颜晶，文军，王卓元，等，2026. 风云四号气象卫星数据反演黄河源区地表蒸散发研究[J]. 高原气象，45(5)：1304-1314.
Yan Jing, Wen Jun, Wang Zhuoyuan, et al., 2026. Land surface evapotranspiration mapping by using Fengyun-4A meteorological satellite data over the Yellow River Source Region[J]. Plateau Meteorology, 45(5): 1304-1314. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0534.2026.00004. CSTR: 32265.14.gyqx.CN62-1061/P.2026.00004.

风云四号气象卫星数据反演黄河源区地表蒸散发研究

颜 晶[1]，文 军[1]，王卓元[1]，钟学敏[1]，刘紫溪[2]
（1. 成都信息工程大学大气科学学院/复杂地形区域气候变化与资源利用四川省重点实验室，四川 成都 610225；
2. 苏州复晔科技有限公司，江苏 苏州 215011）

摘要：以黄河源区为研究对象，利用陆面能量平衡系统模型结合风云四号静止气象卫星资料和气象数据，估算出2023年4—10月生长季无云或少云晴空日的净辐射通量、土壤热通量、感热通量等，进而由能量平衡方程估算潜热通量，并获取日蒸散发。结果表明：源区能量通量的逐小时变化呈较明显的单峰型，先升后降，在正午前后各通量分量升至高峰，感热、潜热、净辐射分别超200.0，300.0，1000.0 W·m^{-2}。源区能量通量空间分布存在经向区域差异，其中，西、中部的净辐射与感热显然高于东部，而潜热则相反，在东部较高。源区蒸散发量红原站>达日站>清水河站，其空间变化呈西北向东南递增趋势；同时源区蒸散发夏季>春季>秋季，存在显著的季节差异，生长季全域平均日蒸散发约3.0 mm，源区4、5、9月份极大部分地区的日蒸散发在1.0~3.0 mm，6—8月研究区大多数地方日蒸散发都超过4.0 mm，10月源区的日蒸散发均值低于1.0 mm。对比验证表明陆面能量平衡系统模型估算黄河源区蒸散量的结果是合理的。由高时间分辨率风云卫星资料获取可视化的蒸散量空间分布，可得到源区水分消耗的空间分布，为合理利用管理水资源提供参考依据。

关键词：黄河源区；风云四号气象卫星；陆面能量平衡系统模型；遥感反演；蒸散发
文章编号：1000-0534(2026)05-1304-11 **中图分类号**：P426.2 **文献标识码**：A
DOI：10.7522/j.issn.1000-0534.2026.00004
CSTR: 32265.14.gyqx.CN62-1061/P.2026.00004

1 引言

地表蒸散发是指植物蒸腾、水体和土壤蒸发以及植物冠层截留降水的蒸发等，是全球水文循环的关键因子。根据Rosenberg et al.(1983)研究发现约70%的地面降水经过蒸散作用返回到大气，而在水分稀缺的干旱区该数值达90%。地表蒸散发作为水循环与能量平衡的核心环节，探究其时空演变规律对理解水文循环和能量平衡过程，评价其功能，揭示其影响机理，构筑生态安全屏障和推进地方可持续发展意义非凡。

黄河源区作为“亚洲水塔”的重要组分，黄河流域约38%的径流量源于该区域(牛玉国和张学成，2005)，是中国西南极为重要的生态安全屏障(尹云鹤等，2016)。自20世纪80年代以来，受气候变暖影响(刘晓东等，2002)，该区域冻土退化，径流减少、草场退化等生态问题日趋严重(金会军等，2010)。地表蒸散发作为水文循环的核心环节，亟需深入揭示区域蒸散发的演变规律，为生态屏障修复与水资源精细化管理提供科学依据。

遥感是获取地表蒸散发的主要方法(马耀明和

收稿日期：2025-06-30；**定稿日期**：2025-12-22
资助项目：国家自然科学基金项目(42575081)；四川省科技教育联合基金项目(2024NSFSC1979)；成都信息工程大学科研项目(KYTZ201821)
作者简介：颜晶(1999—)，女，湖南衡阳人，硕士研究生，从事陆面过程与气候变化. E-mail：1776443379@qq.com
通信作者：文军(1964—)，男，甘肃临洮人，教授，主要从事陆面过程与气候变化. E-mail：jwen@cuit.edu.cn
© Editorial Department of *Plateau Meteorology* (CC BY-NC-ND)

王介民，1997)。Sequin(1983)通过遥感统计模型来估算植被冠层的蒸散发。Sado and Konta(1994)使用Landsat TM资料获取地表参数，结合互补关系方程探究研究区实际蒸散发年变化。余晓雨等(2022)利用MODIS遥感数据估算了青海省晴天与有云条件下的地表净辐射通量。李红军等(2005)使用Landsat7 ETM+数据和陆面能量平衡算法(Surface Energy Balance Algorithm for Land，SEBAL)模型获取了中国河北省栾城县重要地表特征参数与日蒸散发。何延波和王石立(2006)经过优化陆面能量平衡系统(Surface Energy Balance System，SEBS)模型的地表特征参数化方案，提出了适用于中国黄淮海区域能量通量的计算方法。王丽娟等(2016)通过将MODIS遥感产品输入到SEBS模型，实现了中国西北干旱区能量通量的遥感反演，为实测数据稀缺区域的能量通量研究开拓了新途径。近年来，基于国产卫星的蒸散发估算研究也取得了进展。王显(2023)利用国产静止轨道卫星FY-4A结合线性回归模型，获取了青藏高原地区逐小时的实际蒸散发。区域蒸散发的遥感估算已取得显著进展，然而已有研究表明，高原地区不同气候区间的蒸散发差异巨大，且驱动机制具有显著的区域特异性(陈霆炜等，2025)。黄河源区地貌复杂，地面系统性观测难度大，观测数据稀缺，大范围实地计算与观测蒸散发难度较大。其中，SEBS模型提出了新的参数化方案计算热传输附加阻尼kB^{-1}(Chen et al.，2013)，精度更高，适用于下垫面极其复杂的黄河源区，因此在本文中用于蒸散发的估算。

中国新一代静止气象卫星风云四号A星(Fengyun 4A，FY-4A)相较其他遥感数据源，其核心优势在于极高的时间分辨率，这为持续动态监测地表目标以及高精度反演地表参数创造了必要条件(王淦泉和沈霞，2018；何明元等，2019；岳治国等，2018)；同时覆盖面积广使得研究大范围区域时成像时间的一致性将强。为了能够独立利用FY-4A资料获取黄河源区蒸散发，本文使用FY-4A资料与气象资料，基于SEBS模型估算黄河源区2023年4—10月生长季无云或少云晴空日蒸散发，分析其时空分布规律。

2　研究区域与数据处理

2.1　研究区域

黄河源区分布在青藏高原东缘，范围在95°50′E—103°30′E，32°30′N—36°00′N，总面积达12.2×10^4 km^2(李海荣等，2011)，占黄河流域总面积的16%(郑子彦等，2020)。源区海拔均值超3000 m，地势西高东低，下垫面复杂。源区气候类型为高原亚寒带半湿润半干旱气候，日照时间长，辐射强烈(刘庆广和陈兴鹏，2009)；降水集中在6—9月，年降水量在320.0~750.0 mm，由东南部向西北部递减(陈建军等，2019)，年蒸发量484.0~584.0 mm。黄河源区分布着大量湖泊，其东部有中国面积最大的高寒沼泽湿地，这些湿地在水源涵养、水土保持和调节区域气候等方面发挥着重要作用，是黄河上游关键的水源供给和径流形成区。本研究使用的黄河源区及其附近的气象观测站点空间分布如图1所示。

