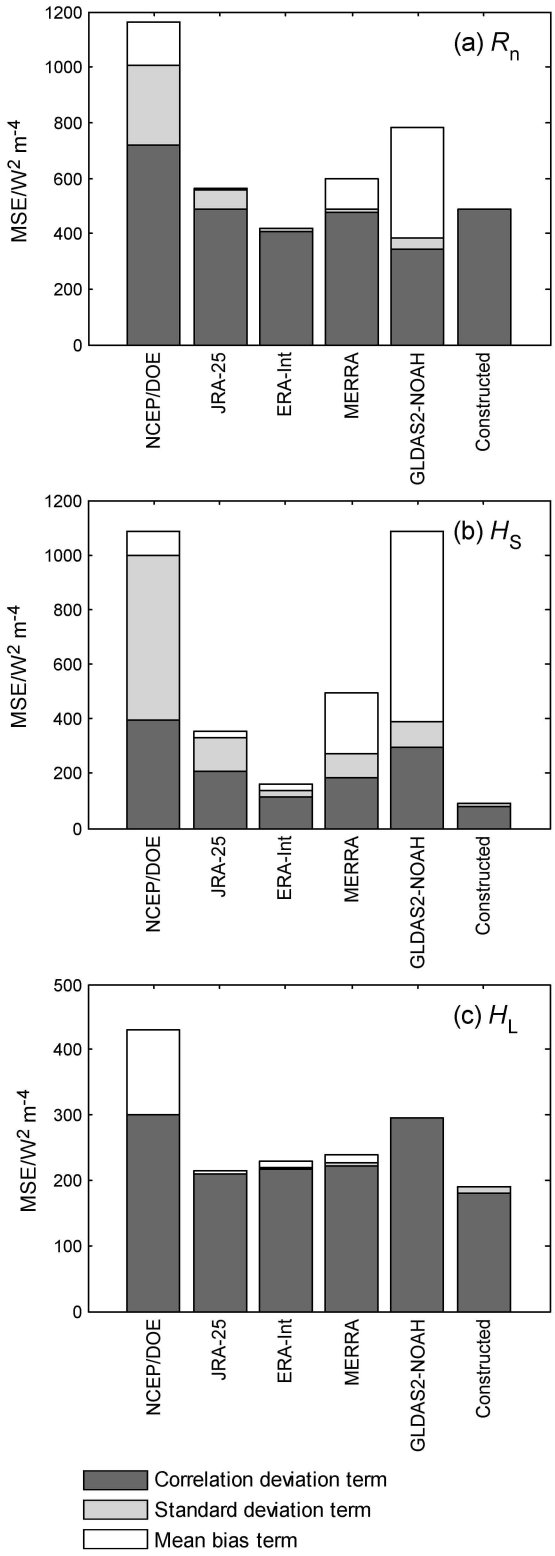

图 6 不同格点资料（a）净辐射通量、（b）感热通量和（c）潜热通量均方差的相关偏差项、标准差偏差项和平均值偏差项贡献分布

Fig. 6 The distributions of contributions from correlation deviation term, standard deviation term, and mean bias term of the mean square error (MSE) in (a) net radiation fluxes, (b) sensible heat fluxes, and (c) latent heat fluxes for different grid datasets

精度带来一定的不确定性。其中，原始格点产品所用的陆面模式参数化方案普遍存在缺陷，这是造成地表通量模拟不准确的一个重要原因。以热力粗糙度为例，它用于湍流热通量的计算，是陆面模式里的重要参数，其参数化方案设计是否科学会直接影响陆面通量的模拟效果。例如，NOAH 陆面模型利用 Zilitinkevich 方案计算热力粗糙度，然而 Zilitinkevich 方案计算的热力学粗糙度缺乏有效的日变化，并且高估了白天热力粗糙度，使地表感热偏大而地表温度偏低（Yang et al., 2008）。另外，ERA-Int 资料的内置陆面模式中冠层阻抗的参数化公式过于依赖下垫面类型，而且空气动力学阻抗参数化公式对风速的敏感度过高，可能会引起陆面可利用能量分配的误差（Zhou and Wang, 2016），尤其在落叶阔叶林和农田等高植被覆盖区域误差更为明显。另外，现有的陆面模式对土壤成分、类型和土壤根系分布的描述普遍还不够完善，导致土壤水热输送的参数化方案不够准确，会显著影响土壤湿度和热通量的模拟（Chen et al., 2012; Zhou and Wang, 2016）。

为了方便比较，在通量构建过程中，5 种原始格点资料重新插值到了相同空间分辨率的网格上，重采样过程中不同格点插值间隔的选取可能会影响通量构建结果（Jiménez et al., 2011）。为了定量化评估插值格点间隔的选取对数据构建结果的可能影响，将原始格点数据集分别插值到 0.25°、0.5°、1°、1.5°、2°和 2.5°空间分辨率的网格上，并获得不同插值间隔下原始格点数据集和构建的新数据集均方根误差分布（图 7）。可以发现，几种原始格点数据集均方根误差在不同空间分辨率上非常接近，之间的差异几乎不超过 3 W m^{-2}，远低于原始格点资料本身数十 W m^{-2} 的误差精度，因此不难看出重采样过程中插值间隔的取值对数据集构建的影响基本可以忽略。部分原因可能来源于数据集构建涉及到的观测站点具有较好的下垫面代表性，并且满足格点尺度上均一性的要求，因此重采样过程中不同网格间隔的插值结果差异很小，不会给数据集构建带来大的不确定性。

