

张 坤,刘永强,阿依尼格尔·亚力坤,等. 塔克拉玛干沙漠腹地土壤热通量的陆面过程与卫星遥感研究[J]. 江苏农业科学,2020,48(20):256-264.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2020.20.048

塔克拉玛干沙漠腹地土壤热通量的 陆面过程与卫星遥感研究

张 坤¹, 刘永强^{1,2}, 阿依尼格尔·亚力坤¹, 刘宗会¹, 聂泽鑫¹, 李火青³

(1. 新疆大学资源与环境科学学院,新疆乌鲁木齐 830046; 2. 绿洲生态教育部重点实验室,新疆乌鲁木齐 830046;

3. 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所/中国气象局塔克拉玛干沙漠气象野外科学试验基地,新疆乌鲁木齐 830002)

摘要:利用 Noah 陆面模型对塔克拉玛干沙漠腹地塔中站土壤热通量进行了模拟,采用 SMAP 卫星地表土壤热通量数据及风云 2 号 FY-2G 卫星陆表温度数据对塔克拉玛干沙漠腹地塔中站地表土壤热通量进行估算。结果说明:(1)Noah 陆面模型在塔克拉玛干沙漠腹地模拟土壤热通量精度较高,决定系数 R^2 为 0.972,能够反映塔中站土壤热通量的变化情况;(2)SMAP 卫星地表土壤热通量数据与塔中站的实测值变化相位基本相同,决定系数 R^2 为 0.855;(3)FY-2G 卫星数据反演的地表土壤热通量和实测值相关性较高,决定系数 R^2 为 0.921。Noah 陆面模型模拟塔中站土壤热通量精度较高,具有一定适用性;SMAP、FY-2G 卫星估算塔中站地表土壤热通量具有一定适用性。

关键词:塔克拉玛干沙漠腹地;土壤热通量;Noah;SMAP;FY-2G

中图分类号:S127

文献标志码:A

文章编号:1002-1302(2020)20-0256-09

土壤热通量是地表能量平衡中的重要组成部分,可表征土壤表层和深层的热交换状况^[1],对地气能量和物质相互作用、地气间能量分配^[2]都有着重要的影响。地表土壤热通量作为土壤热通量的重要组成部分,其变化规律影响着整个土壤热通量的梯度变化,开展地表土壤热通量的研究,能进一步加强对土壤热通量的理解。目前,土壤热通量的研究方法主要有观测法、数值模拟法、遥感反演法 3 种^[3]。其中,观测法利用观测仪器获取所在区域土壤热通量,或者通过观测土壤温度、湿度计算获得土壤热通量。张文斌等利用 2009—2011 年塔克拉玛干沙漠大气环境观测试验站测得的土壤热通量,分析了塔克拉玛干沙漠腹地土壤热通量在不同天气条件下的变化特征^[4]。吕国红等利用盘锦芦苇湿地试验站获得的实测数据,分析了 2015 年 3 月至 2016 年 2 月不同土壤深度土壤热通量的动态变化特征,表明不同土壤深度的土壤热通量日、年变化

基本呈“S”形^[5]。徐自为等利用 2010 年馆陶站的土壤温湿度观测数据,探讨了测算土壤热通量的多种方法对能量闭合率的影响^[6]。数值模拟法可以利用陆面模型(Land Surface Model,简称 LSM)模拟出土壤热通量。李火青在塔克拉玛干沙漠塔中站,优化了模型 CoLM 2014(Common Land Model 2014)的参数,从而提高了土壤热通量的模拟精度,模拟值与实测值的决定系数 R^2 从参数优化前的 0.635 提高到优化后的 0.742^[7]。Chen 等利用 Noah 陆面模型,结合不同热力学粗糙度参数化方案,模拟出 4 个不同站点的土壤热通量,根据其结果判定不同热力学粗糙度参数化方案的优劣^[8]。遥感反演土壤热通量的优势在于研究范围可由站点扩大到区域尺度。齐斐斐等利用 SEBS(Surface Energy Balance System)模型,结合塔克拉玛干沙漠及周边地区的 MODIS(Moderate Resolution Imaging Spectrometer)遥感数据,通过对模型参数修正,对该地区的地表能量通量进行反演估算,其中地表土壤热通量约为 300 W/m^2 ,与实测值高度吻合,说明利用遥感数据可以有效地实现地表土壤热通量由点到面的转换^[9]。王煜东等利用南京地区地面气象观测资料,结合遥感影像和 SEBAL(Surface Energy Balance Algorithm for Land)模型反演了该地区地表土壤热通量,结果显示该地区季节变化程度表现为

收稿日期:2019-11-29

基金项目:国家自然科学基金面上项目(编号:41675011);国家自然科学基金青年科学基金(编号:41801019)。

作者简介:张 坤(1993—),男,山东济宁人,硕士,主要从事地表能量通量参数化与遥感反演研究。E-mail:zkun1993@163.com。

通信作者:刘永强,博士,教授,主要从事地表能量通量陆面过程参数化模拟。E-mail:lyqxju@163.com。

春季最大,夏季次之,冬季最小^[3]。

塔克拉玛干沙漠作为我国面积最大的沙漠,其特殊的下垫面,对我国西北气候环境有着重要的影响^[10]。在该地区利用 Noah 陆面模型、SMAP (Soil Moisture Active and Passive Mission) 卫星、FY-2G 卫星对土壤热通量的研究鲜有报道。因此,SMAP 和 FY-2G 卫星反演该地区地表土壤热通量的精度如何, Noah 陆面模型模拟该地区的土壤热通量是否可行,以及沙漠地区的土壤热通量变化规律,这些研究显得格外重要。

