

姚新旺, 梁婷, 牛建宏, 等. 基于高分辨率遥感模型的叶尔羌绿洲及其下游河岸蒸散发研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2026, 57(2): 173-185. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.02.013

YAO Xinwang, LIANG Ting, NIU Jianhong, et al. Study on evapotranspiration in the Yarkand Oasis and its downstream riparian areas based on a high-resolution remote sensing model[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2026, 57(2): 173-185. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.02.013

基于高分辨率遥感模型的叶尔羌绿洲及其下游河岸蒸散发研究

姚新旺¹, 梁婷², 牛建宏¹, 周会军¹, 木塔里甫·托和提¹, 雷生鑫³, 杨汉波²

(1. 新疆维吾尔自治区塔里木河流域叶尔羌水利管理中心, 新疆 莎车 844700; 2. 清华大学 水利水电工程系, 北京 100084; 3. 青海黄河上游水电开发有限责任公司, 青海 西宁 810008)

摘要: 【目的】叶尔羌绿洲是我国西北重要的绿洲, 面临着水资源短缺和生态系统脆弱的挑战。开展高空间分辨率的遥感蒸散发估算, 认识叶尔羌绿洲及其下游河岸的耗水规律, 有利于实现合理的水资源配置与区域的可持续发展。【方法】通过融合多源 Landsat 数据, 构建了 30 m 分辨率遥感蒸散发模型, 实现了 2000—2020 年研究区域的蒸散发精细化估算。【结果】模型估算的绿洲总蒸散发量与水量平衡法的结果基本一致(相对偏差约为 10%)。高值区主要集中在绿洲耕地和河道两侧, 峰值日均蒸散发量约为 6.1 mm/d; 低值区分布在绿洲边缘和远离河道的区域, 日均蒸散发量不足 0.4 mm/d。下游河岸蒸散发量从河道向两侧递减, 两侧 2 km 范围内蒸散发量相对较高, 部分区域超过 1 mm/d。2002 年以来, 下游河道耗水总量呈波动增加趋势, 多年平均耗水总量为 4.66 亿 m³, 2013 年达到峰值(约 8.8 亿 m³); 月平均蒸散发量呈明显季节变化, 7 月达到峰值(约 1.0 mm/d)。【结论】结果表明, 绿洲及其下游河岸植被稀疏地区蒸散发量呈现明显的空间异质性, 高分辨率模型能准确捕捉稀疏植被区蒸散发量在空间上的细微变化, 揭示叶尔羌绿洲及下游河岸区域蒸散发量的显著空间和时序变化规律, 为该地区的水资源管理和生态修复提供了重要的参考依据。

关键词: 叶尔羌绿洲; 稀疏植被; Landsat; 遥感; 降水; 水资源; 时空分布; 蒸散发

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.02.013

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: P333

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2026)02-0173-13



与作者互动
听语音聊科研

Study on evapotranspiration in the Yarkand Oasis and its downstream riparian areas based on a high-resolution remote sensing model

YAO Xinwang¹, LIANG Ting², NIU Jianhong¹, ZHOU Huijun¹, MUTALIFU Tohoti¹, LEI Shengxin³, YANG Hanbo²

(1. Yarkand River Water Resources Management Center of Tarim River Basin, Shache 844700, Xinjiang, China;

收稿日期: 2025-02-08; 修回日期: 2025-04-15; 录用日期: 2025-04-17; 网络出版日期: 2025-05-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(51979140); 塔里木河流域管理局 2024 年新立项科研项目(TGJKSJJG-2024ZXFW0036); 青海黄河上游水电开发有限责任公司项目“黄河羊曲水电站工程对局地气候影响及生物多样性演变趋势研究”(2004-014-HHS-SD-X)

作者简介: 姚新旺(1979—), 男, 高级工程师, 学士, 主要从事水利工程运行管理。E-mail: 457386551@qq.com

通信作者: 梁婷(1998—), 女, 博士研究生, 主要从事水文学水资源研究。E-mail: liangt20@mails.tsinghua.edu.cn

杨汉波(1979—), 男, 教授, 博士, 主要从事水文学水资源研究。E-mail: yanghanbo@tsinghua.edu.cn

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

2. Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. Yellow River Upstream Hydropower Development Co., Ltd., Xining 810008, Qinghai, China)

Abstract [Objective] The Yarkand Oasis, a vital oasis in northwestern China, confronts severe water scarcity and ecosystem vulnerability. High-spatial-resolution estimation of evapotranspiration (ET) is essential to understand water consumption patterns and support sustainable water resource allocation in this region. [Methods] A 30 m resolution remote sensing ET model was developed by integrating multi-source Landsat data, enabling refined ET estimation across the oasis and downstream riparian areas from 2000 to 2020. [Results] Model validation showed a relative deviation of approximately 10% compared to water balance estimations for total oasis ET . High ET values were concentrated in the irrigated lands and along riverbanks, with a peak daily average ET of approximately 6.1 mm/d. In contrast, low-value zones (daily $ET < 0.4$ mm/d) dominated oasis margins and regions distant from river channels. Downstream riparian ET decreased progressively from the riverbanks outward, with higher ET within 2 km of the riverbanks, exceeding 1 mm/d in some areas. Since 2002, total water consumption in the downstream river channels has shown a fluctuating upward trend, with a multi-year average of 466 million m^3 , peaking in 2013 at approximately 880 million m^3 . Monthly mean ET displayed distinct seasonal variations, reaching a maximum of 1.0 mm/d in July. [Conclusion] The high-resolution model effectively captures fine-scale ET variations in sparsely vegetated areas, revealing significant spatiotemporal patterns of water consumption. These findings provide critical insights for water resource management and ecological restoration in arid oasis-desert systems.

Keywords: Yarkand Oasis; sparse vegetation; Landsat; remote sensing; precipitation; water resources; spatiotemporal distribution; evapotranspiration

0 引言

干旱半干旱地区的水资源供需矛盾突出, 制约了区域可持续发展^[1]。叶尔羌河是新疆第四大河流, 滋养出叶尔羌绿洲, 形成了全疆第一大灌区。叶尔羌河的径流形成于山区, 大部分消耗于绿洲, 余下部分输送到塔河干流, 对维持干流生态至关重要^[2]。蒸散发是水资源消耗的最终形式, 开展叶尔羌绿洲及其下游河岸蒸散发研究, 对于认识区域耗水规律, 实现水资源的合理配置与区域的可持续发展具有重要意义^[3-4]。

蒸散发 (Evapotranspiration, ET) 是水循环与碳循环的关键环节, 对气候系统、水文过程及植被生长的耦合作用具有重要影响^[5]。然而, 受到温度、辐射、降水和下垫面等多种因素的影响, 蒸散发在空间和时间上表现出高度的异质性。特别是在干旱半干旱区, 即使在几百米甚至几十米的尺度上也可能发生显著变化^[6]。过去几十年, 遥感技术的发展为区域蒸散发的估算提供了新的手段。遥感蒸散发模型主要包括统计模型^[7-8]、基于能量平衡原理的单源和双源模型^[9-12]以及基于物理机制的 Penman-Monteith (PM) 类模型^[13-15]等。其中, PM 类模型因其物理机制明确、参数易于获取等优点而得到广泛应用^[5-14]。Penman-Monteith-Leuning (PML) 模型是 PM 类模型的典型代表, 经过不断改进和完善, 目前广泛采用的是

ZHANG 等^[15]提出的 PML_V2 模型, 其实现了全球高分辨率 (500 m) 的陆地蒸散发估算。

尽管如此, 目前普遍采用的遥感蒸散发估算模型空间分辨率仍多为数百米到数千米, 这可能忽略稀疏植被、裸露地表等复杂下垫面类型的精细地表植被信息, 导致估算结果存在较大误差^[16]。近年来, Sentinel-2^[17]和 ECOSTRESS^[18]等高分辨率卫星的发射促进了蒸散发的精细化研究, 但其时间覆盖范围限制了模型产品的长期应用。例如 OPEN-ET 产品 (30 m)^[19]和 ET_PT-JPT 产品 (70 m) 分别仅从 2016 年和 2018 年开始提供^[18]。Landsat 系列卫星虽然拥有 1972 年以来最长的连续观测数据^[20], 但其 16 d 的重访周期和云遮挡问题导致有效数据数量受限^[21], 直接影响了蒸散发估算的精度和时效性。为了解决这些问题, 先前的研究尝试将 Landsat 数据与其他粗分辨率卫星数据进行融合提升时空分辨率, 但高分辨率图像处理的复杂性依然限制了这些产品的全球适用性。例如, ETWatch (30 m)^[22]局限于中国黑河流域, OPEN-ET 目前仅限于美国西部, 而 geeSEBAL (30 m)^[23]则仅用于南美洲, 现有的产品无法为特定区域提供高精度长序列的蒸散发估算。