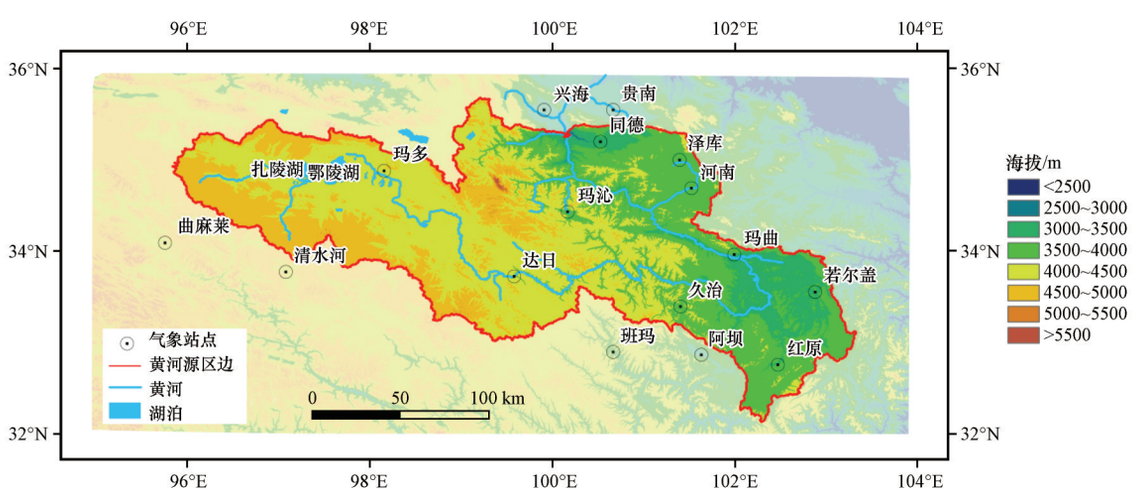


图1　黄河源区及其附近气象观测站分布

Fig. 1　Distribution of meteorological stations in and around the Yellow River Source Region

2.2　研究数据与处理

本研究将利用FY-4A数据反演得到地表特征参数结合气象资料输入SEBS模型获取黄河源区蒸散发。研究选取黄河源区2023年4—10月生长季含

云量不超38%、图像质量较好的遥感数据。为确保数据尺度的一致性，本研究中的所有风云卫星资料均下载自官方服务网（https：//satellite. nsmc. org. cn/PortalSite/），并统一选取了最低分辨率的全圆盘L1产品，以避免因通道分辨率不同导致的误差。L1级资料经过辐射定标、GLT几何校正、坐标投影、格式转换等预处理后，提取2~6、12~14波段反演地表特征参数。气象资料来源于气象信息综合处理系统，选用与FY-4A资料对应时期的地面观测数据，通过克里金插值法将点数据转换成面数据，地面观测站点空间详情如图1。数字高程模型（Digital Elevation Model，DEM）资料从中国科学院地理空间数据云（http：//www. gscloud. cn/）获取，下载SRTMDEM 90M DEM，高程、坡度、坡向由DEM资料计算获取。MOD11_L2产品和全球每小时5 km全天空地表温度（Global Hourly 5 km All-weather Land Surface Temperature，GHA-LST）数据集用于反演地表温度的交叉验证，MOD11_L2产品源自NASA官网（https：//www. nasa. gov/）；GHA-LST数据集是首个以小时为单位、5 km为尺度的全球无间隙LST数据集，具有高精度，可在香港大学GLASS产品（http：//glass. umd. edu/allsky_LST/GHA-LST）获取（Jia et al.，2023）。GLEAM4. 2数据集提供1980—2023年的0. 1°分辨率的每日全球陆地蒸发数据（Miralles et al.，2025），可由相关网站（https：//www. gleam. eu/）获取。若尔盖县花湖湿地站（102°49′09″E，33°55′09″N，以下简称花湖站）设有涡动相关仪，本文将收集到的2023年4月的能量通量观测数据用于验证SEBS模型估算的能量通量。以上所有数据除了花湖站通量观测数据外均按照黄河源区矢量边界掩膜提取，通过重采样、格式转换等处理，生成统一1 km尺度和WGS_84投影的栅格数据。数据详细情况整理如表1。

表1 数据来源及详情

Table 1 Data sources and details

数据	来源	空间分辨率	时间分辨率	主要用途
FY-4A全圆盘L1级数据	风云卫星遥感数据服务网	4 km	15 min	反演地表特征参数
数字高程模型（DEM）	地理空间数据云	90 m	静态	辅助数据
气象观测数据	气象信息综合处理系统	点数据	60 min	估算地表能量通量
MOD11_L2数据产品	NASA官网	1 km	5 min	验证反演的地温
GHA-LST	马里兰大学GLASS产品网站	5 km	60 min	验证反演的地温
能量通量数据	若尔盖湿地花湖站涡动相关仪观测	点数据	30 min	用于能量通量日变化对比
GLEAM4. 2数据集	https：//www. gleam. eu/网站	0. 1°	1 d	验证模型估算的日蒸散发

2.3 研究方法

本文使用由Su（2002）建立的陆面能量平衡系统SEBS模型获取黄河源区的蒸散发，该模型方法基于地表能量平衡，并采用遥感资料反演的地表特征参数结合空气动力学建立的物理模型。模型以能量平衡方程为核心（张晓玉等，2018；金学杰和周剑，2017）：

$$\lambda E = R_n - H - G_0 \tag{1}$$

式中：R_n、G_0、H、λE分别指净辐射通量、土壤热通量、感热通量和潜热通量（单位：W·m^{-2}）；λ=2. 49×10^6 J·kg^{-1}为水的汽化热；E为蒸散量（单位：kg·m^{-2}·s^{-1}）。

净辐射通量R_n是入射和射出的长波辐射与短波辐射之差：

$$R_n = \left(1 - \alpha_0\right) R_{\mathrm{swd}} + \varepsilon R_{\mathrm{lwd}} - \varepsilon\sigma T_0^4 \tag{2}$$

式中：α_0为地表反照率；R_{swd}、R_{lwd}分别为太阳短波辐射量、大气长波辐射（单位：W·m^{-2}）；ε为地表发射率；σ=5. 6697×10^{-8} W·m^{-2}·K^{-4}为斯蒂芬—玻尔兹曼（Stefan-Boltzmann）常数；T_0为地表温度（单位：K）。

土壤热通量G_0表征单位面积土壤在单位时间内的热交换，可利用其和净辐射将两者间的联系来获取：

$$G_0 = R_n\left[\Gamma_{\mathrm{c}} + \left(1 - F_{\mathrm{c}}\right)\left(\Gamma_{\mathrm{s}} - \Gamma_{\mathrm{c}}\right)\right] \tag{3}$$

式中：Γ_{c}是土壤热通量与净辐射的比率，在植物生长区，取值0. 05；在裸土区域，取值0. 315；F_{c}为植被覆盖率。

在大气近地层中，依据大气边界层相似性理论：

$$\mu = \frac{\mu_*}{k}\left\{\ln\left[\frac{z - d_0}{z_{0\mathrm{m}}} - \psi_m\left(\frac{z - d_0}{L}\right) + \psi_m\left(\frac{z_{0\mathrm{m}}}{L}\right)\right]\right\} \tag{4}$$

$$L = -\frac{\rho C_p \mu_*^3 \theta_v}{kgH} \tag{5}$$

$$H = k\mu_* \cdot \rho C_p(\theta_0 - \theta_a)\left[\ln\left(\frac{z-d_0}{z_{0h}}\right) - \psi_h\left(\frac{z-d_0}{L}\right) + \psi_h\left(\frac{z_{0h}}{L}\right)\right]^{-1} \quad (6)$$