4.3.2 原始观测资料的影响

涡动相关系统虽然被认为是目前观测陆面通量最为准确的手段，但是原始数据即便经过了一系列的订正和处理，反演的通量依旧存在可观的误差，感热和潜热观测的相对误差分别可达到 5%～20%

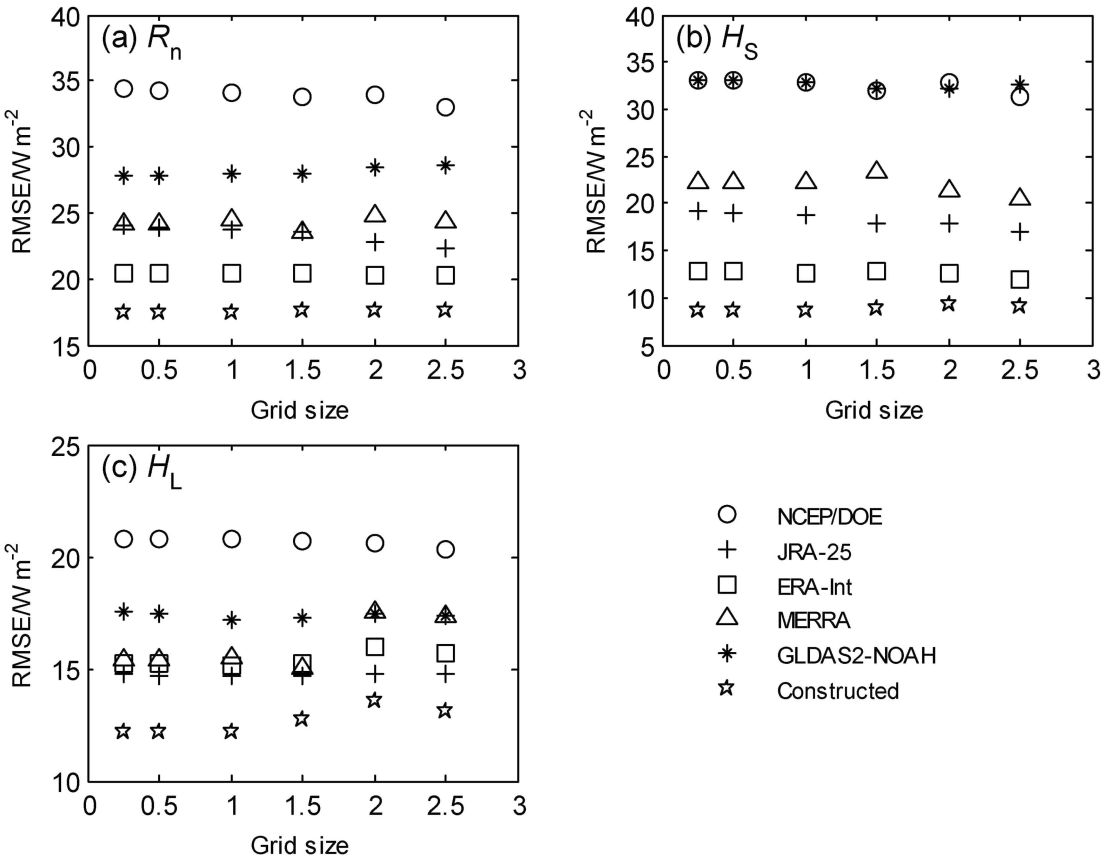

图 7　不同格点资料的（a）净辐射通量、（b）感热通量和（c）潜热通量在多个插值网格下的均方根误差分布

Fig. 7　RMSE distributions of (a) net radiation fluxes, (b) sensible heat fluxes, and (c) latent heat fluxes at multiple grid scales for different grid datasets

和 10%～20%（Foken, 2008）。另外，站点实际通量观测通常会出现能量不平衡问题，对能量不平衡原因的认知以及对观测资料的后处理也会给数据集构建带来一定不确定性。Foken et al.（2006）、Foken（2008）认为目前涡动相关方法对低频大尺度湍涡的捕捉能力不够，导致湍流通量观测值偏低，继而产生了能量不平衡的问题。湍流协谱累积频率分布（Ogive）研究（Finnigan et al., 2003; Zuo et al., 2012）指出涡动相关系统会忽略湍流谱中的低频能量，不能完全探测到所有尺度涡旋的湍流能量。因此，有学者（Twine et al., 2000）提出根据波文比将能量不平衡量分配给感热和潜热，强迫湍流热通量满足地表能量平衡条件。不过由于能量不平衡问题在不同观测环境和下垫面状况下的产生机制比较复杂，上述订正方法并不普及。有些学者认为把能量不闭合全部归因于湍流通量的低估并不合理，能量平衡分量的观测仪器足迹的不一致等因素也是重要原因。因此，对能量不平衡问题不同的认知以及对原始观测资料采取的相应的后处理方案也是通量数据集构建结果误差不确定性来源之一。

4.4　陆面热通量对夏季风的响应

东亚夏季风系统在年际和年代际尺度上存在显著的变化，因此东亚夏季风强度和影响区域的北边缘线并不稳定，结果导致夏季风影响边缘带的降水和陆面干湿程度在年际尺度上剧烈波动，同时也必然伴随着陆面能量交换时空分布的迅速调整（张强等，2019）。分析夏季 6～8 月典型夏季风过渡区陆面热通量交换与东亚夏季风强度的关系可以帮助了解陆面能量交换对季风系统这一强气候信号的响应规律，同时也能检验构建的通量数据集在年际变化上的可靠性，这一定程度上可以弥补现有陆面观测年限不足，无法有效检验陆面通量年际变化这一缺陷。