针对叶尔羌绿洲的耗水问题, 国内外学者已开展了大量研究^[24]。例如, 杨诗秀等^[25]提出年蒸发系数法并对各种土地类型的年耗水量进行了估计, 但其主

要参数主要由经验确定,存在区域适用性问题。杨红娟等^[26]引入遥感蒸散模型,利用 MODIS 数据估算了叶尔羌绿洲的蒸散量,但集中于绿洲平原区,未涉及下游河岸区域,且由于数据分辨率的限制,难以满足精细化水资源评估的需求。此外,何玉春等^[27]基于“四水”转化模型对灌区内水量转化进行了细致的研究,刘文君等^[28]从流域角度详细分析了农业耗水结构变化及其驱动因素。这些研究多聚焦于叶尔羌绿洲的平原区,侧重于流域尺度的综合治理效果和绿洲整体耗水分析。

因此,针对叶尔羌绿洲及其河流下游区域,本研究尝试提出基于高分辨率遥感数据的蒸散发估算方法,旨在解决现有模型在干旱稀疏植被区域和复杂地表类型条件下的估算偏差和短时序问题。拟通过融合多源 Landsat 数据方法,发展适用于干旱区稀疏植被的高分辨率蒸散发估算方法,揭示近二十年来(2000—2020年)叶尔羌河下游河道两岸陆面蒸散发的时空变化特征,为该区域水资源的合理利用、生态需水调度,以及社会经济发展与生态环境保护之间的协调提供科学依据。

1 研究区域和数据

1.1 研究区域

叶尔羌河(以下简称叶河)是塔里木河四源一干水系的重要组成部分^[29],位于我国新疆西南部,流域面积约为 10.8 万 km²^[30]。叶河自西南高原山区起源,流经平原绿洲,最终汇入塔里木河,如图 1 所示。绿洲面积约为 3.16 万 km²,是典型的沙漠绿洲

生态系统。该区域降水稀少,年均降水量仅为 60~80 mm,蒸发却极为强烈,年均蒸发皿蒸发量达到 1 488~2 500 mm。本研究中,下游河岸指艾力克塔木至黑尼亚孜段河道两岸区域,河道长度约 290 km,两岸主要为稀疏胡杨林。

1.2 数据来源

本研究收集了叶尔羌绿洲 2000—2020 年的地表遥感信息、气象、水文以及土地覆盖类型、大气 CO₂ 浓度等数据。用于建模的 30 m 分辨率地表遥感信息来源于多源 Landsat 数据,包括 Landsat Thematic Mapper(TM)、Enhanced Thematic Mapper Plus(ETM+)和 Operational Land Imager(OLI)系列卫星数据等。气象数据来自全球陆面数据同化系统 GLDAS-2.1,空间分辨率为 0.25°×0.25°,时间分辨率为 3 h。该数据集提供了包括气温、大气压、风速、相对湿度、短波下行辐射和长波下行辐射在内的多种气象要素。年土地覆盖类型数据为 NASA 数据集中心提供的 MCD12Q1 数据集,月均 CO₂ 浓度数据来源于全球变化信息系统(GCIS)网站。

同时,本研究还下载了 GEE 提供的 PML_V2 产品数据^[15],与计算结果进行对比分析。此外,还采用了水量平衡法进行蒸散发估算,所需的水文数据来源于叶尔羌河流域的 5 个水文站点,降水数据来源于气象站点。水文站点分别是卡群站、玉孜门勒克站、乌鲁克河站、艾力克塔木站和黑尼亚孜站,分布如图 1 所示。气象站点分别为巴楚、麦盖提、莎车、泽普和叶城。

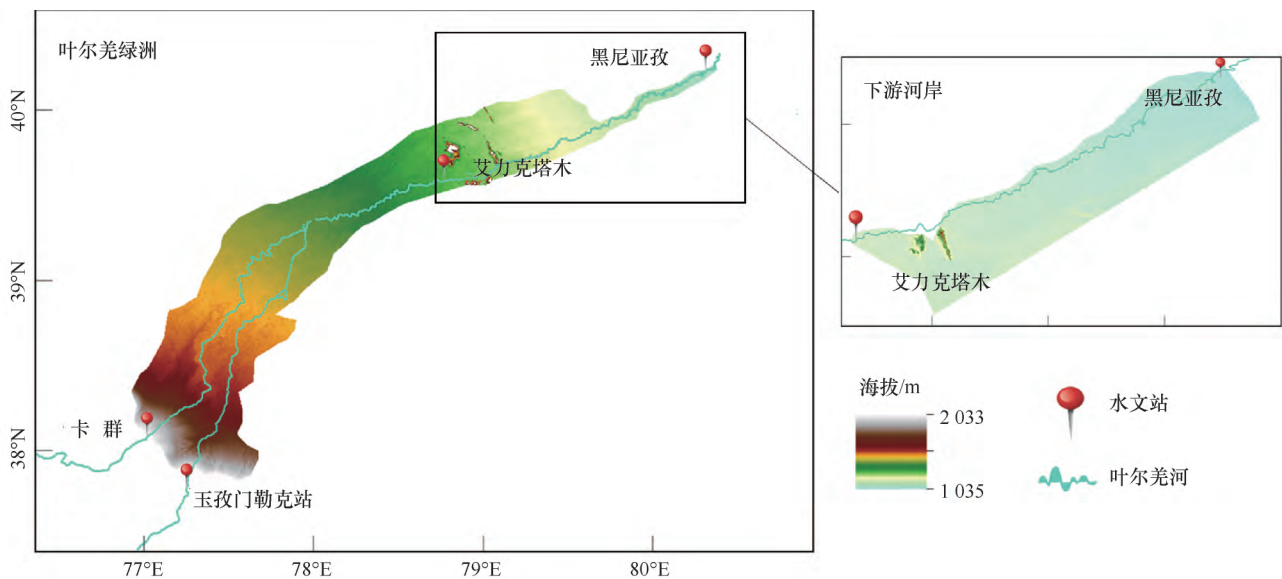


图 1 叶尔羌绿洲及下游河岸研究区域范围与主要水文站位置

Fig. 1 Study area and hydrometric of the Yarkand Oasis and downstream riparian areas

2 研究方法

2.1 高分辨蒸散发模型构建

2.1.1 高分辨率蒸散发模型原理

蒸散发(ET)由植被蒸腾(E_t)、土壤蒸发(E_s)和植被拦截蒸发(E_i)组成^[13]。模型采用 PML_V2 模型原理, E_t 和 E_s 的计算公式为^[15]

$$E_t = \frac{\varepsilon A_c + \left(\frac{\rho c_p}{\gamma}\right) D_a G_a}{\varepsilon + 1 + \frac{G_a}{G_c}} \quad (1)$$

$$E_s = \frac{f \varepsilon A_s}{\varepsilon + 1} \quad (2)$$

式中, $\varepsilon = \Delta/\gamma$, Δ 为饱和水汽压随温度变化的斜率, γ 为湿度常数; ρ 为空气密度; c_p 为定压比热容; D_a 为水汽压差(VPD); G_a 为空气导度; G_c 为冠层导度; f 为土壤蒸发系数。

模型将总可用能量(A)根据叶面积指数(LAI)和消光系数(K_A)划分为植被吸收(A_c)与土壤吸收(A_s), 即: $A_c/A = 1 - \tau$, $A_s/A = \tau$, 其中 $\tau = \exp(-K_A LAI)$ ^[13]。