本研究分析了塔克拉玛干沙漠塔中站 2017 年近地层常规气象数据,并将上述 3 种方法结合起来探究土壤热通量的变化规律,利用 Noah 陆面模型对塔中站土壤热通量进行模拟,结合 SMAP 和 FY-2G 数据对塔中站地表土壤热通量进行遥感反演估算,得出土壤热通量的年、季、日变化规律,并与实测数据进行对比,探究陆面模型和卫星数据在塔克拉玛

干沙漠地区的精度。

1 研究区概况

塔克拉玛干沙漠位于我国西北干旱区塔里木盆地中心,是我国面积最大的流动性沙漠^[11]。属于典型的大陆性气候,年平均气温为 12.1℃,年平均降水量 25.9 mm,年潜在蒸发量达 3 798.5 mm,气候极端干旱^[12]。沙漠地区气候类型、覆盖类型单一、地势较为平坦^[7]。沙粒主要以中值粒径为 0.093 mm 的细沙为主,流动性很强,沙丘类型主要为纵向沙丘,分布于克里雅河东部到塔里木河下游间^[13]。中国气象局塔克拉玛干沙漠大气环境观测试验站(以下简称塔中站)位于塔里木盆地中部(38°58'N, 83°39'E)(图 1),观测站安装涡动相关探测系统、地表能量探测系统、土壤热通量探测仪等,为地表土壤能量通量各分量的研究提供了观测数据。

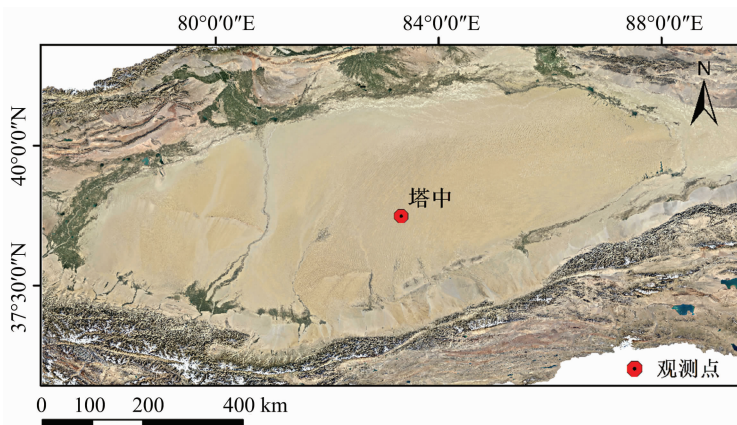


图1 塔中观测站的地理位置

2 数据与方法

2.1 站点数据

本研究选取 2017 年塔中站点风速、地表温度、相对湿度、气压、太阳短波辐射、大气长波辐射、降水数据作为 Noah 陆面模型的大气强迫数据,具体观测仪器及设备信息如表 1 所示。

2.2 陆面模型数据

模型植被分类方案采用 USGS (U. S. Geological Survey) 方案,土壤数据来自联合国粮农组织 (FAO) 和世界土壤数据库 (Harmonized World Soil Database Version)。Noah 陆面模型被美国环境预报中心广泛应用于 WRF (Weather Research and Forecasting)、RegCM (Regional Climate Model) 等气候模型,主要

改进有:土壤分层改为 4 层 (0.1、0.3、0.6、1.0 m),增加了冠层传导方程^[14]、裸地蒸散、植被物候学^[15]、新的径流模式^[16]、热力学粗糙度的参数化方案、地表层感热交换系数^[17]。Noah 作为单点陆面模型,需要输入的大气强迫数据包括风速、温度、湿度、气压、长短波辐射、降雨量,主要输出土壤温度、土壤湿度、潜热通量、感热通量、土壤热通量、净辐射。其中,土壤热通量在 Noah 陆面模型的计算公式^[10]如下:

$$G = K_T (\Theta_1) \frac{T_{\text{sf}} - T_1}{h_1} \quad (1)$$

式中: G 为土壤热通量 (W/m^2); K_T 为土壤热传导率 [$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$], 在固定站点可以被假定为一个常数; Θ_1 为土壤含水量 (m^3/m^3), 在干燥的土壤条件

表 1 塔中站陆气交互观测系统设备

观测仪器	仪器型号	生产国家	仪器参数
风速风向仪	Metone 010/020C	美国	测量范围:0 ~ 60 m/s/0 ~ 360°, 精度: ±1%, 工作温度: -50 ~ 65 °C
空气温、湿度仪	Vaisala HMP45C	芬兰	测量范围: -40 ~ 60 °C, 精度: ±0.2 °C
土壤温、湿度仪	Campbell 1091L/CS616	美国	测量范围: -50 ~ 100 °C, 精度: ±0.2 °C/0.05%
土壤热通量探测仪	Hukseflux HFP01	荷兰	精度: ≤3%, 温度范围: -30 ~ 70 °C
短波辐射仪	Kipp & Zonen CNR - 1	荷兰	光谱范围: 285 ~ 2 800 nm, 最大辐照度: 4 000 W/m ² , 响应时间: ≤5 s (95%), 工作温度: -10 ~ 40 °C
长波辐射仪	Kipp & Zonen CNR - 1	荷兰	光谱范围: 4 500 ~ 42 000 nm, 静辐照范围: -250 ~ 250 W/m ² , 响应时间: ≤18 s (95%)

下数值很小,在沙漠地区可以忽略; T_1 为地表温度(°C); h_1 为第 1 层土壤深度的一半(m)。

本研究利用 Noah 陆面模型估算出的 5 cm 深度土壤热通量与实测值进行对比,分析 Noah 陆面模型在塔克拉玛干沙漠地区塔中站的土壤热通量精度。

2.3 遥感数据

SMAP 卫星是美国国家航空航天局(NASA)于 2015 年 1 月 31 日发射的 1 颗遥感探测卫星。SMAP 卫星原始 L1 级产品数据通过一定模型和算法反演得到了十多种更高级别数据^[18],其中通过反演得到的 L4 级产品数据包含了净辐射、潜热通量、感热通量、地表土壤热通量、土壤湿度、地表温度、地面气温等。本研究选用 SMAP 的地表土壤热通量产品数据通过 <https://nsidc.org/> 得到。其时间分辨率为 3 h,空间分辨率为 9 km,数据质量完全满足本研究的需求。