式中：μ为平均风速（单位：m·s^{-1}）；z_{0m}为动量交换粗糙度长度（单位：m）；k=0.4为Karman常数；μ_*为摩擦风速（单位：m·s^{-1}）；ρ为空气密度（单位：kg·m^{-3}）；C_p=1005 J·kg^{-1}·K^{-1}，为空气的热容；g=9.81 m·s^{-2}，为重力加速度；θ_v、θ_0、θ_a分别是近地面位温、地面势温、z处的大气势温（单位：K）；z为参考高度（单位：m）；z_{0h}为热量传输粗糙长度（单位：m）；L为莫宁霍夫长度（单位：m）；ψ_m和ψ_h依次为动量交换、热量交换MOS稳定度订正函数。通过迭代式（4）~（6）可获取μ_*、H、L。

基于地表能量平衡方程，在干燥地表条件下，潜热通量趋近于0，此时可用能量几乎全部转化为感热通量，形成局地最大感热输送条件：

$$H_d = R_n - G_0 \quad (7)$$

在水分饱和状态下，感热通量约为0 W·m^{-2}，此时蒸散发速率最大，则：

$$H_w = R_n - G_0 - \lambda E_w \quad (8)$$

$$L_w = \frac{\rho\mu_*^3}{kg[0.61(R_n - G_0)/\lambda]} \quad (9)$$

$$r_{ew} = \frac{1}{k\mu_*}\left[\ln\left(\frac{z-d_0}{z_{0h}}\right) - \psi_h\left(\frac{z-d_0}{L_w}\right) + \psi_h\left(\frac{z_{0h}}{L_w}\right)\right] \quad (10)$$

通过公式（7）~（10）可得蒸散比Λ：

$$\Lambda_r = 1 - \frac{H - H_w}{H_d - H_w} \quad (11)$$

$$\Lambda = \frac{\lambda E}{R_n - G_0} = \frac{\Lambda_r \lambda E_w}{R_n - G_0} \quad (12)$$

式中：Λ_r为相对蒸散比；H_d、H_w依次为异常干旱环境下和异常湿润环境下的感热通量；λE_w、L_w、r_{ew}依次为湿润环境下的潜热通量、奥布霍夫长度、外部阻抗。

获得蒸发比后，可通过下式估算日蒸散发：

$$E_{daily} = 8.64 \times 10^7 \times \Lambda_{ins} \times \frac{R_{nday}}{\lambda\rho} \quad (13)$$

式中：E_{daily}为日蒸散量；Λ_{ins}为瞬时蒸发比，Λ_{ins}=Λ；R_{nday}为日净辐射通量。

3　黄河源区地表特征参数及能量通量的时空特征

3.1　蒸散发关键地表特征参数的时空格局

归一化植被指数（Normalized Difference Vegetation Index，NDVI）是植物空间格局及其长势的重要指标（Bianchi et al.，2020）。黄河源区2023年生长季的NDVI空间分布［图2（a）］呈现明显的东南−西北向梯度：东南部低海拔地区（如红原、若尔盖、玛曲）由于相对优越的水热条件，NDVI值较高（峰值达0.45）；而西北部高海拔区域（如玛多、曲麻莱）受制于寒冷干旱的气候，NDVI值偏低，导致区域平均NDVI仅为0.25，整体处于中低水平。这体现了源区下垫面不均匀性与水热资源空间分异性。

地表比辐射率是遥感反演地表温度的关键输入参数。2023年4—10月黄河源区的地表比辐射率空间分布［图2（b）］表明，源区该值域为0.965~0.995，其空间分布受下垫面类型影响：裸土区域由于植被稀疏、土壤干燥，表现为稳定的低值区；低海拔植被生长区作为典型植被−土壤混合像元，比辐射率多处于中等水平；而在高海拔冰雪区及水体表面，由于冰、水在热红外波段具有接近黑体的发射特性，比辐射率普遍较高。

地表反照率是地面接收太阳辐射能的决定因子，影响感热、潜热和红外辐射（张琼和钱永甫，1999）。由图2（c）知，黄河源区的地表反照率整体较低，均值为0.15，这与该地区属高原亚寒带半湿润地带有关。空间上，积雪覆盖的高海拔地区反射能力最强，反照率最高；中东部植被生长区因冠层对辐射的吸收作用，反照率普遍较低；而湖泊等水体区域由于对太阳辐射的强烈吸收，反照率最低。

地表温度（Land Surface Temperature，LST）的反演精度是制约区域蒸散发遥感估算可靠性的关键。本研究利用劈裂窗算法得到黄河源区地表温度空间分布［图2（d）］。结果表明，该区域地表温度总体偏低，变化范围为257.84~291.48 K（−15.31~18.3 ℃），均值为273.94 K（0.79 ℃），这与研究区整体海拔较高的特征相符。空间上，东南部及中部温度相对较高，最高达291.45 K（18.3 ℃）；而西北部受高海拔和冰雪覆盖影响，温度多在273.15 K（0 ℃）以下。此外，扎陵湖、鄂陵湖区域呈现明显的低温特征，而北部柴达木盆地则因海拔相对较低且下垫面为沙漠，形成了局部高温区。

3.2　近地表能量通量的日变化与空间分异

3.2.1　能量通量的空间分布格局

本研究对黄河源区2023年4月15日典型晴空条件下的地表能量通量进行了分析，揭示了能量各分量在空间分布上的内在联系与分异规律。

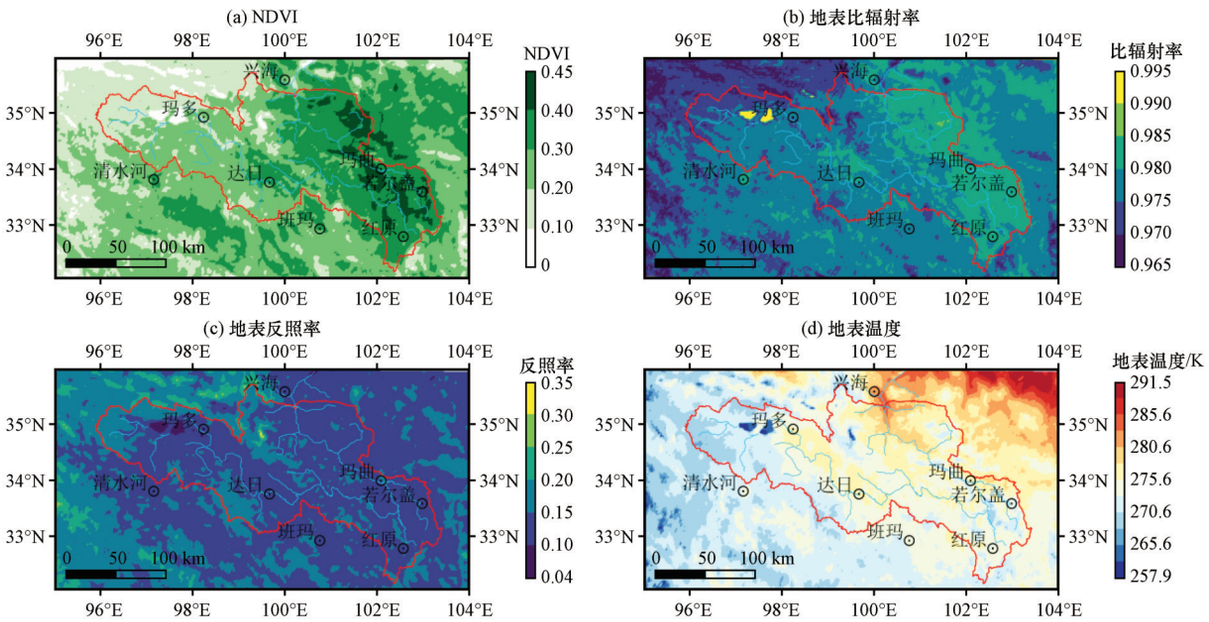


图2 黄河源区2023年4—10月生长季NDVI(a)、地表比辐射率(b)、反照率(c)、地表温度(d，单位：K)空间分布

Fig. 2 Spatial distributions of growing season NDVI(a), land surface emissivity(b), albedo(c), and land surface temperature (d, unit: K) in the Yellow River Source Region from April to October 2023