高分辨率蒸散发估算模型将 Landsat 系列数据(TM、ETM+、OLI)反演的 30 m 分辨率 LAI 、地表发射率和反照率作为驱动变量, 将 PML_V2 模型空间分辨率由原始的 500 m 提升至 30 m。模型其他输入数据包括气象数据 GLDAS-2.1、土地覆盖类型数据 MCD12Q1 和月均 CO_2 浓度数据。为匹配地表参数的空间分辨率(30 m), 采用最近邻插值法将 GLDAS-2.1(0.25°)数据和 MCD12Q1(500 m)重采样至 30 m。以上涉及的数据处理、计算和分析均在 Google Earth Engine(GEE)平台中完成。高分辨率模型流程如图 2 所示。

2.1.2 Landsat 数据融合

Landsat 系列卫星具有不同的在轨时间, 通过数据融合, 不仅可以生成长时间序列的产品, 还可以减少 Landsat 数据存在的间隙误差、云或者阴影遮罩造成数据缺失的影响。尽管 Landsat TM 和 Landsat ETM+ 属于不同的传感器, 但两者的地表反射率均由 Landsat 生态系统干扰自适应处理系统(LEDAPS)算法得出, 具有良好的一致性^[15-31]。与 TM 和 ETM+ 相

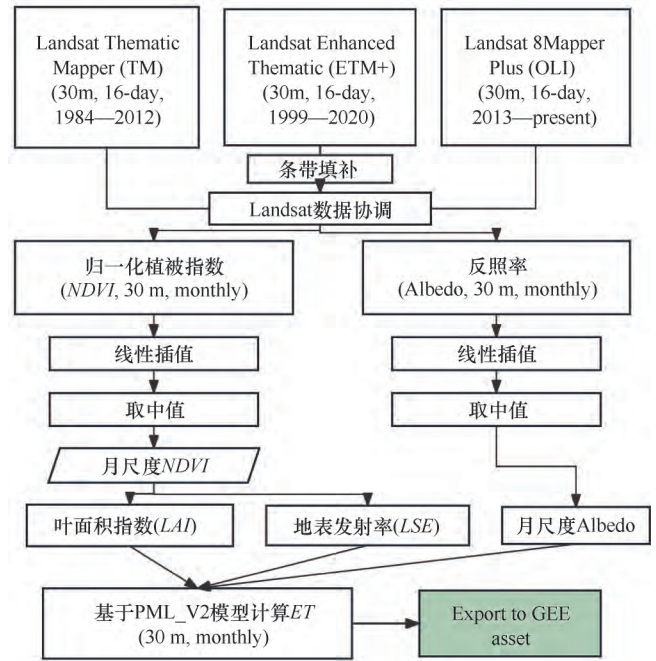


图 2 高分辨率模型流程

Fig. 2 Flowchart of the high-resolution model

比, Landsat OLI 采用了更为先进的技术, 地表反射率数据由 Land Surface Reflectance Code (LaSRC) 算法生成^[32]。ROY 等^[33]研究表明, 根据实际应用的不同, Landsat ETM+和 OLI 的光谱特征之间存在微小但是潜在的显著差异, 可以通过 TM 和 ETM+光谱到 OLI 光谱的线性变化实现协调, 各波段普通最小二乘的回归系数如表 1 所列^[33]。

针对光学遥感中云和云阴影的噪声干扰, 本研究基于 Google Earth Engine(GEE)平台, 采用 FMASK 算法对 Landsat 影像进行去云及去云阴影掩膜处理, 利用 pixel_qa 波段将识别为云或云阴影的像素值设置为空, 以消除云、云阴影的噪声影响。由于 Landsat ETM+卫星从 2003 年开始出现扫描故障, 其影像出现了条带, 在数据融合之前, 借助 GEE 提供的条带填补算法对其进行修复。随机选取一景影像的填补效果如图 3 所示, 表明该算法有较好效果。

2.1.3 NDVI 的反演

$NDVI$ 由 Landsat 数据产品中的近红外波段和红色波段计算得到, 即 $NDVI = (R_{NIR} - R_{Red}) / (R_{NIR} + R_{Red})$,

表 1 各波段回归系数

Table 1 Regression coefficients of each band

波段	蓝	绿	红	近红外	短波红外 1	短波红外 2
斜率	0.000 3	0.008 8	0.006 1	0.041 2	0.025 4	0.017 2
截距	0.847 4	0.848 3	0.904 7	0.846 2	0.893 7	0.907 1

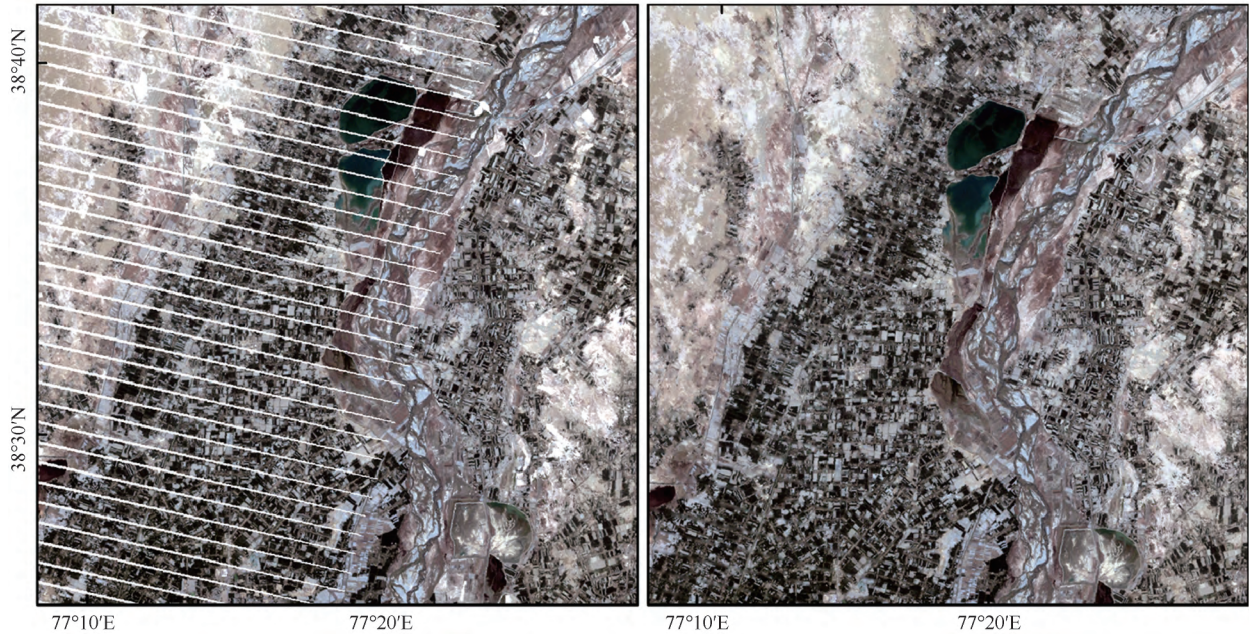


图3 Landsat ETM+影像条带填补前后对比

Fig. 3 Comparison between original and gap-filled image from Landsat ETM+

其中 R_{NIR} 和 R_{Red} 分别为近红外和红光的反射率值。图4为筛选处理后各卫星遥感数据在叶尔羌绿洲每年夏季时期的 $NDVI$ 中值, 经过处理协调之后没有出现明显偏差。取筛选处理后数据, 计算逐月所有数据中各像素点的中位数, 作为该月份在对应位置的平均值^[34]。由此得到时间分辨率为一个月, 空间分辨率为 30 m 的 Landsat $NDVI$ 数据。对缺失的数据取前后两个时间窗的平均值作为数据输入^[34]。