FY-2G 是我国自行研制的地球静止轨道气象卫星^[19],众多学者对该卫星图像质量^[20]、云量^[21]、地表发射率^[22]进行了评价和验证。本研究通过国家卫星气象中心(<http://satellite.nsmc.org.cn>)下载了 2017 年 6 月 12 日覆盖塔中区域的陆表温度数据,其空间分辨率为 5 km,时间分辨率为 1 h。通过遥感反演得到地表土壤热通量,反演方法如下:

$$G_0 = \frac{T - 273}{\alpha} (0.0038\alpha + 0.0074\alpha^2) (1 - 0.98NDVI^4) R_n. \quad (2)$$

式中: G_0 为地表土壤热通量(W/m²); T 为地表温度(°C); α 为地表反照率; $NDVI$ 为 MODIS 归一化植被指数; R_n 为净辐射通量(W/m²)^[3]。

利用 SMAP 卫星地表土壤热通量数据、FY-2G 卫星反演的地表土壤热通量与实测值对比,分析这 2 种卫星在塔克拉玛干沙漠地区的精度。

2.4 验证数据

5 cm 深度土壤热通量实测值通过塔中站点土

壤热通量探测仪探测得到,地表土壤热通量实测值通过塔中站点实测数据计算得到。

地表土壤热通量采用一种实测土壤热通量和热储存相结合的方法(PlateCal 法)^[23],计算公式如下:

$$G_0 = G_5 + \frac{C_v}{\Delta t} \sum_{z=5\text{ cm}}^{z=0\text{ cm}} [T(z_{i,t} + \Delta t) - T(z_{i,t})] \Delta z. \quad (3)$$

式中: G_0 为校正到地表的土壤热通量(W/m²); C_v 为土壤体积热容量[J/(cm³ · °C)]; G_5 为热通量板观测到 5 cm 深度土壤热通量(W/m²); T 为不同深度处的土壤温度(°C); t 为时间(s); Δt 表示时间间隔(s); z 表示深度(m); i 表示变化趋势; Δz 表示不同深度的变化。

2.5 误差评估指标

为了评估 Noah 模型模拟结果和 SMAP 卫星数据,采用 3 种评估指标对方程的模拟结果和实测数据进行对比分析,分别为:决定性系数(R^2 ,用于表征模拟值和实测值之间的相关性)、均方根误差(root mean square error, RMSE)、偏差(Bias),常用来衡量模拟值和实测值间的误差。其计算公式如下:

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (T_{o,i} - \bar{T}_o)(T_{s,i} - \bar{T}_s)]^2}{\sum_{i=1}^n (T_{o,i} - \bar{T}_o)^2 \sum_{i=1}^n (T_{s,i} - \bar{T}_s)^2}; \quad (4)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_{s,i} - T_{o,i})^2}; \quad (5)$$

$$Bias = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_{s,i} - T_{o,i}). \quad (6)$$

式中: T_s 为模拟值, T_o 为实测值, \bar{T}_s 、 \bar{T}_o 分别为模拟值、实测值的平均值, $T_{s,i}$ 、 $T_{o,i}$ 分别为每个时次的模拟值、实测值。

3 结果与分析

3.1 大气强迫数据特征

塔克拉玛干沙漠腹地风速呈现季节性变化,冬

季风速振幅较小,夏季振幅较大。风速最大值出现在第 142 天,为 6.96 m/s ,最小值出现在第 309 天,为 0.584 m/s (图 2-a)。塔中站太阳直射强烈,沙粒易吸收热量,导致夏季地表温度急剧升高(图 2-b),地表温度呈现出单峰型分布规律,其变化范围为 $-15.04 \sim 40.82 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。相对湿度采用 0.5 m 高度的平均值,其变化特点为冬季高于其他季节,最大值出现在第 343 天,为 84.21% ,最小值出现在第 148 天,为 6.18% 。在 1 年内第 174、175 天,出现了降雨天气,降雨量分别达到 0.26 、 0.39 mm ,导致相对湿度急剧升高至 80.75% 、 79.59% (图 2-c)。气压呈现出冬季高、夏季低的变化特点,变化范围为 $874.85 \sim 913.82 \text{ hPa}$ (图 2-d)。长短波辐射变化呈现出夏季高,冬季低的特点,太阳短波辐射变化范围在 $43.05 \sim 353.02 \text{ W/m}^2$ 之间,大气长波辐射变化范围在 $192.03 \sim 466.93 \text{ W/m}^2$ 之间(图 2-e、2-f)。塔中站降水量全年稀少,2017 全年有 347 d 无降水(图 2-g)。

3.2 土壤热通量变化特征

3.2.1 1 年变化 Noah 陆面模型能够较好地模拟出土壤热通量的变化特征(图 3-a),模拟值变化范围是 $-25.22 \sim 29.67 \text{ W/m}^2$,实测值变化范围是 $-39.11 \sim 19.11 \text{ W/m}^2$ 。根据塔中天气记录日志,在 214 d 出现了短暂的降水天气,当日的模拟结果严重高估,是由于降水后的土壤湿度增大且维持的时间较短,表层水分快速蒸发,因此土壤热传导率回到干燥时的范围,实际传导入土壤的热量偏低。模型对土壤热通量的计算并没有考虑到这个情况,根据公式(1)进行模型模拟,会导致模拟结果出现严重偏高现象。在第 300~365 天,模型模拟出现了较为严重的低估现象,是由于 2017 年冬季塔中站出现了短暂降雪天气,下垫面地面有结冰现象,土壤湿度增加导致土壤热传导率较大,传导入土壤的热量偏高,模型同样没有考虑到这个情况,导致模型模拟结果出现较为严重的低估现象。