我们根据构建的通量数据集计算出 1979～2010 年夏季风影响过渡区陆面热通量夏季气候平均和年变率空间分布（图 8）。总体来看，陆面通

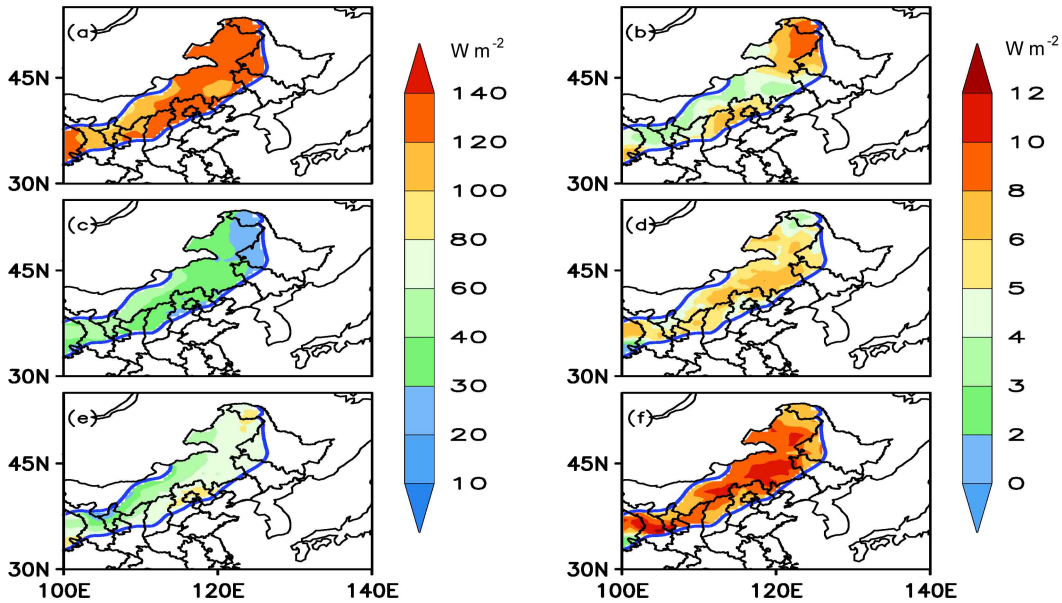

图 8 夏季风影响过渡区（a、b）净辐射通量、（c、d）感热通量和（e、f）潜热通量的夏季气候平均（左，单位：W m^{-2}）和年际变率（右，单位：W m^{-2}）空间分布

Fig. 8 Spatial distributions of summer climate mean (left, units: W m^{-2}) and interannual variability (right, units: W m^{-2}) of (a, b) net radiation fluxes, (c, d) sensible heat fluxes, and (e, f) latent heat fluxes in the EASM boundary area

量数值呈现较为一致的空间分布格局。夏季风影响过渡区净辐射处于 100 W m^{-2} 到 140 W m^{-2} 之间，感热通量处于 20 W m^{-2} 到 60 W m^{-2} 之间，潜热处于 40 W m^{-2} 到 80 W m^{-2} 之间，潜热通量在夏季风影响过渡区东部一带数值较大，在 70 W m^{-2} 左右。对于年际变率，净辐射变率在内蒙古东部以及山西、河北北部一带较大，超过 6 W m^{-2}，其他地区不足 5 W m^{-2}，感热变率在大部分地区处于 5 W m^{-2} 以上，潜热通量年际变率更大，大多数区域超过 8 W m^{-2}。虽然陆面湍流能量来源于净辐射，但是湍流热通量年际变率在夏季风影响过渡区大部分区域远大于净辐射通量。多种陆面通量数据集在中国区域的评估（Li et al., 2017）表明，夏季风影响过渡区在时间变化上是一个湍流热通量年际变率高值区，在空间上是通量空间梯度最大的区域（曾剑等, 2016）。因此，夏季风影响过渡区可看作是一个地气湍流能量交换的热点区域，然而净辐射通量却没有表现出湍流热通量类似的时空变化规律。显然，夏季风影响过渡区湍流热通量大的年际变率不是由净辐射变化直接导致的，而是由地表可利用能量分配或者波文比年际变率引起的。研究表明，气候干湿变化会显著影响陆面能量分配和波文比的数值（da Rocha et al., 2009; Kumar and Merwade, 2011），尤其处于夏季风影响边缘的地区受影响更强。在夏季风南北进退的过程中，湍流热通量对夏季风响应似乎比净辐射更加强烈，是年际变化活跃的地表能量平衡分量。

夏季风过渡区内部存在一定的地理和气候差异性，处于夏季风过渡区东段的东北地区土壤湿度较高、气温较低，而西段的黄土高原处于半干旱区，气候和土壤都更为干旱。根据曾剑等（2016）的研究，我们将 115°E 作为分界线将夏季风影响过渡区分为东西两部分。西半部分主要包括黄土高原半干旱区和内蒙古中部半干旱区，东半部分包括内蒙古东部和东北地区西部一带。