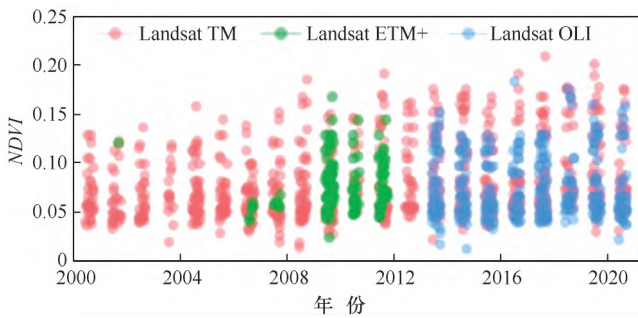


图4 叶尔羌绿洲 2000—2020 年夏季 $NDVI$

Fig. 4 Summer $NDVI$ in the Yarkand Oasis from 2000 to 2020

2.2 地表参数计算

2.2.1 叶面积指数

已有研究表明, 近红外光和红光的反射率与 LAI 之间存在很强的相关性。本研究利用计算得到 Landsat $NDVI$ 产品反演研究区域的植被覆盖度 (FVC), FVC 的计算采用了像元二分模型

$$FVC = \frac{NDVI - NDVI_0}{NDVI_1 - NDVI_0} \quad (3)$$

式中, $NDVI_1$ 为植被完全覆盖的 $NDVI$ 值; $NDVI_0$ 为无植被覆盖的 $NDVI$ 值。

叶尔羌绿洲边缘有大量的裸地, 因此可以通过 $NDVI$ 分布直方图确定 $NDVI_0$ 。图5为 2014 年不同月份 $NDVI$ 变化情况。由图5可见, $NDVI$ 最低峰值在全年保持在 0.07~0.09, 主要对应裸地像元, 本研究中取 $NDVI_0$ 为 0.08; 第二个峰值在 4—9 月逐步显现, 至 8 月达到最大, 对应绿洲区农田或林草地像元, 根据直方图中的最高值确定 $NDVI_1 = 0.86$, 与杨红娟等^[26]在该地的 $NDVI$ 阈值取值较为接近。

对于叶倾角均匀分布的植被, 叶面积指数公式为 $LAI = -2 \times \ln(1 - FVC)$ ^[26]。由以上公式计算, 最终输出 30 m 空间分辨率、月尺度的叶面积指数产品。

2.2.2 反照率

采用 LIANG 等^[35]提供的方法

$$\text{反照率} = \frac{0.356\rho_1 + 0.130\rho_3 + 0.373\rho_4 + 0.085\rho_5 + 0.072\rho_7 - 0.0018}{1.016} \quad (4)$$

式中, ρ_1 、 ρ_3 、 ρ_4 、 ρ_5 、 ρ_7 为 Landsat 数据, 对应的波段分别为 1、3、4、5、7。

反照率的时间分辨率为一个月, 空间分辨率为 30 m。对缺失的数据取前后两个时间窗的平均值作为数据输入。

2.2.3 地表发射率

SOBRINO 等^[36]在 2000 年提出了一种简单且可操作的基于 $NDVI$ 阈值方法, 从遥感数据估算地表发

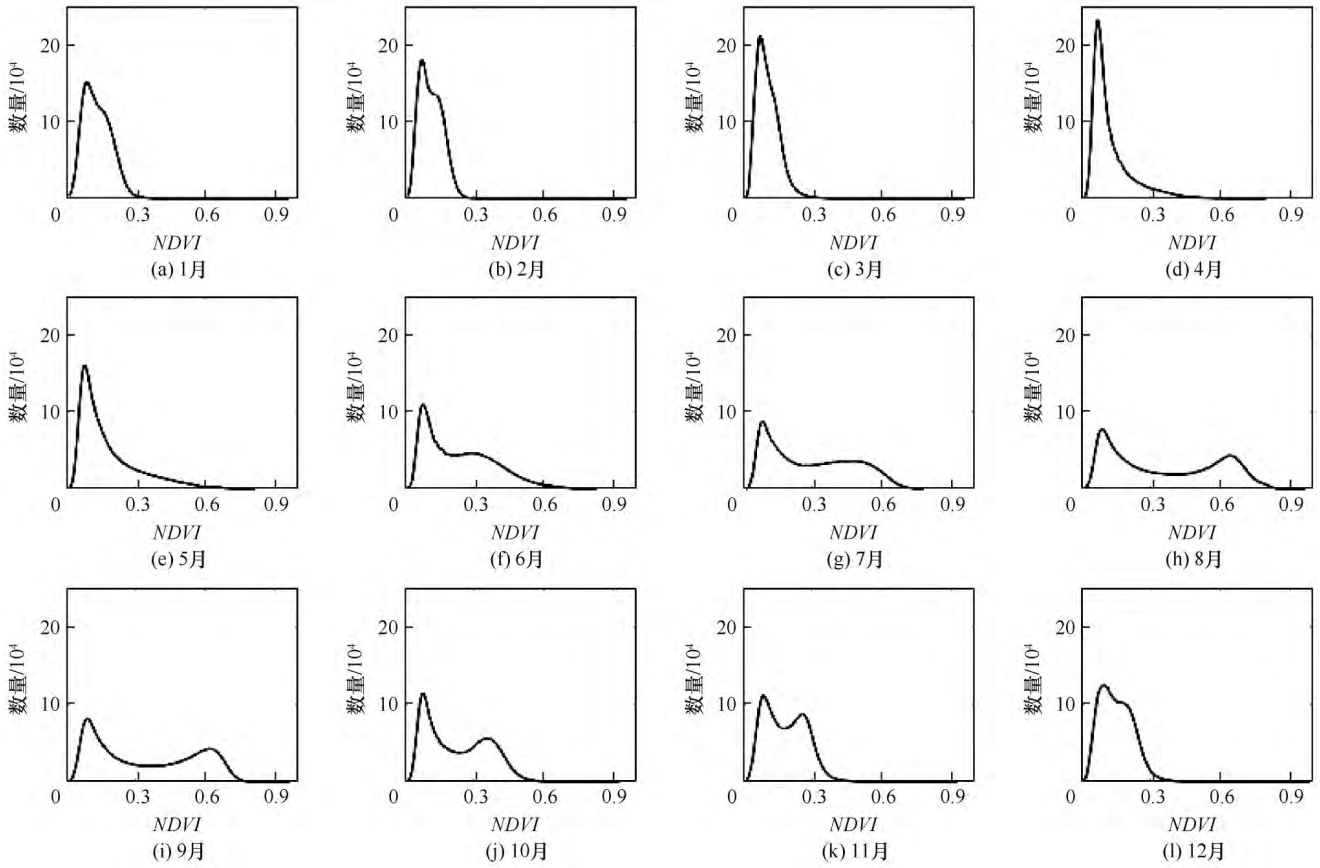


图5 2014年NDVI直方图
Fig. 5 Histogram of NDVI in 2014

射率。根据SOBRINO等提出的简化方法, 不考虑空腔效应影响, 计算方法为^[37]

$$\varepsilon_{\lambda} = \begin{cases} \varepsilon_{s\lambda} & NDVI < NDVI_0 \\ \varepsilon_{s\lambda} + (\varepsilon_{v\lambda} - \varepsilon_{s\lambda}) \times FVC & NDVI_0 \leq NDVI \leq NDVI_1 \\ \varepsilon_{v\lambda} & NDVI > NDVI_1 \end{cases} \quad (5)$$

式中, $\varepsilon_{s\lambda}$ 为裸土的发射率, 取值为 0.972; $\varepsilon_{v\lambda}$ 为植被的发射率, 取值为 0.985。

与估算叶面积指数类似, 使用由协调整合的 Landsat NDVI 产品反演研究区域的植被覆盖度 (FVC), 然后通过 FVC 估算地表发射率。

2.3 高分辨率模型的验证

为评估模型计算结果的可靠性, 以基于水量平衡法计算的蒸散发量为参考, 对比 PML_V2 产品和高分辨率模型产品估算的蒸散发量。水量平衡公式为

$$ET = R_{in} + P - R_{out} - \Delta GW - W_{other} \quad (6)$$

式中, R_{in} 为区域输入的径流深; P 为区域降水量; R_{out} 为区域输出的径流深; ΔGW 为土壤水和地下水蓄变量; W_{other} 为工业用水和生活用水量。