净辐射通量(Net radiation，R_n)在白天(08:00—19:00，北京时，下同)均为正值，变化范围为207.52~736.51 W·m^{-2}，表明地表在此期间持续吸收能量。空间上，R_n呈现出西北高、东南低的特征[图3(a)~(d)]。西北部高海拔区域在4月仍存有积雪，较高的地表反照率增强了太阳短波辐射的反射，使得该地区R_n相对较低；而扎陵湖、鄂陵湖等水体区域由于反照率较低，对辐射的吸收更强，因而成为区域内R_n的高值中心。

感热通量(Sensible Heat Flux，H)的变化范围为−178.9~390.3 W·m^{-2}，其空间分布与R_n较为相似，为西高东低的经向差异[图3(e)~(h)]。H与NDVI之间存在明显的负相关关系，高值区主要出现在植被稀疏的高海拔裸地和积雪区，反映出在干旱低温条件下，可用能量更多用于加热大气；而在植被覆盖较好的东部地区，H值普遍较低。此外，

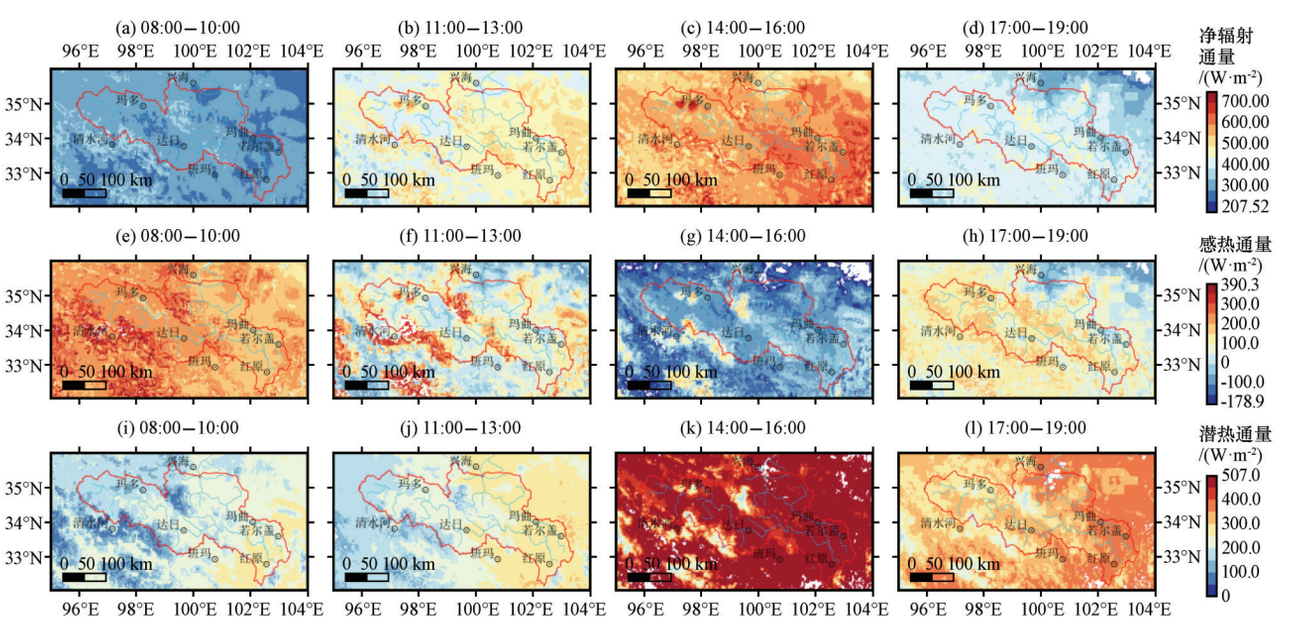


图3 黄河源区2023年4月15日08:00—19:00逐3 h的净辐射通量(a~d)、感热通量(e~h)、潜热通量(i~l)分布(单位：W·m^{-2})

Fig. 3 Distribution of net radiation (a~d), sensible heat (e~h), and latent heat (i~l) at three-hour intervals from 08:00 to 19:00 on 15 April 2023 in the Source Region of the Yellow River. Unit: W·m^{-2}

部分区域在清晨时段出现H负值，表明此时地表温度低于气温，存在大气向地表的感热输送。

与H相反，潜热通量(Latent Heat Flux，LE)表现出东南高西北低[图3(i)~(l)]。东南部植被覆盖较好，下垫面湿润，LE值普遍较大；湖泊表面由于水分供应充足，LE也维持在较高水平。而西北部高寒地区受植被稀疏和土壤水分匮乏影响，LE接近于零，几乎无蒸散作用发生。

总之，黄河源区地表能量分配呈现显著的空间差异性：西北部以感热输送为主，能量主要用于大气加热；东南部则以潜热为主，能量主要参与蒸散过程。

3.2.2　能量通量的日变化特征

从日变化曲线来看(图4)，各能量通量分量均为典型的单峰型日变化特征。R_n于日出后迅速上升，在13:00前后达到峰值(>1000.0 W·m^{-2})，随后逐渐下降。H与LE的变化趋势与R_n基本一致，但存在明显的相位差异：H在正午前上升，峰值(>200.0 W·m^{-2})略早于R_n；而LE的上升相对平缓，峰值(>300.0 W·m^{-2})出现时间稍晚。这种差异是由于感热输送对地表增温更为敏感，潜热通量主要取决于植被活动和土壤水分的状况。

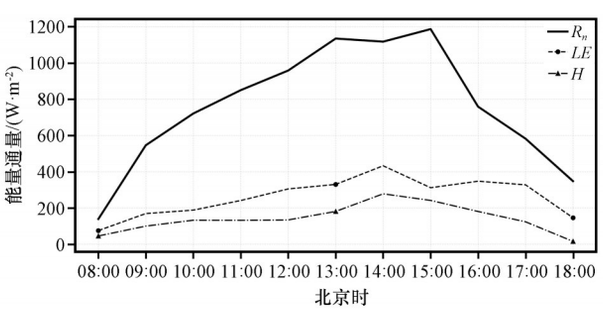


图4　净辐射通量、感热通量、潜热通量的日变化特征

Fig. 4　Diurnal variations of net radiation, sensible heat, and latent heat

4　黄河源区地表蒸散发的时空演变规律

4.1　蒸散发的空间分布特征

黄河源区蒸散发空间格局为显著的东南高、西北低特征(图5，图6)，这主要受高原水热条件和下垫面性质的影响。东南及中部植被覆盖较好，温度较高，充足的水热条件，因此地表蒸散发较高。西北部海拔较高，气温偏低，植被稀疏且水分供应不足，导致该区域蒸散发明显较低。此外，扎陵湖、鄂陵湖等水体分布区由于水源充足，形成蒸散发局部高值区。总体来看，黄河源区蒸散发空间差异主要受能量和水分条件影响，其分布格局反映了高寒地区陆气间水热交换的空间分异特征。