由 2.2 节我们计算出东西两部分的夏季风影响持续时间，它是夏季风北边缘超过研究区域每个格点所处纬度并向北推进的平均持续时间，反映了东亚夏季风影响的维持能力。东亚夏季风进退会改变雨带位置，同时影响陆面干湿程度、叶面积指数以及地表粗糙度、地表阻抗等关键陆面参数（李栋梁等, 2013; 曾剑等, 2016）。而陆面热量和水分交换会显著响应地表粗糙度和地表阻抗等陆面参数的改变，其变化会反映出东亚夏季风在过渡区推进和撤退的影响痕迹。图 9 表明夏季风过渡区东西部分的陆气湍流能量交换与夏季风影响持续时间有着显著

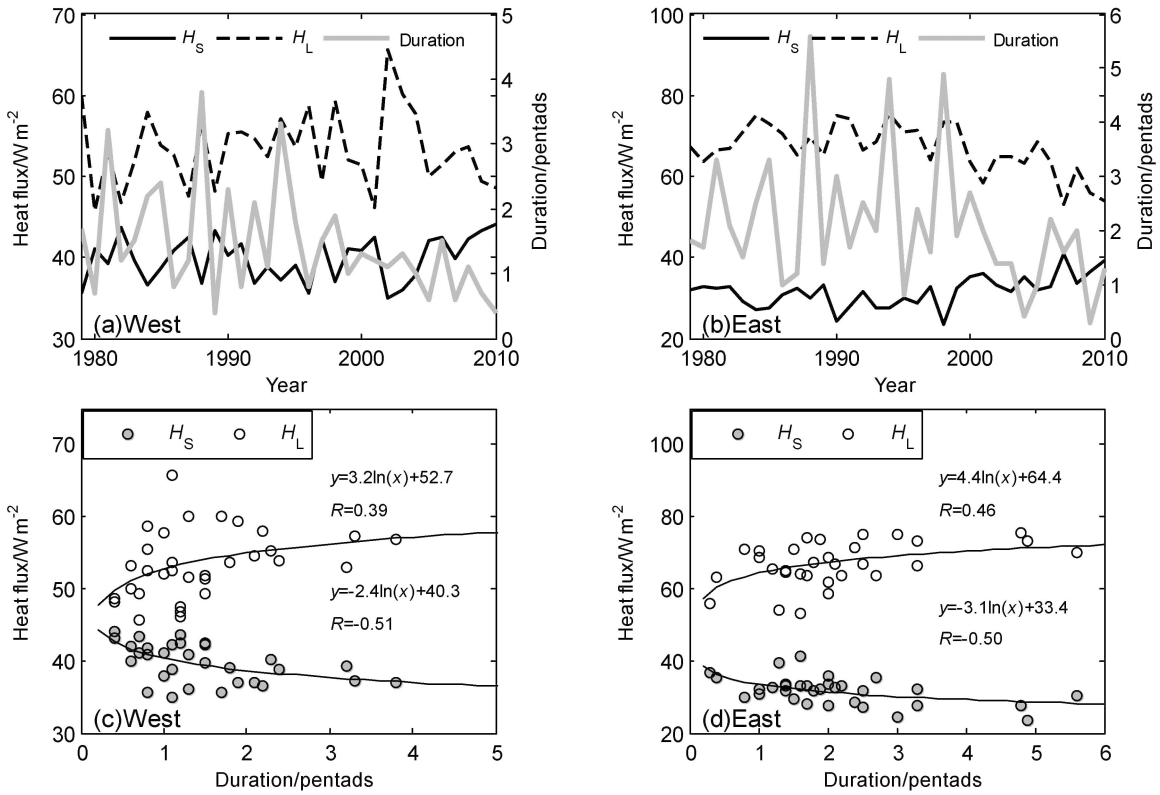

图 9　夏季风影响过渡区（a）西部和（b）东部区域湍流热通量（左侧纵坐标）、夏季风持续时间指数（右侧纵坐标）年际变化以及（c）西部和（d）东部湍流热通量和夏季风持续时间指数的散点分布

Fig. 9　Interannual variations of turbulent heat fluxes (left y-axis) and duration index of summer monsoon (right y-axis) in (a) west and (b) east regions of the EASM boundary area. Scatter distributions between turbulent heat fluxes and duration index of summer monsoon for (c) west and (d) east regions of the EASM boundary area

相关性，感热（潜热）通量与夏季风持续时间指数呈明显反向（正向）对应关系，这种关系近似对数函数而非线性关系，并且感热和潜热变率在夏季风持续时间较低时更大。例如，夏季风影响过渡区西部区域感热通量与持续时间的拟合关系式为 y=2.4ln$x$+40.3，相关系数为 0.51（通过 99% 信度水平的显著性检验），在持续时间小于 2.5 候时，随着持续时间的增加，感热通量表现为明显的降低趋势，之后变得相对平缓。这反映出当夏季风发展不充分时，感热交换会显著增强，而潜热交换会受到更强的抑制；反之，东亚夏季风充分发展会使湍流能量交换的年际变化更加平稳。由此可见，东亚夏季风是驱动陆面湍流能量交换年际变化的强气候信号，湍流热通量对夏季风持续时间的显著响应关系也在侧面证明了构建数据集在反映通量年际变化趋势上的可信性。