区域入流包括卡群、玉孜门勒克入流, 区域出流

为黑尼亚孜出流。年平均降水量 P 通过垂直方法整合巴楚、麦盖提、莎车、泽普和叶城 5 个气象站日降雨数据获得, 研究区多年平均降水量为 67 mm。由于研究区为典型的干旱大陆性气候, 降水量小, 大部分的雨水在降落到地面时会立刻被蒸发掉, 对区域水量平衡影响较小。 ΔGW 难以直接测量, 根据陈钟望等^[38] 研究, 2005 年之前区域地下水埋深基本稳定, 年际变化很小。古力米日等^[39] 进一步指出, 2006—2017 年期间研究区 3 个主要灌区地下水埋深以 0.092~0.15 m/a 速度逐渐加深。结合当地土壤质地并按给水度 0.1 进行换算, ΔGW 约为 9.5~15 mm/a, 所占比例较小。此外, 研究区工业和生活耗水量仅占总耗水量的 0.5%~2%^[40]。由于 P 、 ΔGW 和 W_{other} 影响均较小, 本研究在水量平衡估算中对其进行了简化处理, 采用区域年入流与出流量差值估算区域总蒸散发量。

基于流域多年平均蒸散发量进行对比验证, 分别计算高分辨率模型产品和 PML_V2 产品相对于水量平衡基

准的相对偏差 (RB), 其中 $RB = \frac{ET_{sim} - ET_{WB}}{ET_{WB}} \times 100\%$ 。

3 结果与讨论

3.1 模型验证与精度对比

3.1.1 水量平衡对比

图6对比了3种方法在2000—2020年期间基于水量平衡法、PML_V2产品及高分辨率模型的年蒸散发量估算结果。结果表明,高分辨率模型估算的蒸散发量与PML_V2产品的计算结果较为接近。在整个研究区,基于水量平衡法估算的2000—2020年平均蒸散发量约为380 mm。以水量平衡法的结果为参考,PML_V2产品估算的多年平均蒸散发量为304 mm,相对偏差为-20%;而高分辨率模型估算的多年平均蒸散发量为344 mm,与水量平衡的结果差约40 mm,相对偏差约为-10%。这一定程度表明高分辨率模型计算的结果更为可靠。

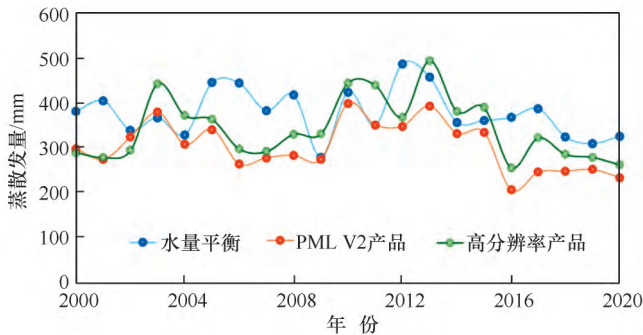


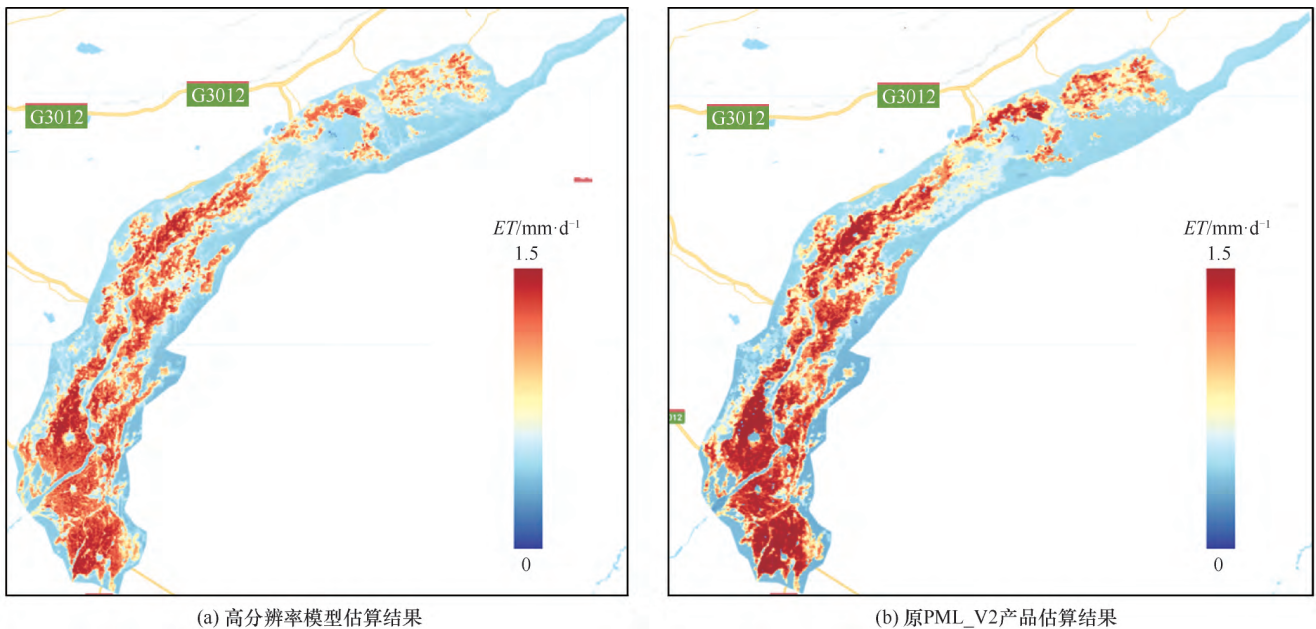
图6 高分辨率模型估算的多年平均蒸散发和PML_V2产品、水量平衡法结果对比

Fig. 6 Comparison of high-resolution model estimates of long-term average evapotranspiration with PML_V2 product and water balance method results

3.1.2 空间精度对比

图7展示了基于改进的高分辨率模型和原PML_V2产品反演的多年平均蒸散发量空间分布格局,二者在空间分布上较为一致。具体而言,研究区域内几个水库的蒸散发量较高;较高的蒸散发量主要集中于绿洲西南部和中部的耕地,峰值区域的日均蒸散发量约为6.1 mm;较低的蒸散发量则分布在绿洲边缘和东北部,日均蒸散发量不足0.4 mm。

为了进一步对比分析两种模型在精细尺度上的差异,截取叶河下游河道两岸区域分析不同时间尺度下的差异性。以2017年为例,分别提取春季(3—5月)、夏季(6—8月)、秋季(9—11月)和冬季(12月—次年2月)的蒸散发量进行对比分析,如图8所示(图像为便于展示已顺时针旋转25°)。结果显示,蒸散发在空间上的分布随季节显著变化,两种模型在季节上的变化趋势基本一致。但高分辨率模型在稀疏植被区域表现出更强的空间敏感性,如图8(a)所示,夏季蒸散发强度最高,分布范围最广,主要集中在绿洲耕地和林草区域,空间分布特征与实际土地覆盖类型较为一致;春秋季蒸散量减少,空间范围显著收缩,仅在河道与部分常绿植被区域维持较低水平,冬季整体蒸散量最低。而图8(b)显示,原PML_V2产品的估算结果难以反映蒸散发量的空间变异性,在不同季节中呈现出平滑或模糊的分布特征,具有明显的分界线。这表明改进的模型在精细尺度上的空间表达能力更强,尤其在稀疏植被或非均质地表条件下,更能准确刻画蒸散发量的空间变异性。



(a) 高分辨率模型估算结果

(b) 原PML_V2产品估算结果

图7 叶尔羌绿洲2000—2020年平均蒸散发量空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of average evapotranspiration in the Yarkand Oasis from 2000 to 2020