SMAP 卫星产品值和地表土壤热通量吻合度较高(图 3-b),地表土壤热通量卫星产品数据波动范围在 $-36.44 \sim 29.89 \text{ W/m}^2$ 之间,站点实测值波动范围在 $-47.79 \sim 21.25 \text{ W/m}^2$ 之间。在第 281 天,卫星产品值和站点实测值都出现了最低值,在 0~24、281~365 d,卫星产品值出现了低估现象。

3.2.2 季节变化 为了探究土壤热通量实测值、Noah 模型模拟值、SMAP 卫星数据的季节变化,采

用 4、7、10、1 月土壤热通量数据代表春、夏、秋、冬四季。由于 SMAP 卫星数据是由 3 h 数据合成的,因此,地表土壤热通量站点实测值由原来的 0.5 h 数据进行 3 h 平均处理,实现时间尺度上的匹配。由图 4 可知, Noah 模型模拟值、SMAP 卫星数据分别可以反映出土壤热通量、地表土壤热通量的季节变化,变化相位基本呈现连续的单峰型变化趋势。

在春季(图 4-a、图 4-e), Noah 模型模拟值和土壤热通量实测值变化振幅基本相同,模拟值和实测值吻合度较高,土壤热通量实测值变化范围为 $-72.61 \sim 203.94 \text{ W/m}^2$,模拟值变化范围为 $-71.55 \sim 167.29 \text{ W/m}^2$ 。SMAP 卫星数据和地表土壤热通量实测值变化振幅相差较小,SMAP 卫星数据的地表土壤热通量和站点实测值吻合度较高,地表土壤热通量实测值变化范围为 $-91.64 \sim 213.27 \text{ W/m}^2$, SMAP 卫星数据变化范围为 $-87.71 \sim 210.70 \text{ W/m}^2$ 。

在夏季(图 4-b、图 4-f), Noah 模型模拟值和土壤热通量实测值变化趋势基本相同,SMAP 卫星数据和地表土壤热通量实测值变化振幅相差较小。土壤热通量实测值变化范围为 $-85.37 \sim 194.75 \text{ W/m}^2$, Noah 模型模拟值变化范围为 $-77.03 \sim 182.87 \text{ W/m}^2$ 。地表土壤热通量实测值变化范围为 $-121.13 \sim 201.16 \text{ W/m}^2$, SMAP 卫星数据变化范围为 $-97.20 \sim 192.06 \text{ W/m}^2$ 。

在秋季(图 4-c、图 4-g),土壤热通量实测值变化范围为 $-78.60 \sim 217.70 \text{ W/m}^2$, Noah 模型模拟值变化范围为 $-87.20 \sim 218.69 \text{ W/m}^2$ 。在 10 月 10—15 日,模型模拟在正午时刻出现了低估现象。SMAP 卫星数据和地表土壤热通量实测值吻合程度较高,地表土壤热通量实测值变化范围为 $-99.93 \sim 265.11 \text{ W/m}^2$, SMAP 卫星数据变化范围为 $-77.78 \sim 158.03 \text{ W/m}^2$,在 10 月 8 日这天,地表土壤热通量站点实测值较低,SMAP 卫星数据也呈现出相应的变化趋势。

在冬季(图 5-d), Noah 模型模拟值和土壤热通量实测值吻合程度较高,SMAP 卫星数据和地表土壤热通量实测值吻合程度较低,卫星数据波动较大。土壤热通量实测值变化范围为 $-47.27 \sim 137.45 \text{ W/m}^2$, Noah 模型模拟值变化范围为 $-40.04 \sim 102.54 \text{ W/m}^2$,地表土壤热通量实测值变化范围为 $-66.78 \sim 149.61 \text{ W/m}^2$, SMAP 卫星数据变化范围为 $-83.3 \sim 179.30 \text{ W/m}^2$ 。