前人研究揭示出东亚夏季风活动强度在 1979 年之后表现为明显的年代际尺度减弱（丁一汇等, 2018）。图 9a、b 表明，在 1998 年之后，过渡区的夏季风持续时间不断降低，西半部和东半部降幅分别达到 0.7 pentads (10 a)$^{-1}$ 和 1.8 pentads (10 a)$^{-1}$，导致向北的水汽输送和辐合减弱，雨带形成的水汽条件不充足，因此夏季风过渡区感热增加显著，西半部和东半部上升速率分别达到 4.0 W m^{-2} (10 a)$^{-1}$ 和 6.9 W m^{-2} (10 a)$^{-1}$。CMIP5 多模式集合平均表明，东亚地区未来经向和纬向的海陆温差会加大，东亚夏季风环流和强度会得到加强（姜大膀和田芝平, 2013）。这意味着夏季风过渡区受夏季风影响的持续时间在未来可能会加大，陆面感热（潜热）交换会减弱（增大），夏季湍流通量年际变化幅度可能会减少。

5　结论和讨论

目前已经有多种格点通量数据集应用于气候研究，但数据精度偏低并且缺乏实际观测资料的检验和进一步订正，因此模拟效果一直受到广泛质疑。

在中国夏季风影响过渡区，多个位于不同下垫面的陆面过程试验站已经运行并积累了一定时间的资料，但是有限的站点数量和观测年份仍旧限制了观测资料在气候变化方面的应用。实际站点观测和格点数据都有着各自的优点和局限性。本研究在综合考虑两类数据特点的基础上，将多个站点通量实测资料与目前常用的 5 种格点资料相融合并形成一个受实际观测约束并拥有较大时空尺度的新数据集。这套月平均感热、潜热和净辐射通量数据集适用于夏季风影响过渡区，空间分辨率为 0.5°×0.5°。此外，交叉验证结果表明构建方法具有可信性，构建的通量数据集相对于原始格点资料精度更高，最大程度上消除了原始格点资料的统计偏差。

对于中国区域，夏季风影响过渡区是一个湍流热通量年际变率高值区，在空间上也是通量空间梯度最大的区域，但是净辐射通量却没有表现出湍流热通量类似的时空变化规律。事实上，东亚夏季风是驱动陆面湍流能量交换年际变化的强气候信号，湍流热通量显著响应着夏季风持续时间，二者定量关系近似于对数函数关系，并且感热和潜热变率在夏季风持续时间较低时更大，这也在侧面证明了构建的陆面通量格点数据集在反映通量年际变化趋势上的可信性。

值得一提的是，除了夏季风活动，中纬度西风环流和 ENSO 等气候信号也都会影响夏季风过渡区气候和陆面能量交换（Zhang et al., 2019; Zeng and Zhang, 2019），并且这些影响存在显著的空间差异。另外，潜热（蒸散发）同时也是陆面水循环的重要组成。生态系统和土壤内水分迁移和存储有着显著的区域性特征，通过水热的再分配机制，长期作用于陆面能量交换过程（Zhang et al., 2012）。总体来说，包括夏季风活动在内的多种大尺度气候信号和局地特殊的水热交换机制在不同时空尺度上有着复杂的相互作用，共同塑造着夏季风过渡区气候和能量交换分布格局。

需要注意的是，目前尚缺乏夏季风影响过渡区北部森林下垫面的实际陆面通量观测，所以对于此区域森林下垫面格点通量构建会存在一定不确定性，因此科学界应该加强对中国北方森林生态系统碳水循环和热量交换的观测力度。尽管本研究使用的多个格点资料在目前众多数据集中具有一定优势，但其内置陆面模式仍旧缺乏针对夏季风影响过渡区的参数化方案改进和优化，并且未同化实际陆面通量数据，对该区域陆面能量平衡的模拟仍会产生不确定性。未来需要综合多种下垫面类型和气候区的陆面通量实际观测来检验陆面模式的性能，进一步改进和优化模式的物理过程和参数化方案。

致谢 中国科学院大气物理所提供了“中国干旱/半干旱区实验观测协同与集成研究”多个站点资料，中国通量网提供了锡林格勒站的观测数据。另外，兰州大学半干旱气候与环境观测站（SACOL）提供了榆中站的多年陆面观测资料，在此深表感谢。

参考文献（References）

Betts A K, Ball J H, Beljaars A C M, et al. 1996. The land surface-atmosphere interaction: A review based on observational and global modeling perspectives [J]. J. Geophys. Res., 101(D3): 7209−7225. doi:10.1029/95JD02135

Chen Y Y, Yang K, Tang W J, et al. 2012. Parameterizing soil organic carbon’s impacts on soil porosity and thermal parameters for eastern Tibet grasslands [J]. Sci. China: Earth Sci., 55(6): 1001−1011. doi:10.1007/s11430-012-4433-0

da Rocha H R, Manzi A O, Cabral O M, et al. 2009. Patterns of water and heat flux across a biome gradient from tropical forest to savanna in Brazil [J]. J. Geophys. Res., 114(G1): G00B12. doi:10.1029/2007JG000640

Decker M, Zeng X B. 2009. Impact of modified Richards equation on global soil moisture simulation in the Community Land Model (CLM3.5) [J]. J. Adv. Model. Earth Syst., 1(3): 5. doi:10.3894/JAMES.2009.1.5

Decker M, Brunke M A, Wang Z, et al. 2012. Evaluation of the reanalysis products from GSFC, NCEP, and ECMWF using flux tower observations [J]. J. Climate, 25(6): 1916−1944. doi:10.1175/JCLI-D-11-00004.1