4.2　蒸散发的季节变化特征

图6是源区春、夏、秋季及整个生长季的蒸散发空间布局。从图6中可知，源区日蒸散发夏季>春季>秋季，春、夏、秋季源区蒸散发日均值分别是2.76 mm、4.32 mm、1.65 mm，源区生长季的蒸散发日均约3.0 mm。结合图5来看，蒸散发随季节呈现单峰型趋势。春季(4–5月)气温回升，冰雪逐渐消融，地表水分条件改善，植被复苏，蒸散发随之增强，多数地区日蒸散发量在1.0~3.0 mm；夏季(6—8月)植被进入生长旺季，气温持续升高，太阳辐射增强，蒸散发显著上升，多数地区日值超过4.0 mm，其中8月达到全年峰值，部分区域日均值超过5.0 mm，显然高温和强辐射对蒸散发有重要影响。秋季(9—10月)气温逐渐下降，降水减少，植被凋零，蒸散发减弱，9月大部分地区日蒸散发回落至2.0~3.0 mm；10月源区的蒸散发均值低于1.0 mm，这可能是积雪覆盖区或裸地地表反照率较高，大部分太阳辐射被冰雪、裸地下垫面所反射，地面接收到用于蒸发的能量较低。

4.3　典型站点蒸散发的时空差异

为深入分析黄河源区蒸散发的时空分异特征，本研究选取了位于区域东、中和西部的红原站、达日站与清水河站3个典型站点进行对比(图7)。观测期内，各站点蒸散发均呈现先升后降的季节变化趋势，但其变化幅度与强度存在明显差异。从空间上看，蒸散发量整体表现为红原站>达日站>清水河站，呈现出由东南向西北递减的格局。时间上，各站点蒸散发均表现为单峰型变化，于8月前后达到峰值，红原站蒸散发季节波动最为显著，峰值超过5.0 mm；达日站变化较为平缓，峰值约4.0 mm；清水河站受能量与水分影响，蒸散发始终维持在较低水平，峰值不足3.0 mm。

5　估算结果验证和误差分析

本研究对FY-4A数据结合SEBS模型的反演结果进行了验证。选取2023年7月21日11:00的MOD11_L2和GHA-LST数据对LST进行交叉验证，异常值剔除后，随机选取10000个样本点进行对比。从图8(a)和图8(b)显示，验证结果较好，相关系数分别达到0.77和0.80，均方根误差分别为2.19 K和1.53 K，平均绝对误差分别为1.70 K和1.19 K。

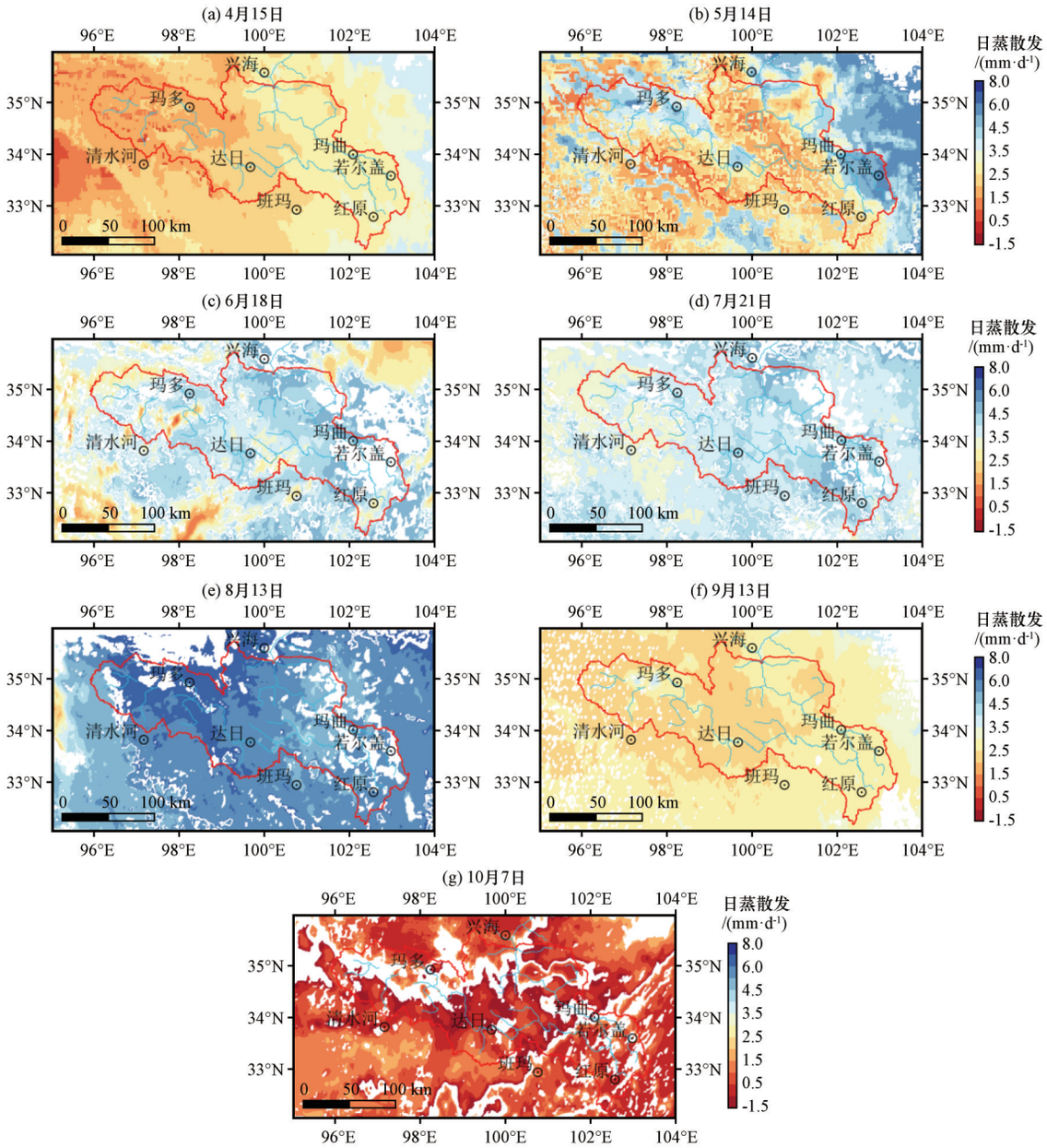


图5 黄河源区2023年4−10月逐月的日蒸散发空间分布(单位：mm·d^{-1})

Fig. 5 Spatial distribution of monthly daily evapotranspiration from April to October 2023 in the Source Region of the Yellow River. Unit: mm·d^{-1}

能量通量的验证以2023年4月15日花湖站观测数据为准。模型估算的通量日变化趋势与实测结果基本一致[图8(d)~(f)]，上午随太阳高度角增大而上升，13:00—15:00达到峰值，随后逐渐下降。从统计指标看，感热、潜热和净辐射的R^2分别为0.93、0.66和0.83，平均绝对误差分别为18.2、50.23和136.23 W·m^{-2}，其中潜热通量被高估，而净辐射普遍低估。

蒸散发的验证结果表明[图8(c)]，2023年4月15日的估算值与GLEAM4.2数据集对比的*RMSE*为0.52 mm，*MAE*为0.41 mm，相关系数为0.66。从整个生长季来看(表2)，模型表现稳定，其中4月15日的误差最大，9月13日误差最小，生长季平均*RMSE*和*MAE*分别为0.44 mm和0.47 mm。

以上验证表明，基于FY-4A数据和SEBS模型的黄河源区地表温度、能量通量与蒸散发估算结果具有较好的可靠性，可用于后续的陆气交互过程研究。

误差产生的主要原因：(1)反演地表特征参数精度不准确性。FY-4A资料本身的信噪比较低，时间分辨率虽然较高，而空间分辨率却不足，而黄河源区海拔在2500.0~5500.0 m之间的高程落差大，