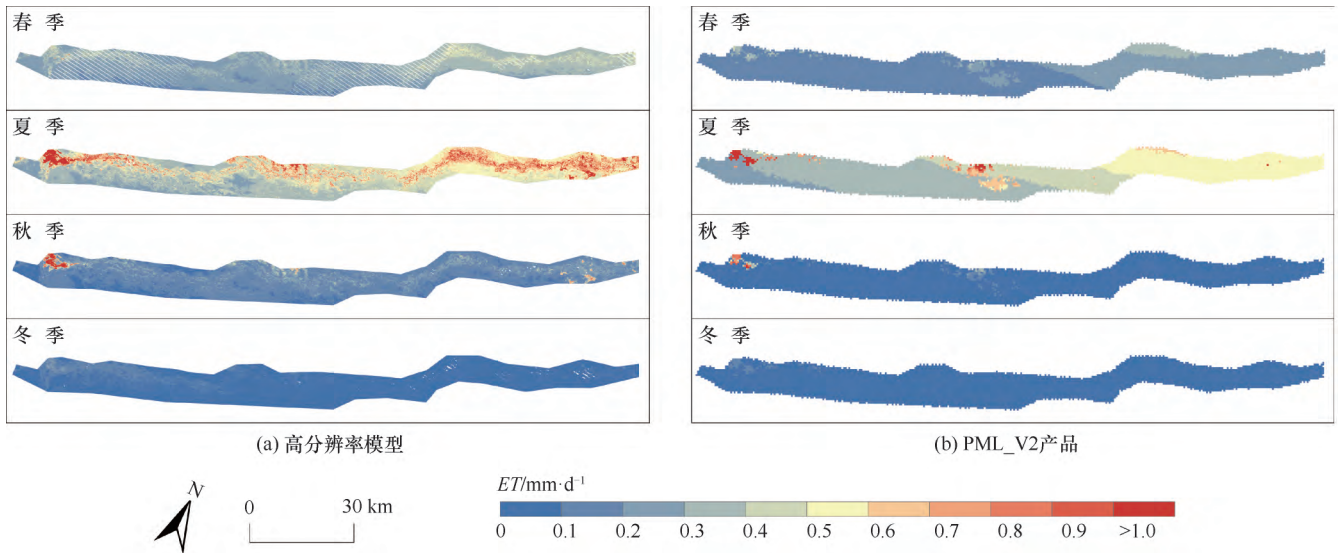


图 8 2017 年叶河下游河道两岸不同季节蒸散发量空间分布

Fig. 8 Seasonal evapotranspiration distribution of the downstream riparian areas in 2017

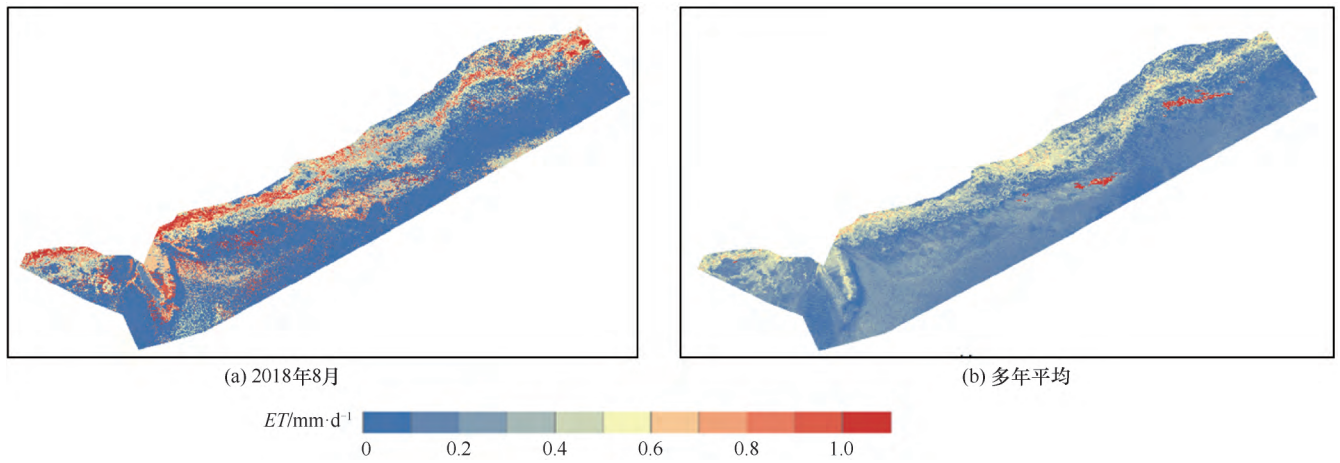


图 9 下游河道区域在 2018 年 8 月和多年平均的蒸散发量空间分布

Fig. 9 Spatial distribution of evapotranspiration in the downstream riparian areas in August 2018 and multi-year average

3.2 下游河岸耗水分析

3.2.1 空间分布

图 9 (a) 展示了叶河下游河道区域 2018 年 8 月的蒸散发量的空间分布格局。分布规律均呈现出沿河道两侧向外递减, 且上游入口处和下游出口处的蒸散发量高于河道中段区域。河道两侧的日均蒸散发量在 8 月份基本超过 1 mm/d。上游入口处因毗邻水库且位于绿洲区, 其日均蒸散发量远高于 1 mm/d; 下游出口处日均蒸散发量也相对较高。图 9 (b) 进一步展示了下游河道区域多年平均蒸散发量的空间分布情况。河岸两侧区域的日均耗水量基本维持在 0.5 mm/d 以上, 其中部分区域的日均耗水量超过 1 mm/d, 这部分主要为水面蒸发; 而右侧边缘的大面积裸地, 其日均耗水量接近于 0。

选取了如图 10 所示的 3 个河道断面进行分析。

以 2018 年 8 月为例(见图 11) , 3 个断面的蒸散发量

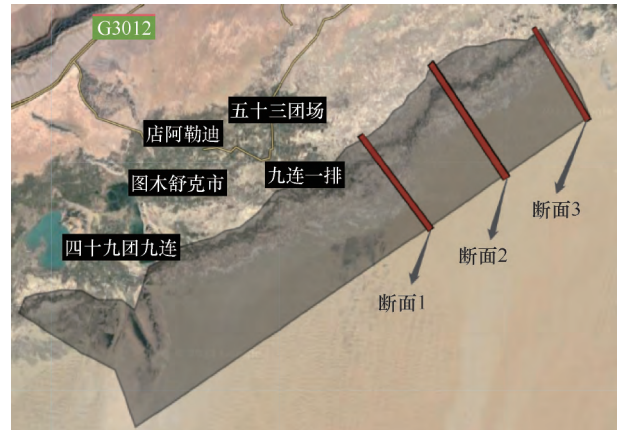


图 10 下游河道断面分布

Fig. 10 Cross-sectional distribution of the downstream riparian areas

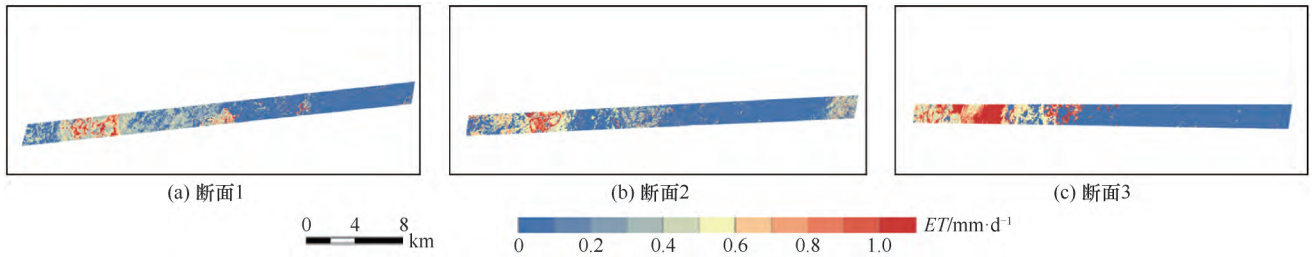


图 11 下游河道 2018 年 8 月耗水量断面分布

Fig. 11 Spatial distribution of evapotranspiration in the downstream riparian areas in August 2018