丁一汇, 司东, 柳艳菊, 等. 2018. 论东亚夏季风的特征、驱动力与年代际变化 [J]. 大气科学, 42(3): 533−558. Ding Y H, Si D, Liu Y J, et al. 2018. On the characteristics, driving forces and inter-decadal variability of the East Asian summer monsoon [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 42(3): 533−558. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1712.17261

Finnigan J J, Clement R, Malhi Y, et al. 2003. A re-evaluation of long-term flux measurement techniques. Part I: Averaging and coordinate rotation [J]. Bound.-Layer Meteorol., 107(1): 1−48. doi:10.1023/A:1021554900225

Fisher J B, Tu K P, Baldocchi D D. 2008. Global estimates of the land–atmosphere water flux based on monthly AVHRR and ISLSCP-II data, validated at 16 FLUXNET sites [J]. Remote Sens. Environ., 112(3): 901−919. doi:10.1016/j.rse.2007.06.025

Foken T, Wimmer F, Mauder M, et al. 2006. Some aspects of the energy balance closure problem [J]. Atmos. Chem. Phys., 6(12): 4395−4402. doi:10.5194/acp-6-4395-2006

Foken T. 2008. The energy balance closure problem: An overview [J]. Ecol. Appl., 18(6): 1351−1367. doi:10.1890/06-0922.1

符淙斌, 马柱国. 2008. 全球变化与区域干旱化 [J]. 大气科学, 32(4): 752−760. Fu C B, Ma Z G. 2008. Global change and regional aridification [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32(4): 752−760. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2008.04.05

Gupta H V, Kling H, Yilmaz K K, et al. 2009. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling [J]. J. Hydrol., 377(1-2): 80−91. doi:10.1016/j.jhydrol.2009.08.003

胡豪然, 钱维宏. 2007. 东亚夏季风北边缘的确认 [J]. 自然科学进展, 17(1): 57−65. Hu H R, Qian W H. 2007. Identifying the northernmost summer monsoon location in East Asia [J]. Prog. Nat. Sci. (in Chinese), 17(1): 57−65. doi:10.3321/j.issn:1002-008X.2007.01.009

胡隐樵, 高由禧, 王介民, 等. 1994. 黑河实验 (HEIFE) 的一些研究成果 [J]. 高原气象, 13(3): 225−236. Hu Y Q, Gao Y X, Wang J M, et al. 1994. Some achievements in scientific research during HEIFE [J]. Plateau Meteor. (in Chinese), 13(3): 225−236. doi:10.3321/j.issn:1000-0534.1994.03.019

黄菲, 李栋梁, 汤绪, 等. 2009. 用过程透雨量确定的东亚夏季风北边缘特征 [J]. 应用气象学报, 20(5): 530−538. Huang F, Li D L, Tang X, et al. 2009. Determination on the north boundary of summer monsoon in East Asian with soaking rainfall [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 20(5): 530−538. doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2009.05.003

姜大膀, 田芝平. 2013. 21 世纪东亚季风变化: CMIP3 和 CMIP5 模式预估结果 [J]. 科学通报, 58(8): 707−716. Jiang D B, Tian Z P. 2013. East Asian monsoon change for the 21st century: Results of CMIP3 and CMIP5 models [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 58(8): 707−716. doi:10.1007/s11434-012-5533-0

Jiménez C, Prigent C, Mueller B, et al. 2011. Global intercomparison of 12 land surface heat flux estimates [J]. J. Geophys. Res., 116(D2): D02102. doi:10.1029/2010JD014545

Jung M, Reichstein M, Bondeau A. 2009. Towards global empirical upscaling of FLUXNET eddy covariance observations: Validation of a model tree ensemble approach using a biosphere model [J]. Biogeosciences, 6(10): 2001−2013. doi:10.5194/bg-6-2001-2009

Jung M, Reichstein M, Ciais P, et al. 2010. Recent decline in the global land evapotranspiration trend due to limited moisture supply [J]. Nature, 467(7318): 951−954. doi:10.1038/nature09396

柯宗建, 张培群, 董文杰, 等. 2009. 最优子集回归方法在季节气候预测中的应用 [J]. 大气科学, 33(5): 994−1002. Ke Z J, Zhang P Q, Dong W J, et al. 2009. An application of optimal subset regression in seasonal climate prediction [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33(5): 994−1002. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2009.05.10

Koster R D, Dirmeyer P A, Guo Z C, et al. 2004. Regions of strong coupling between soil moisture and precipitation [J]. Science, 305(5687): 1138−1140. doi:10.1126/science.1100217

Kumar S, Merwade V. 2011. Evaluation of NARR and CLM3.5 outputs for surface water and energy budgets in the Mississippi River basin [J]. J. Geophys. Res., 116(D8): D08115. doi:10.1029/2010JD014909

李栋梁, 邵鹏程, 王慧, 等. 2013. 中国东亚副热带夏季风北边缘带研究进展 [J]. 高原气象, 32(1): 305−314. Li D L, Shao P C, Wang H, et al. 2013. Advances in research of the north boundary belt of East Asia subtropical summer monsoon in China [J]. Plateau Meteor. (in Chinese), 32(1): 305−314. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2012.00030