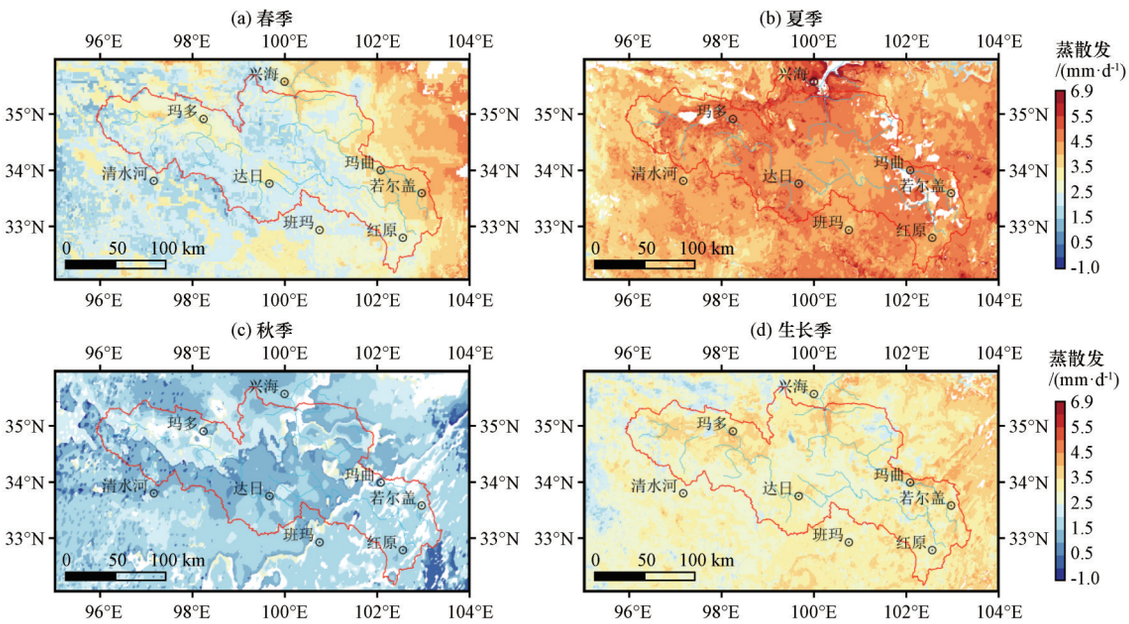


图 6　黄河源区春(a)、夏(b)、秋(c)三季以及整个生长季期间(d)的蒸散发空间分布(单位：mm·d^{-1})

Fig. 6　Spatial distributions of evapotranspiration in the Yellow River Source Region for spring (a), summer (b), autumn (c), and the entire growing season (d). Unit: mm·d^{-1}

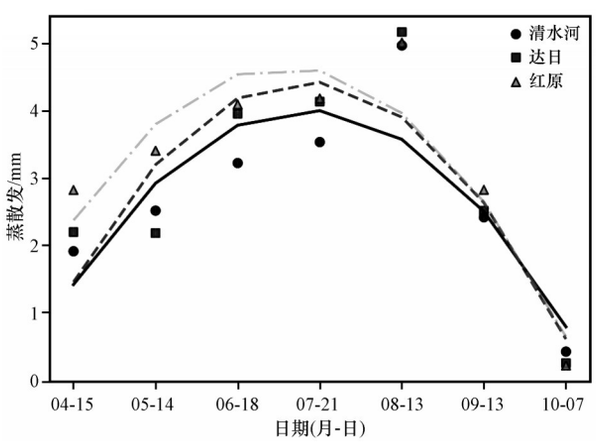


图 7　典型地面观测站点日蒸散发的季节变化特征

Fig. 7　Seasonal variations of daily evapotranspiration at the typical ground observation sites

地貌复杂，空间异质性强烈，对FY-4A资料精确反演地表特征参数影响较大，从而导致SEBS估算黄河源区蒸散发的不准确性。(2)气象数据插值误差。黄河源区有限站点难以捕捉黄河源区强空间异质性，气象数据插值过程中未耦合地形因子，风速、气温等关键气象要素分布失真，可能影响了估算蒸散发的精度。(3)时空尺度失配导致误差。FY-4A小时数据与气象插值栅格数据分辨率不统一，重采样升降尺度到 1 km空间分辨率会导致结果的不准确性。(4)缺乏涡动相关仪等高精度蒸散发实测数据，现有验证点稀疏且空间代表性不足。

6　结论

本文使用FY-4A资料估算重要的地表特征参数，结合DEM资料、地面观测数据，输入SEBS模型，从而估算黄河源区生长季的蒸散发，得出如下主要结论：

（1）FY-4A数据在黄河源区表现出较好的适用性。地表温度反演结果与MOD11_L2和GHA-LST数据的对比表明该数据能够较好地反映该区域的地表特征。

（2）能量通量的日变化呈现明显的单峰型特征。花湖站的观测显示，能量通量从08:00开始上升，在正午前后达到峰值，随后逐渐下降，至18:00感热通量已降至20.0 W·m^{-2}以下，体现了高寒地区能量分配与太阳辐射变化的密切关系。

（3）蒸散发具有显著的时空分异特征。生长季全区平均日蒸散发量约为3.0 mm，空间上呈现从东南向西北递减的趋势，红原、达日、清水河3站的蒸散发量依次减小，反映了水热条件空间分布的影响。时间上，蒸散发量夏季最大，春季次之，秋季最小。

采用遥感技术估算黄河源区蒸散发是研究热点，FY-4A数据的时空连续性可为模型估算蒸散发所需的地表特征参数提供支持，但依旧面临问题：黄河源区下垫面极其复杂，利用有限的观测资料估算的结果推广到区域面上是否涉及站点代表性问