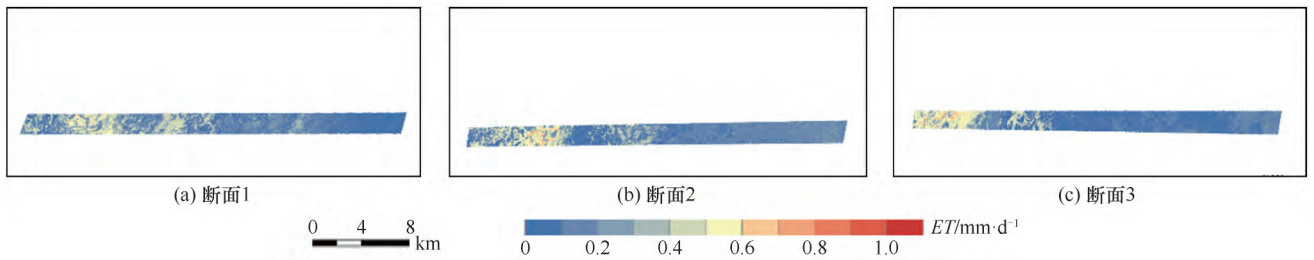


图 12 下游河道多年平均耗水量断面分布

Fig. 12 Spatial distribution of evapotranspiration in the downstream riparian areas of multi-year average

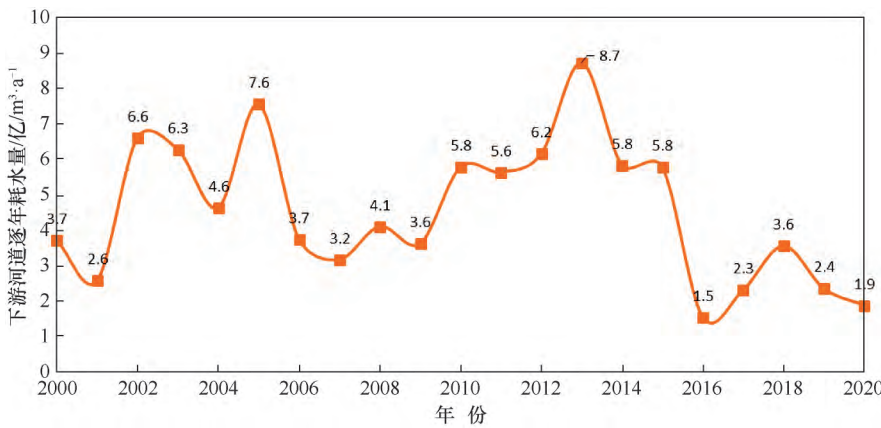


图 13 下游河道两岸逐年耗水总量变化趋势

Fig. 13 Annual trend of total water consumption in the downstream riparian areas

均呈现出由河道中心向两岸递减的趋势。河道两侧约 2 km 范围内, 蒸散发量相对较高, 部分区域的日均蒸散发量超过 1 mm/d。而在远离河道的边缘地带, 由于植被稀少, 以裸地为主, 日均蒸散发量显著降低, 大部分区域低于 0.5 mm/d。

图 12 展示了这 3 个断面多年平均耗水量的空间分布。不同断面的年均耗水量和夏季耗水量的分布规律较为一致, 均表现为河道中心及其两侧的平均耗水量显著高于边缘区域, 且随距离河道的增大呈逐渐降低的趋势。这种分布特征反映出河道及其附近区域的植被对水资源的依赖性较强, 而边缘区域由于渗漏水量较少, 植被覆盖稀疏, 耗水量相对较低。

3.2.2 年际变化

2000—2020 年期间下游区域的年耗水总量如图

13 所示。多年耗水总量平均值为年 4.66 亿 m³, 与付翔永等^[2]利用水量平衡计算得到的多年平均 4.35 亿 m³ 基本一致; 2013 年耗水总量达到峰值(8.7 亿 m³), 2013—2017 年耗水量有所减少, 一方面可能与区域内径流量减少有关; 另一方面也可能与下游区域耕地面积减少有关。2016—2020 年整体呈现低值波动趋势。

3.2.3 季节变化

多年月平均蒸散发量的变化如图 14 所示。1—3 月, 月均蒸散发量逐渐增加至 0.5 mm/d, 这与该时段林草植被逐渐复苏并开始生长相吻合。3—4 月, 月均蒸散发量的增长速率有所减缓, 这可能是因为植被处于生

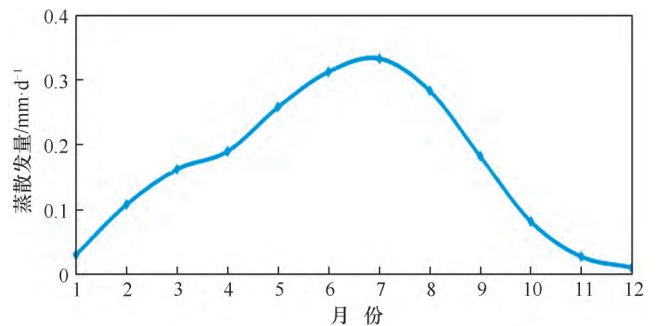


图 14 下游河道两岸区域多年平均月蒸散发量

Fig. 14 Multi-year monthly average evapotranspiration in downstream riparian areas

旺盛期, 需水量增加, 导致蒸腾速率增幅受限。7月, 月均蒸散发量达到峰值, 为 1.0 mm/d。7月之后, 随着气温逐渐下降, 植被开始凋零, 林草耗水量也相应减少。此规律表明蒸散发量的季节变化主要受到植被生长周期的影响。

3.3 讨论

3.3.1 不确定性分析

本研究构建的高分辨率遥感蒸散发模型, 在精确

捕捉蒸散发的空间分布方面表现出较好的效果。与传统的低分辨率模型相比, 本方法在稀疏植被区的蒸散发量计算上更为准确, 能够有效捕捉植被生长和蒸散发之间的细微变化, 表明模型适用于干旱区地表蒸散发的估算。