Li H Y, Fu C B, Guo W D. 2017. An integrated evaluation of land surface energy fluxes over China in seven reanalysis/modeling products [J]. J. Geophys. Res., 122(16): 8543−8566. doi:10.1002/2016JD026166

李杉, 符淙斌. 2015. 中美半干旱区长期地表通量序列的构建及检验 [J]. 气象科学, 35(1): 1−8. Li S, Fu C B. 2015. Reconstruction and validation of a long-term surface flux sequence in the semi-arid region of China and North America [J]. Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese), 35(1): 1−8. doi:10.3969/2013jms.0041

李正泉, 于贵瑞, 温学发, 等. 2004. 中国通量观测网络 (ChinaFLUX) 能量平衡闭合状况的评价 [J]. 中国科学 D: 地球科学, 34(S2): 46−56. Li Z Q, Yu G R, Wen X F, et al. 2004. Energy balance closure at ChinaFLUX sites [J]. Science in China (Earth Sciences), 34(S2): 46−56.

林祥, 钱维宏. 2012. 全球季风和季风边缘研究 [J]. 地球科学进展, 27(1): 26−34. Lin X, Qian W H. 2012. Review of the global monsoon and monsoon marginal zones [J]. Adv. Earth Sci. (in Chinese), 27(1): 26−34.

吕达仁, 陈佐忠, 陈家宜, 等. 2002. 内蒙古半干旱草原土壤—植被—大气相互作用 (IMGRASS) 综合研究 [J]. 地学前缘, 9(2): 295−306. Lü D R, Chen Z Z, Chen J Y, et al. 2002. Composite study on Inner Mongolia semi-arid grassland soil–vegetation–atmosphere interaction (IMGRASS) [J]. Earth Sci. Front. (in Chinese), 9(2): 295−306. doi:10.3321/j.issn:1005-2321.2002.02.007

Onogi K, Tsutsui J, Koide H, et al. 2007. The JRA-25 reanalysis [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 85: 369−432. doi:10.2151/jmsj.85.369

欧廷海, 钱维宏. 2006. 东亚季风边缘带上的植被变化 [J]. 地球物理学报, 49(3): 698−705. Ou T H, Qian W H. 2006. Vegetation variations along the monsoon boundary zone in East Asia [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 49(3): 698−705. doi:10.3321/j.issn:0001-5733.2006.03.012

Roberts J B, Robertson F R, Clayson C A, et al. 2012. Characterization of turbulent latent and sensible heat flux exchange between the atmosphere and ocean in MERRA [J]. J. Climate, 25(3): 821−838. doi:10.1175/jcli-d-11-00029.1

Rodell M, Houser P R, Jambor U, et al. 2004. The global land data assimilation system [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 85(3): 381−394. doi:10.1175/BAMS-85-3-381

Seneviratne S I, Corti T, Davin E L, et al. 2010. Investigating soil moisture–climate interactions in a changing climate: A review [J]. Earth-Science Reviews, 99(3-4): 125−161. doi:10.1016/j.earscirev.2010.02.004

Sheffield J, Wood E F, Munoz-Arriola F. 2010. Long-term regional estimates of evapotranspiration for Mexico based on downscaled ISCCP data [J]. J. Hydrometeor., 11(2): 253−275. doi:10.1175/2009jhm1176.1

Shi Q Q, Liang S L. 2014. Surface-sensible and latent heat fluxes over the Tibetan Plateau from ground measurements, reanalysis, and satellite data [J]. Atmos. Chem. Phys., 14(11): 5659−5677. doi:10.5194/acp-14-5659-2014

Shi Q Q, Liang S L. 2013. Characterizing the surface radiation budget

over the Tibetan Plateau with ground-measured, reanalysis, and remote sensing data set. 1: Methodology [J]. J. Geophys. Res., 118(17): 9642−9657. doi:10.1002/jgrd.50720

史正涛. 1996. 中国季风边缘带自然灾害的区域特征 [J]. 干旱区资源与环境, 10(4): 1−7. Shi Z T. 1996. Regional characters of natural disaster in marginal monsoon belt of China [J]. J. Arid Land Resour. Environ. (in Chinese), 10(4): 1−7.

Simmons A, Uppala S, Dee D, et al. 2006. ERA-Interim: New ECMWF reanalysis products from 1989 onwards [J]. ECMWF Newsl., 110: 25−35.

Steinfeld G, Letzel M O, Raasch S, et al. 2007. Spatial representativeness of single tower measurements and the imbalance problem with eddy-covariance fluxes: Results of a large-eddy simulation study [J]. Bound.-Layer Meteor., 123(1): 77−98. doi:10.1007/s10546-006-9133-x

Stephens G L, Li J L, Wild M, et al. 2012. An update on Earth's energy balance in light of the latest global observations [J]. Nature Geoscience, 5(10): 691−696. doi:10.1038/ngeo1580

汤绪, 陈葆德, 梁萍, 等. 2009. 有关东亚夏季风北边缘的定义及其特征 [J]. 气象学报, 67(1): 83−89. Tang X, Chen B D, Liang P, et al. 2009. Definition and features of the north edge of Asian summer monsoon [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 67(1): 83−89. doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2009.01.009

Tramontana G, Jung M, Schwalm C R, et al. 2016. Predicting carbon dioxide and energy fluxes across global FLUXNET sites with regression algorithms [J]. Biogeosciences, 13(14): 4291−4313. doi:10.5194/bg-13-4291-2016

Trenberth K E, Stepaniak D P. 2004. The flow of energy through the Earth's climate system [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 130(603): 2677−2701. doi:10.1256/qj.04.83

Twine T E, Kustas W P, Norman J M, et al. 2000. Correcting eddy-covariance flux underestimates over a grassland [J]. Agric. For. Meteor., 103(3): 279−300. doi:10.1016/s0168-1923(00)00123-4

王澄海, 王蕾迪. 2010. 西北半干旱区感、潜热通量特征及近 50 年来的变化趋势 [J]. 高原气象, 29(4): 849−854. Wang C H, Wang L D. 2010. Characteristics of sensible and latent heat fluxes in semi-arid region of northwest China and change trend in recent 50 years [J]. Plateau Meteor. (in Chinese), 29(4): 849−854.