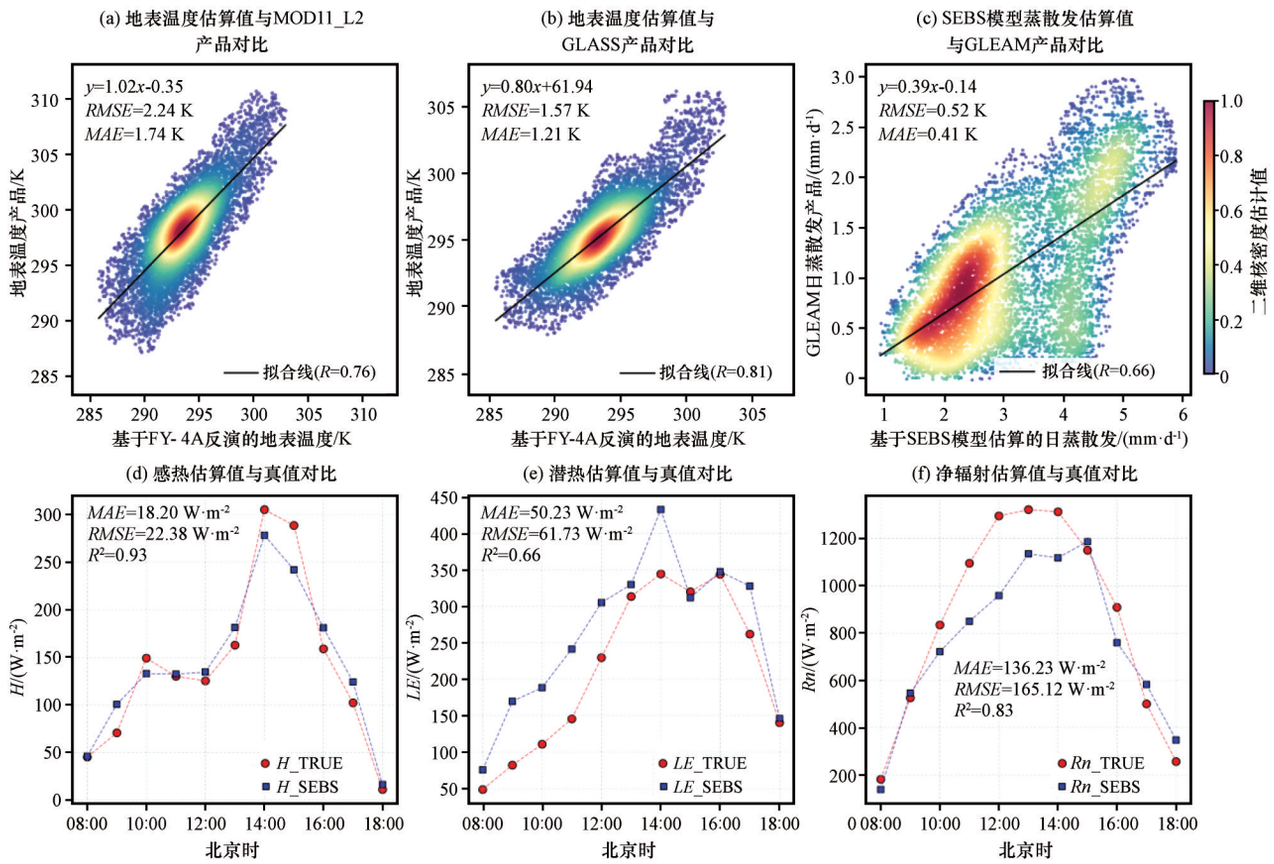


图8 地温、日蒸散发、各能量通量估算值与真值的对比验证

Fig. 8 Validation of estimated land surface temperature, daily evapotranspiration, and energy fluxes against true values

表2 2023年4—10月选取日的日蒸散发验证精度指标值

Table 2 Accuracy evaluation metrics for daily evapotranspiration on selected days from April to October 2023

时间(年积日)	*RMSE*	*MAE*
DOY105	0.69	0.82
DOY134	0.52	0.67
DOY169	0.48	0.54
DOY202	0.47	0.40
DOY225	0.51	0.43
DOY256	0.23	0.22
DOY280	0.25	0.22

题；对于模型估算结果只能通过稀少的观测资料进行点对点的验证，显然模型结果的验证存在尺度问题，因此，如何克服稀疏观测资料带来的困难有待于进一步讨论。

参考文献(References)：

Bianchi E, Villalba R, Solarte A, 2020. NDVI spatio-temporal patterns and climatic controls over northern Patagonia[J]. Ecosystems, 23(1): 84−97. DOI: 10.1007/s10021−019−00389−3.

Chen Xuelong, Su Zhongbo, Ma Yaoming, et al., 2013. An improvement of roughness height parameterization of the surface energy balance system (SEBS) over the Tibetan Plateau[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 52(3): 607−622. DOI: 10.1175/jamc−d−12−056.1.

Jia Aolin, Liang Shunlin, Wang Dongdong, et al., 2023. Global hourly, 5 km, all-sky land surface temperature data from 2011 to 2021 based on integrating geostationary and polar-orbiting satellite data[J]. Earth System Science Data, 15(2): 869−895. DOI: 10.5194/essd−15−869−2023.

Miralles D G, Bonte O, Koppa A, et al., 2025. GLEAM4: global land evaporation and soil moisture dataset at 0.1° resolution from 1980 to near present[J]. Scientific Data, 12: 416. DOI: 10.1038/s41597−025−04610−y.

Rosenberg N J, Blad B L, Verma S B, 1983. Microclimate: the biological environment. 2nd ed.[J]. Wiley, DOI: 10.2307/2258713.

Sado K, Konta S, 1994. Estimation of annual change of actual catchment evapotranspiration using landsat TM data and complementary relationship equation[J]. Proceedings of Hydraulic Engineering, 38: 149−154. DOI: 10.2208/prohe.38.149.

Sequin C H, 1983. Managing VLSI complexity: an outlook[J]. Proceedings of the IEEE, 71(1): 149−166. DOI: 10.1109/PROC.1983.12536.

Su Zhongbo, 2002. The Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 6(1): 85−100. DOI: 10.5194/hess−6−85−2002.

陈建军，黄莹，赵许宁，等，2019. 黄河源区高寒草地植被覆盖度反演模型精度评价[J]. 科学技术与工程，19(15)：37−45. Chen Jianjun，Huang Ying，Zhao Xuning，et al.，2019. Accuracy evaluation of vegetation coverage inversion model for alpine grassland in the source region of the Yellow River[J]. Science Technology and Engineering，19(15)：37−45. DOI：10. 3969/j. issn. 1671−1815. 2019. 15. 007.

陈霆炜，马耀明，谢志鹏，等，2025. 青藏高原不同区域蒸散发变化特征及影响因子分析[J]. 高原气象，44(6)：1488−1507. Chen Tingwei，Ma Yaoming，Xie Zhipeng，et al.，2025. Analysis of evapotranspiration variation characteristics and influencing factors in different regions of the Tibetan Plateau[J]. Plateau Meteorology，44(6)：1488−1507. DOI：10. 7522/j. issn. 1000−0534. 2025. 00048.

何明元，王毅，俞宏，2019. 地表信息对静止卫星云检测算法的影响[J]. 遥感信息，34(1)：15−19. He Mingyuan，Wang Yi，Yu Hong，2019. An integrated optimal method of cloud detection with surface background information[J]. Remote Sensing Information，34(1)：15−19. DOI：10. 3969/j. issn. 1000−3177. 2019. 01. 003.

何延波，王石立，2006. SEBS模型在黄淮海地区地表能量通量估算中的应用[J]. 高原气象，25(6)：1092−1100. He Yanbo，Wang Shili，2006. Estimation of surface energy flux using surface energy balance system(SEBS)in the yellow Huaihe-Haihe River regions，China[J]. Plateau Meteorology，25(6)：1092−1100.

金会军，王绍令，吕兰芝，等，2010. 黄河源区冻土特征及退化趋势[J]. 冰川冻土，32(1)：10−17. Jin Huijun，Wang Shaoling，Lü Lanzhi，et al.，2010. Features and degradation of frozen ground in the sources area of the Yellow River，China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology，32(1)：10−17.

金学杰，周剑，2017. 基于SEBS模型和Landsat 8数据的黑河下游蒸散发时空特性分析[J]. 冰川冻土，39(3)：572−582. Jin Xuejie，Zhou Jian，2017. Analysis of spatial-temporal characteristics of evapotranspiration in the lower reaches of Heihe River based on surface energy balance system model and Landsat 8 data[J]. Journal of Glaciology and Geocryology，39(3)：572−582. DOI：10. 7522/j. issn. 1000−0240. 2017. 0064.

李海荣，曹廷立，唐梅英，等，2011. 黄河源区水源涵养保护与治理开发研究[M]. 郑州：黄河水利出版社：15−18. Li Hairong，Cao Tingli，Tang Meiying，et al.，2011. Study on water conservation，protection，management and development in the source area of the Yellow River[M]. Zhengzhou：Yellow River Water Resources Press：15−18.

李红军，雷玉平，郑力，等，2005. SEBAL模型及其在区域蒸散研究中的应用[J]. 遥感技术与应用，20(3)：321−325. Li Hongjun，Lei Yuping，Zheng Li，et al.，2005. SEBAL model and its application in the study of regional evapotranspiration[J]. Remote Sensing Technology and Application，20(3)：321−325. DOI：10. 3969/j. issn. 1004−0323. 2005. 03. 003.