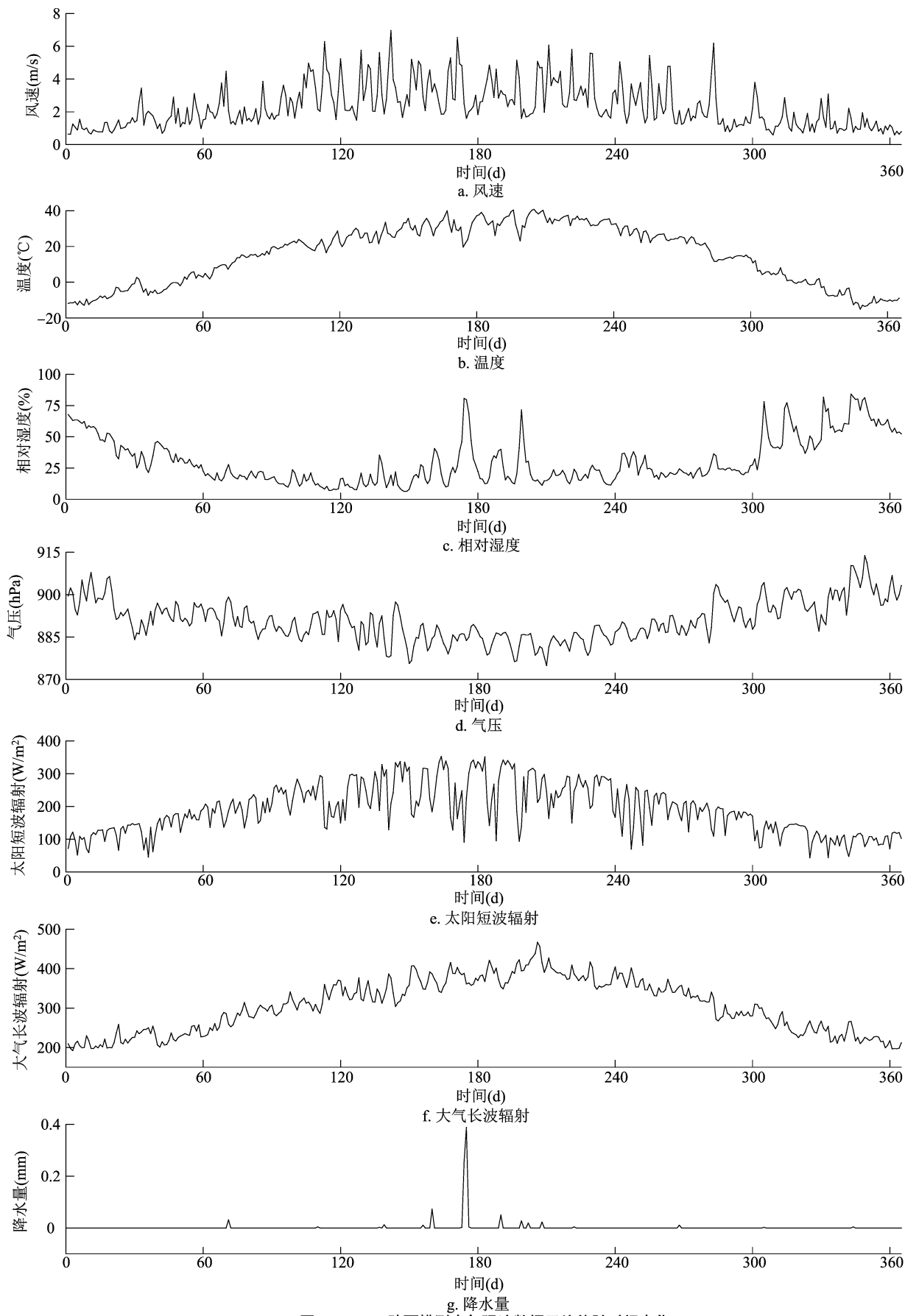


图2 Noah 陆面模型大气强迫数据日均值随时间变化

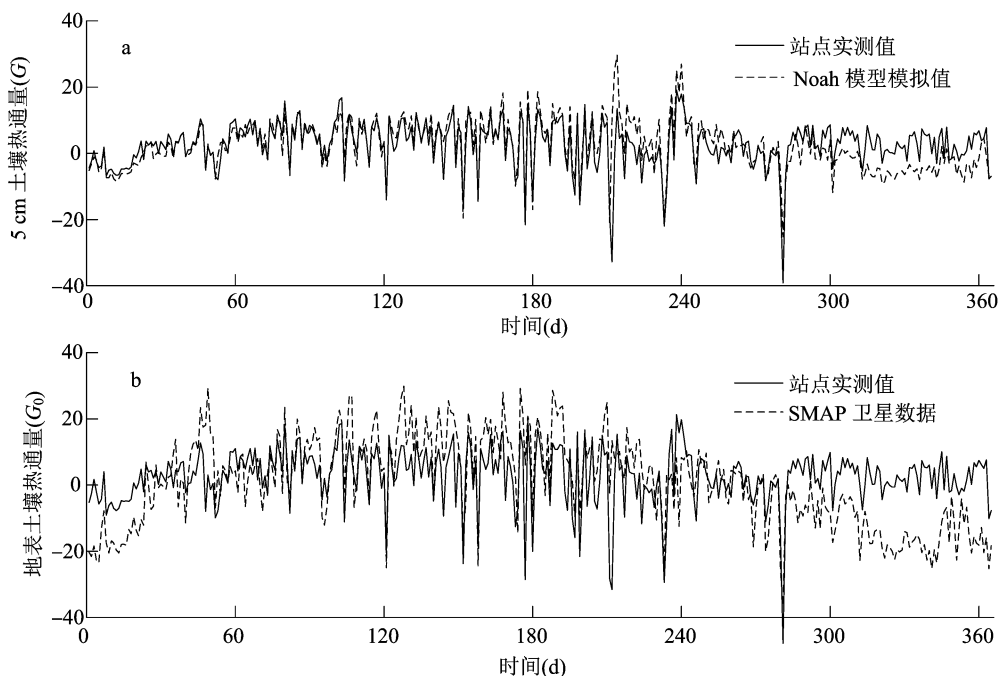


图3 Noah 模型模拟值、SMAP 卫星数据与日均实测值变化对比曲线

利用 1、4、7、10 月土壤热通量实测值、地表土壤热通量实测值、Noah 模型模拟值、SMAP 卫星数据的日均值数据,剔除异常值后,得出实测值和模拟值间的关系(图 5),其中 Noah 模型模拟值和土壤热通量实测值具有较好的相关性,决定性系数为 0.972,实测值和模拟值间的误差也比较小,均方根误差($RMSE$)为 4.000,偏差($Bias$)为 0.830,这说明 Noah 陆面模型在塔中站有一定精度。SMAP 卫星数据和地表土壤热通量实测值相关性较高,决定性系数为 0.885,均方根误差($RMSE$)为 2.687,偏差($Bias$)为 0.149,SMAP 卫星地表土壤热通量数据能够很好地反映塔中站地表土壤热通量的变化情况。

3.2.3 日变化 为了展示地表土壤热通量 1 d 的变化情况,利用 2017 年 6 月 12 日 FY-2G 陆表温度数据,结合公式(2),对地表土壤热通量进行遥感估算。FY 静止卫星采用格林威治时间,与塔中站相差 5 h 25 min,其数据时间间隔为 1 h。