Wang K C, Liang S L. 2008. An improved method for estimating global evapotranspiration based on satellite determination of surface net radiation, vegetation index, temperature, and soil moisture [J]. J. Hydrometeor., 9(4): 712−727. doi:10.1175/2007JHM911.1

Yang K, Koike T, Ishikawa H, et al. 2008. Turbulent flux transfer over bare-soil surfaces: Characteristics and parameterization [J]. J. Appl. Meteor. Climatol., 47(1): 276−290. doi:10.1175/2007JAMC1547.1

Yao Y J, Liang S L, Li X L, et al. 2016. Assessment and simulation of global terrestrial latent heat flux by synthesis of CMIP5 climate models and surface eddy covariance observations [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 223: 151−167. doi:10.1016/j.agrformet.2016.03.016

曾剑, 张强, 王胜. 2011. 中国北方不同气候区晴天陆面过程区域特征差异 [J]. 大气科学, 35(3): 483−494. Zeng J, Zhang Q, Wang S. 2011. Regional differences in the characteristics of clear-sky land surface processes in distinct climatic zones over northern China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35(3): 483−494. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.03.09

曾剑, 张强, 王春玲. 2016. 东亚夏季风边缘摆动区陆面能量时空分布规律及其与气候环境的关系 [J]. 气象学报, 74(6): 876−888. Zeng J, Zhang Q, Wang C L. 2016. Spatial–temporal pattern of surface energy fluxes over the East Asian summer monsoon edge area in China and its relationship with climate [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 74(6): 876−888. doi:10.11676/qxxb2016.064

Zeng J, Zhang Q. 2019. A humidity index for the summer monsoon transition zone in East Asia [J]. Climate Dyn., 53(9): 5511−5527. doi:10.1007/s00382-019-04876-0

张强, 胡向军, 王胜, 等. 2009. 黄土高原陆面过程试验研究 (LOPEX) 有关科学问题 [J]. 地球科学进展, 24(4): 363−371. Zhang Q, Hu X J, Wang S, et al. 2009. Some technological and scientific issues about the experimental study of land surface processes in Chinese Loess Plateau (LOPEX) [J]. Adv. Earth Sci. (in Chinese), 24(4): 363−371. doi:10.3321/j.issn:1001-8166.2009.04.002

张强, 黄菁, 张良. 2013. 黄土高原区域气候暖干化对地表能量交换特征的影响 [J]. 物理学报, 62(13): 139202. Zhang Q, Huang J, Zhang L. 2013. Warming and drying climate over Loess Plateau area in China and its effect on land surface energy exchange [J]. Acta Phys. Sinica (in Chinese), 62(13): 139202. doi:10.7498/aps.62.139202

Zhang Q, Zeng J, Zhang L Y. 2012. Characteristics of land surface thermal-hydrologic processes for different regions over North China during prevailing summer monsoon period [J]. Sci. China Earth Sci., 55(11): 1872−1880. doi:10.1007/s11430-012-4373-8

Zhang H L, Zhang Q, Yue P, et al. 2016. Aridity over a semiarid zone in northern China and responses to the East Asian summer monsoon [J]. J. Geophys. Res., 121(23): 13901−13918. doi:10.1002/2016JD025261

张强, 岳平, 张良, 等. 2019. 夏季风过渡区的陆—气相互作用: 述评与展望 [J]. 气象学报, 77(4): 758−773. Zhang Q, Yue P, Zhang L, et al. 2019. Land–Atmosphere over the summer monsoon transition zone in China: A review and prospects [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 77(4): 758−773. doi:10.11676/qxxb2019.038

Zhang Q, Lin J J, Liu W C, et al. 2019. Precipitation seesaw phenomenon and its formation mechanism in the eastern and western parts of Northwest China during the flood season [J]. Sci. China: Earth Sci., 62(12): 2083−2098. doi:10.1007/s11430-018-9357-y

周兵, 赵翠光, 赵声蓉. 2006. 多模式集合预报技术及其分析与检验 [J]. 应用气象学报, 17(S1): 104−109. Zhou B, Zhao C G, Zhao S R. 2006. Multi-model ensemble forecast technology with analysis and verification of the results [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 17(S1): 104−109. doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2006.z1.015

Zhou C L, Wang K C. 2016. Evaluation of surface fluxes in ERA-interim using flux tower data [J]. J. Climate, 29(4): 1573−1582. doi:10.1175/JCLI-D-15-0523.1

Zuo H C, Xiao X, Yang Q D, et al. 2012. On the atmospheric movement and the imbalance of observed and calculated energy in the surface layer [J]. Sci. China Earth Sci., 55(9): 1518−1532. doi:10.1007/s11430-012-4378-3