刘庆广，陈兴鹏，2009. 基于RS/GIS的黄河源区土地覆被变化机理与对策研究[J]. 生态经济，25(12)：54−59. Liu Qingguang，Chen Xingpeng，2009. Land-cover changes' mechanism and some proposals in the source regions of the Yellow River from remote sensing date and GIS technique[J]. Ecological Economy，25(12)：54−59.

刘晓东，安芷生，方建刚，等，2002. 全球气候变暖条件下黄河流域降水的可能变化[J]. 地理科学，22(5)：513−519. Liu Xiaodong，An Zhisheng，Fang Jiangang，et al.，2002. Possible variations of precipitation over the Yellow River valley under the global-warming conditions[J]. Scientia Geographica Sinica，22(5)：513−519. DOI：10. 13249/j. cnki. sgs. 2002. 05. 001.

马耀明，王介民，1997. 非均匀陆面上区域蒸发(散)研究概况[J]. 高原气象，16(4)：446−452. Ma Yaoming，Wang Jiemin，1997. A survey in the study of area evaporation(evapotranspiration)over the heterogeneous landscape[J]. Plateau Meteorology，16(4)：446−452.

牛玉国，张学成，2005. 黄河源区水文水资源情势变化及其成因初析[J]. 人民黄河，27(3)：31−33，36. Niu Yuguo，Zhang Xuecheng，2005. Preliminary analysis on variations of hydrologic and water resources regime and its genesis of the Yellow River source region[J]. Yellow River，27(3)：31−33，36. DOI：10. 3969/j. issn. 1000−1379. 2005. 03. 012.

王淦泉，沈霞，2018. 风云四号辐射成像仪及其数据在卫星气象中的应用[J]. 自然杂志，40(1)：1−11. Wang Ganquan，Shen Xia，2018. The FY-4 radiometer imager and the application of its data in the satellite meteorology[J]. Chinese Journal of Nature，40(1)：1−11. DOI：10. 3969/j. issn. 0253−9608. 2018. 01. 001.

王丽娟，郭铌，杨启东，等，2016. 基于MODIS遥感产品估算西北半干旱区的陆面蒸散量[J]. 高原气象，35(2)：375−384. Wang Lijuan，Guo Ni，Yang Qidong，et al.，2016. Land surface evapotranspiration estimated based on MODIS remote sensing products over the semi−arid northwest China[J]. Plateau Meteorology，35(2)：375−384. . DOI：10. 7522/j. issn. 1000−0534. 2014. 00158.

王显，2023. 基于机器学习算法的青藏高原地表特征参数和蒸散发估算研究[D]. 合肥：中国科学技术大学 . Wang Xian，2023. Estimation of Land Surface Parameters and Actual Evapotranspiration over the Tibetan Plateau Based on Machine Learning Methods[D]. Hefei：University of Science and Technology of China.

尹云鹤，吴绍洪，赵东升，等，2016. 过去30年气候变化对黄河源区水源涵养量的影响[J]. 地理研究，35(1)：49−57. Yin Yunhe，Wu Shaohong，Zhao Dongsheng，et al.，2016. Ecosystem water conservation changes in response to climate change in the Source Region of the Yellow River from 1981 to 2010[J]. Geographical Research，35(1)：49−57. DOI：10. 11821/dlyj201601005.

余晓雨，贾绍凤，朱文彬，2022. 青海省地表净辐射通量的遥感估算方法及时空特征分析[J]. 高原气象，41(4)：921−933. Yu Xiaoyu，Jia Shaofeng，Zhu Wenbin，2022. Estimation of land surface net radiation flux based on remote sensing and analysis of its spatial−temporal characteristics in Qinghai Province[J]. Plateau Meteorology，41(4)：921−933. DOI：10. 7522/j. issn. 1000−0534. 2021. 00033.

岳治国，刘贵华，田显，等，2018. FY4-A卫星云物理反演工具开发及应用[C]//第35届中国气象学会年会 S21 卫星气象与生态遥感：235−237. Yue Zhiguo，Liu Guihua，Tian Xian，et al.，2018.

Development and application of cloud physical inversion tool for FY-4A satellite [C]// Proceedings of the 35th CMS Annual Meeting-S21 Satellite Meteorology and Ecological Remote Sensing: 235-237.

张琼, 钱永甫, 1999. 用NCEP/NCAR再分析辐射资料估算月平均地表反照率[J]. 地理学报, 54(4): 309-317. Zhang Qiong, Qian Yongfu, 1999. Monthly mean surface albedo estimated from NCEP/NCAR reanalysis radiation data[J]. Acta Geographica Sinica, 54(4): 309-317.

张晓玉, 范亚云, 热孜宛古丽·麦麦提依明, 等, 2018. 基于SEBS模型的干旱区流域蒸散发估算探究[J]. 干旱区地理, 41(3): 508-517. Zhang Xiaoyu, Fan Yayun, Reziwanguli·Maimaitiyiming, et al., 2018. Evapotranspiration estimation of watershed in arid area based on SEBS model[J]. Arid Land Geography, 41(3): 508-517. DOI: 10.13826/j.cnki.cn65-1103/x.2018.03.009.

郑子彦, 吕美霞, 马柱国, 2020. 黄河源区气候水文和植被覆盖变化及面临问题的对策建议[J]. 中国科学院院刊, 35(1): 61-72. Zheng Ziyan, Lü Meixia, Ma Zhuguo, 2020. Climate, hydrology, and vegetation coverage changes in source region of Yellow River and countermeasures for challenges[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 35(1): 61-72. DOI: 10.16418/j.issn.1000-3045.20191230002.

Land surface evapotranspiration mapping by using Fengyun-4A meteorological satellite data over the Yellow River Source Region

Yan Jing[1], Wen Jun[1], Wang Zhuoyuan[1], Zhong Xuemin[1], Liu Zixi[2]

(1. *Climate Change and Resource Utilization in Complex Terrain Regions Key Laboratory of Sichuan Province, College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu* 610225, *Sichuan, China*; 2. *Suzhou Fuye Technology Co., Ltd., Suzhou* 215011, *Jiangsu, China*)

Abstract: Focusing on the Yellow River Source Region, this study employed the Land Surface Energy Balance System (SEBS) model combined with FY-4A geostationary meteorological satellite data and meteorological observations to estimate daily clear-sky net radiation flux, soil heat flux, sensible heat flux, and latent heat flux (derived via the energy balance equation) during the growing season (April-October 2023). Daily evapotranspiration (ET) was subsequently calculated. The results indicate that hourly variations in energy fluxes exhibit a distinct unimodal pattern, peaking around noon before declining. At midday, sensible heat flux, latent heat flux, and net radiation exceeded 200.0 W·m^{-2}, 300.0 W·m^{-2}, and 1000.0 W·m^{-2}, respectively. Spatially, the energy fluxes display longitudinal zonation: net radiation and sensible heat flux were significantly higher in the western and central regions than in the east, whereas latent heat flux showed the opposite trend, with higher values in the eastern part. For ET, the magnitude followed Hongyuan > Dari > Qingshuihe Station, with a clear northwest-to-southeast increasing gradient. Seasonal variations were pronounced, with summer ET > spring > autumn. The regional average daily ET during the growing season was approximately 3.0 mm. Spatially, daily ET in April, May, and September mostly ranged between 1.0~3.0 mm, while June-August saw widespread values exceeding 4.0 mm. By October, mean daily ET dropped below 1.0 mm. Validation confirmed the reliability of SEBS-derived ET estimates for the Yellow River Source Region. The high-temporal-resolution FY-4A satellite data enabled spatially explicit ET mapping, revealing regional water consumption patterns and providing valuable insights for sustainable water resource management.

Key words: Yellow River Source Region; FY-4 meteorological satellite; surface energy balance system (SEBS) model; remote sensing retrieval; evapotranspiration