图 6 显示了 2017 年 6 月 12 日 FY-2G 陆表温度数据对地表土壤热通量的估算值和实测数据的 1 d 变化情况。从图 6-a 中可以看出 1 d 内呈现单峰型变化趋势,估算值和实测值变化趋势大致相同,估算值和实测值最高值都出现在 08:00(格林威治时间,下同),分别为 147.58、158.85 W/m^2 ,随后地表土壤热通量呈现下降趋势,估算值在 22:00 达到最低值,为 -77.48 W/m^2 ,实测值在 16:00 达到

最低值,为 -52.99 W/m^2 。在 01:00—7:00、11:00—13:00、18:00—24:00 时,估算值出现低估现象,在 14:00—17:00 时,估算值出现了高估现象,由图 6-b 可知,估算值和实测值有较强的相关性,决定性系数为 0.944,FY-2G 陆表温度数据在塔克拉玛干沙漠腹地具有较好的精度,能够准确的反映出地表土壤热通量 1 d 的变化情况。

4 讨论

本研究利用 Noah 陆面模型模拟了塔克拉玛干沙漠塔中站土壤热通量,并能准确地反映其变化情况,并结合地表土壤热通量实测值验证了 SMAP 和 FY-2G 卫星在塔中站具有一定精度。

在塔克拉玛干沙漠地区,基于观测试验基础上的土壤热通量的研究已经展开,探究沙漠地区不同梯度、不同天气下土壤热通量的特征变化^[4,12,24],并且开展研究土壤热通量及其他能量通量对能量闭合率的影响^[25-26]。利用陆面模型可以模拟连续多年土壤热通量的变化情况,李火青等利用 Noah-MP 陆面模型模拟塔克拉玛干沙漠塔中站土壤热通量及其他能量通量,得出 Noah-MP 陆面模型在塔中站适用性较高的结论^[27]。金莉莉等在塔克拉玛干沙漠肖塘站通过对 CoLM 模型参数修正,利用不同参数化方案对肖塘地区地表土壤热通量进行模拟,得出适用于 CoLM 陆面模型模拟该地区地表土

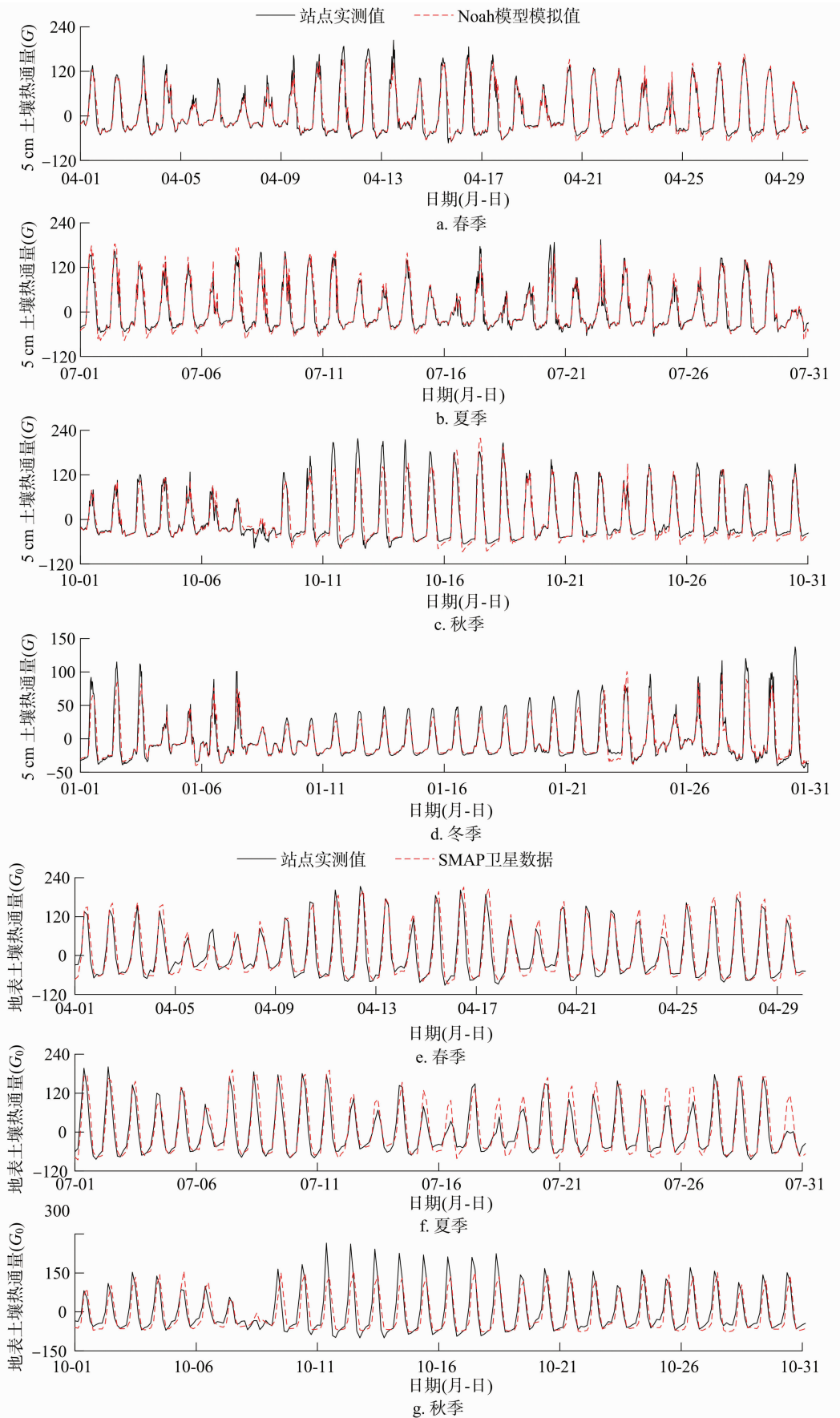
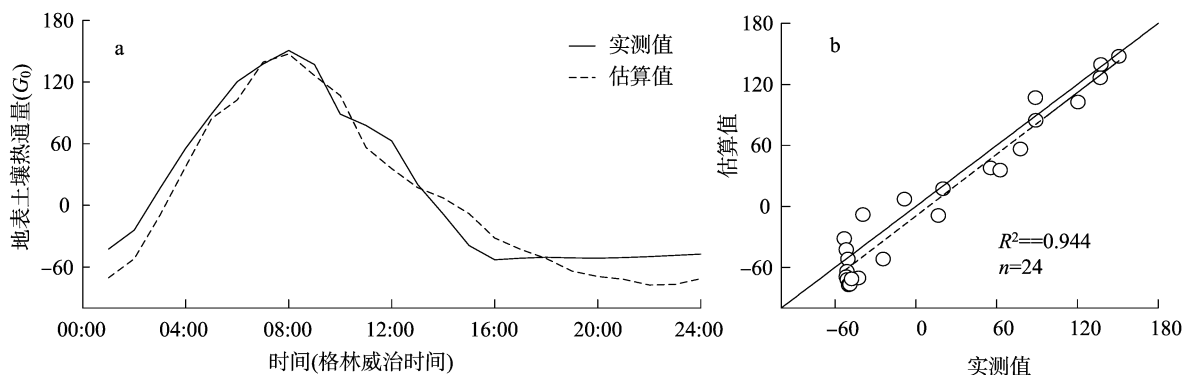
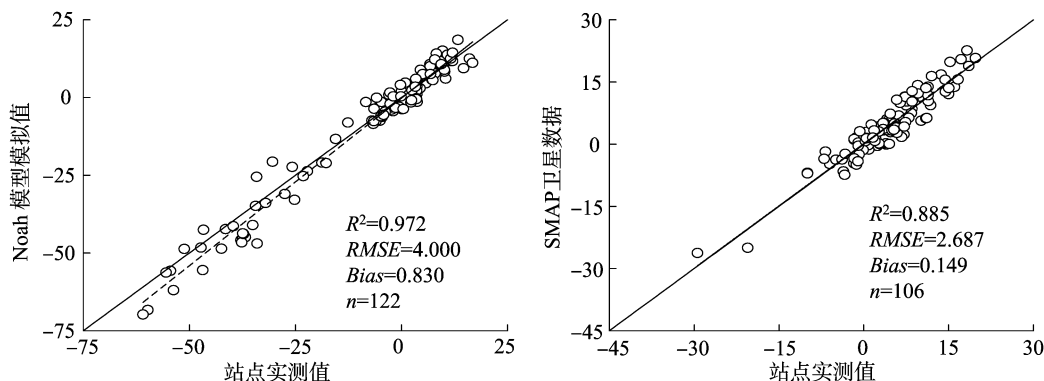
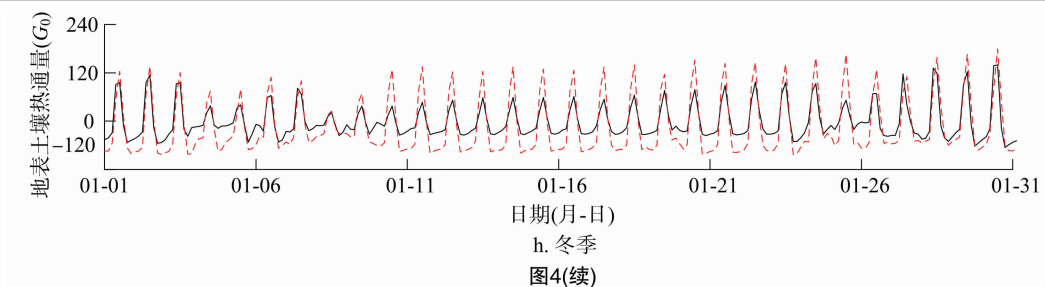


图4 季节变化曲线



壤热通量最优参数化方案^[28]。本研究利用 Noah 陆面模型,结合站点实测数据,验证了 Noah 陆面模型在塔克拉玛干沙漠塔中站具有一定的精度,这一结论可以为以后塔中站陆面过程的研究提供陆面模型参考。在塔克拉玛干沙漠地区,基于地表土壤热通量的遥感反演研究正处于发展阶段,齐斐斐等利用 SEBS 模型,并结合该地区的 MODIS 数据,通过遥感反演得到地表土壤热通量的空间变化^[9]。本研究验证了 SMAP 和 FY-2G 卫星在塔中站具有一定精度,为以后塔克拉玛干沙漠地区遥感反演研究提供了卫星来源。

本研究所涉及的陆面模型属于单点模型,所以尽管运用到了卫星遥感数据,但并没有体现出土壤

热通量的区域变化特征,在今后的研究中,要考虑区域模型的研究,结合卫星遥感数据,来探究整个塔克拉玛干沙漠区域土壤热通量的空间变化特征。

5 结论

本研究利用 2017 年塔中站点实测数据,分析了 Noah 陆面模型所需要的大气强迫数据特征,结合 Noah 陆面模型对塔中站土壤热通量进行陆面过程模拟对比验证。计算出地表土壤热通量站点实测值,并与 SMAP 卫星数据以及利用 FY-2G 陆表温度数据反演得到的地表土壤热通量进行了对比验证分析,主要结论如下:

(1) Noah 陆面模型在塔克拉玛干沙漠腹地具有

较好的模拟精度,能够较好地反映出塔克拉玛干沙漠腹地土壤热通量的变化情况,模拟值和实测值的相关性较高,在一定程度上代表了塔克拉玛干沙漠腹地土壤热通量的变化规律。

(2)SMAP 卫星数据与地表土壤热通量实测值相关性较高,具有一定的精度,能够较好地反映出塔克拉玛干沙漠腹地地表土壤热通量的变化情况。

(3)利用 FY-2G 陆表温度产品数据通过遥感反演得到的地表土壤热通量估算值,能够较好地反映出塔克拉玛干沙漠腹地地表土壤热通量日变化特征,估算值和实测值相关性较高。FY 作为静止卫星,为探究塔克拉玛干沙漠腹地乃至整个沙漠地区连续的地表土壤热通量变化提供了有力的数据支持。

参考文献:

- [1]李亮,张宏,胡波,等.不同土壤类型的热通量变化特征[J].高原气象,2012,31(2):322-328.
- [2]杨启东,左洪超,杨扬,等.近地层能量闭合度对陆面过程模式影响[J].地球物理学报,2012,55(9):74-86.
- [3]王煜东,赵小艳,徐向华,等.南京地区地表热通量的遥感反演分析[J].生态环境学报,2016,25(4):636-646.
- [4]张文斌,买买提艾力·买买提依明,何清,等.塔克拉玛干沙漠腹地土壤热通量变化特征[J].中国沙漠,2016,36(6):1666-1671.
- [5]吕国红,王笑影,贾庆宇,等.盘锦芦苇湿地土壤热通量变化特征研究[J].气象与环境学报,2018,34(6):156-160.
- [6]徐自为,刘绍民,徐同仁,等.不同土壤热通量测算方法的比较及其对地表能量平衡闭合影响的研究[J].地球科学进展,2013,28(8):875-889.
- [7]李火青.塔克拉玛干沙漠腹地陆面过程参数化与模拟[D].乌鲁木齐:新疆大学,2017:53-55.
- [8]Chen Y Y, Yang K, Zhou D G, et al. Improving the Noah land surface model in arid regions with an appropriate parameterization of the thermal roughness length[J]. Journal of Hydrometeorology, 2016, 11(4):995-1006.
- [9]齐斐斐,刘永强,买买提艾力·买买提依明,等. SEBS 模型在塔克拉玛干沙漠地区地表能量通量估算中的应用[J].干旱区资源与环境,2019,33(7):128-133.
- [10]买买提艾力·买买提依明,何清,高志球,等.塔克拉玛干沙漠近地层湍流热通量计算方法比较研究[J].中国沙漠,2008,28(5):948-954.
- [11]Sun J M, Liu T S. The age of the Taklimakan Desert[J]. Science, 2006, 312(5780):1621-1621.
- [12]赵佳伟,何清,金莉莉,等.塔克拉玛干沙漠腹地秋季陆面过

- 程特征[J].中国沙漠,2019,39(4):159-167.
- [13]齐斐斐.利用遥感数据研究塔克拉玛干沙漠地表能量通量分布变化规律[D].乌鲁木齐:新疆大学,2019:9-10.
- [14]Chen F, Mitchell K, Schaake J, et al. Modeling of land surface evaporation by four schemes and comparison with FIFE observations[J]. Journal of Geophysical Research, 1996, 101(D3):7251-7268.
- [15]Betts A K, Chen F, Mitchell K E, et al. Assessment of the land surface and boundary layer models in two operational versions of the NCEP Eta Model Using FIFE Data[J]. Monthly Weather Review, 1997, 125(11):2896-2916.
- [16]Schaake J C, Koren V I, Duan Q Y, et al. Simple water balance model for estimating runoff at different spatial and temporal scales[J]. Journal of Geophysical Research, 1996, 101(D3):7461-7475.
- [17]Chen F, Janjić Z, Mitchell K. Impact of atmospheric surface-layer parameterizations in the new land-surface scheme of the NCEP Mesoscale Eta Model[J]. Boundary-Layer Meteorology, 1997, 85(3):391-421.
- [18]王名越. SMAP 卫星在中国区域的气温产品研究分析[D].北京:中国科学院国家空间科学中心,2016:18-22.
- [19]刘武,李耀东,史小康. FY-2G 地表温度反演产品改变模式初值对一次台风暴雨模拟的影响[J].气象与环境科学,2017,40(1):26-34.
- [20]惠雯,郭强,吴琼,等. FY-2G 静止气象卫星遥感图像质量评价[J].地球物理学进展,2016,31(5):1902-1910.
- [21]李娅,郭建侠,曹云昌,等. FY-2G 云量产品与地面观测云量对比分析[J].高原气象,2018,37(2):514-523.
- [22]韩露,崔生成,杨世植,等.基于 FY-2G 红外卫星资料反演中国区域地表发射率研究[J].光学学报,2019,39(10):1028001.
- [23]Sauer T J, Horton R. Soil heat flux[M]. Lincoln, U. S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, 2005:131-154.
- [24]张文斌,买买提艾力·买买提依明,何清,等.塔克拉玛干沙漠不同区域土壤热通量比较[J].沙漠与绿洲气象,2016,10(2):57-62.
- [25]杨帆,王顺胜,何清,等.塔克拉玛干沙漠腹地地表辐射与能量平衡[J].中国沙漠,2016,36(5):1408-1418.
- [26]曹寰琦,何清,金莉莉,等.塔克拉玛干沙漠北缘夏秋冬季地表能量平衡闭合特征[J].干旱区研究,2018,35(4):830-839.
- [27]李火青,买买提艾力·买买提依明,刘永强,等.陆面模型 Noah-MP 的不同参数化方案在沙漠区域的适用性研究[J].沙漠与绿洲气象,2018,12(6):58-67.
- [28]金莉莉,李振杰,何清,等. CoLM 模式对塔克拉玛干沙漠北缘陆面过程模拟评估及修正[J].中国沙漠,2018,38(6):1287-1302.