本研究仍存在以下几个方面的不足。首先, 当前的模型仍然依赖于 Landsat 遥感数据, 影像受云层和云阴影的影响较大, 一个格点上所有影像的中值可能

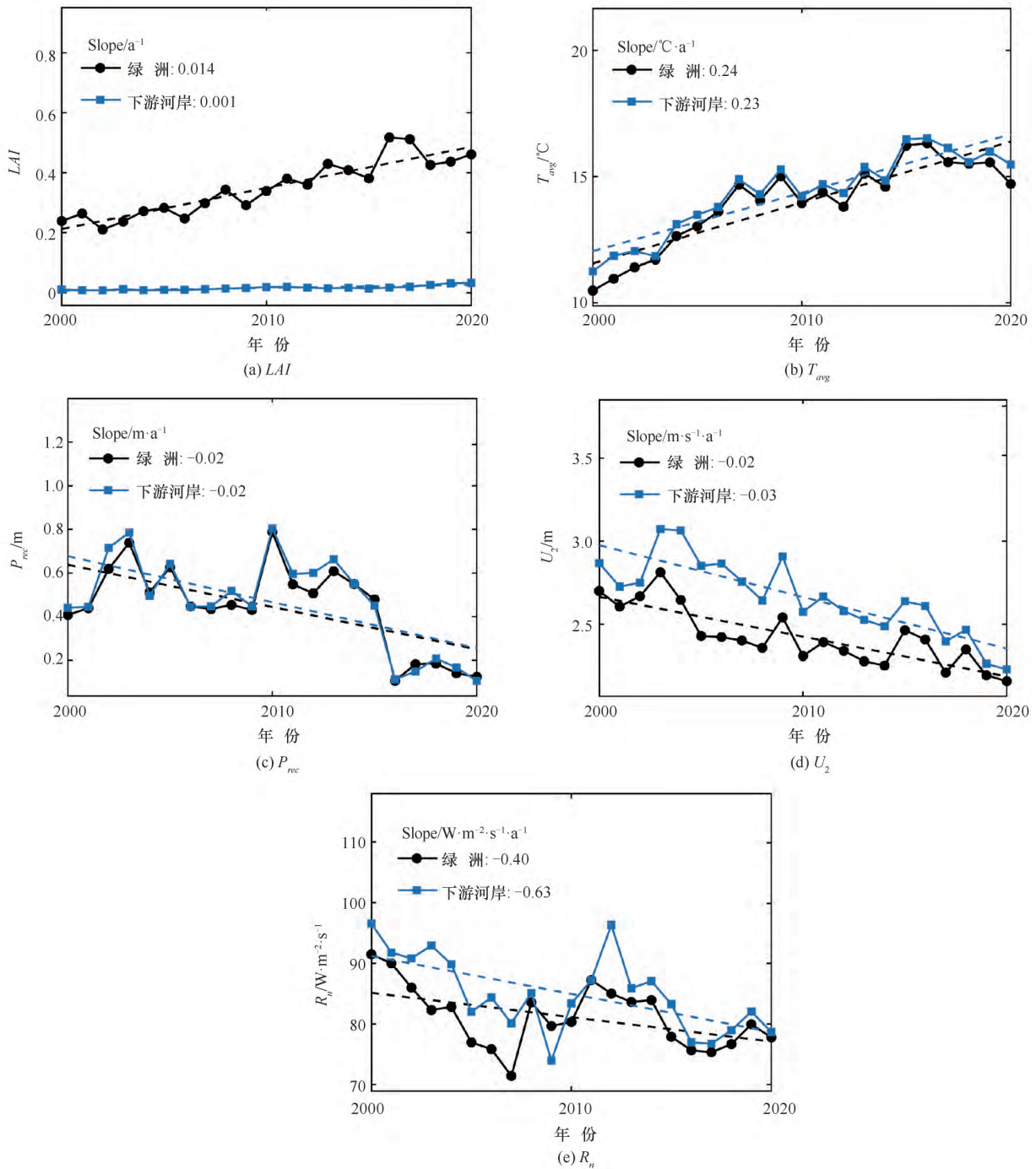


图 15 叶尔羌绿洲及其下游河岸气候因素和叶面积指数的年际变化

Fig. 15 Long-term changes of climate variables and LAI in Yarkand Oasis and its downstream riparian areas

无法充分代表该月的平均水平。其次,模型采用了 0.25°分辨率的气象数据并进行了插值,较粗的空间分辨率输入参数可能会带来一些不确定性。此外,水量平衡方法中未考虑地下水、土壤水分和生活用水等因素的动态变化,这在一定程度上带来了误差。

3.3.2 影响因素分析

通过分析模型计算公式中各参数的含义,选取降水量(P_{rec})、风速(V_2)、净辐射(R_n)、温度(T_{avg})这4个主要气候因子^[41],结合表征植被生长的叶面积指数(LAI),综合评估各因子对蒸散发(ET)变化的影响。为了量化气象因子和植被因子对ET变化的影响,构建了多元线性回归模型,采用标准化回归系数绝对值量化各因子相对贡献率,其计算公式为

$$C_h = |\beta_i| / \sum |\beta_k|^{[42]}$$

式中 C_h 为某驱动因子对ET的相对贡献率(%); β_i 为各个因子的标准化回归系数。

图15展示了叶尔羌绿洲和下游河岸在2000—2020年期间气候变量和LAI的年际变化趋势。绿洲区域内的LAI呈现显著增加趋势,增加速率为 $0.013 \cdot a^{-1}$,可能与农田扩张密切相关。而在下游河岸的LAI年均增速约为 $0.001 \cdot a^{-1}$ 。除了LAI以外,绿洲和下游河岸的气候因子年际变化趋势非常相似。气温表现为持续上升趋势,增加速率为 $0.23 \sim 0.24 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot a^{-1}$ 。降水量、风速和净辐射在研究区域均呈现出波动下降的趋势,下降速率为 $-0.02 \text{ m} \cdot a^{-1}$ 、 $-0.02 \sim 0.03 \text{ m} \cdot s^{-1} \cdot a^{-1}$ 、 $-0.4 \sim 0.63 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot a^{-1}$,其中降水量和净辐射在年际内的波动较大。

图16显示了各驱动因子对ET变化的相对贡献

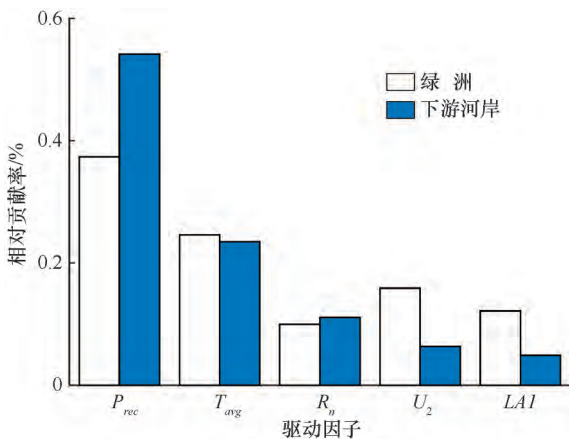


图16 气候因素和LAI对叶尔羌绿洲及其下游河岸ET的相对贡献率

Fig. 16 Contributions of climatic factors and LAI to ET trends over the Yarkand Oasis and its downstream riparian areas

率。降水量在绿洲和下游河岸区域的贡献最大,贡献率分别为37%和54%。温度和风速在绿洲区域的贡献较大,其贡献率分别为25%和16%,在下游河岸的相对贡献率分别为23%和6%。净辐射的贡献在两区域中较为相似,约为10%和11%。叶面积指数在绿洲区域的相对贡献明显大于下游河岸,分别为12%和4%,这表明随着绿洲的农田耕作面积增加,LAI对ET变化的影响逐渐增强。

总体而言,降水量是该地区ET变化的主要驱动因素,说明在干旱区蒸散发主要受到水分的限制。气候因子和植被因子的年际变化共同影响了ET的波动。

4 结论

本研究建立了30 m分辨率的遥感蒸散发模型,以此估算了叶尔羌绿洲及其下游区域的蒸散发量,系统分析了下游河岸林草耗水的空间分布与年际变化规律,主要研究结论如下。

(1) 高分辨率模型更准确地捕捉到稀疏植被区蒸散发量的空间变化,与原PML_V2产品相比,在区域尺度上保持了较好的一致性;在局部,特别是叶河下游河道两侧,更符合实际的空间分布,更清晰地展现出河道中心与边缘区域蒸散发量的显著差异。

(2) 下游河岸耗水,呈现出沿河道两侧向外递减的特征,河道附近区域的日耗水量显著高于裸地区域;2000年至2020年多年平均耗水总量4.66亿 m^3 ,峰值出现在2013年,2016年以来的几年处于较低水平。季节变化规律显示,蒸散发量的时序变化主要受到植被生长周期的控制,7月达到全年峰值。

本研究改进的30 m高分辨率蒸散发模型,为干旱区精细化水文研究提供了重要的技术支撑,有助于更准确地评估不同土地覆盖类型,特别是稀疏植被的蒸散发量。同时,对叶尔羌河下游河岸林草耗水过程的深入分析,为该地区的水资源合理配置和生态修复提供了参考。

参考文献(References):

- [1] 齐泓玮,尚松浩,李江. 中国水资源空间不均匀性定量评价[J]. 水力发电学报,2020,39(6): 28-38.
QI Hongwei, SHANG Songhao, LI Jiang. Quantitative evaluation on spatial heterogeneity of water resources in China [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2020, 39(6): 28-38.
- [2] 付翔永,杨汉波,谢艳玲,等. 叶尔羌河下游河岸林草耗水分析[J]. 水力发电学报,2023,42(2): 45-55.
FU Xiangyong, YANG Hanbo, XIE Yanling, et al. Analysis on water

- consumption by forest and grass in lower reach of Yarkand River [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2023, 42(2): 45-55.
- [3] 雷志栋, 杨汉波, 倪广恒, 等. 干旱区绿洲耗水分析[J]. *水利水电技术*, 2006, 37(1): 15-20.
LEI Zhidong, YANG Hanbo, NI Guangheng et al. Analysis on water consumption of oasis in arid area [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2006, 37(1): 15-20.
- [4] 唐晓宇, 刘铁, 黄粤, 等. 开都河流域水-能源-生态综合收益下的水资源优化配置[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2025, 23(1): 90-98.
TANG X Y, LIU T, HUANG Y, et al. Optimal allocation of water resources under integrated water-energy-ecological benefits in Kaidu River basin [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2025, 23(1): 90-98.
- [5] ZHANG Y, PEÑA-ARANCIBIA J L, MCVICAR T R, et al. Multi-decadal trends in global terrestrial evapotranspiration and its components [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 19124.
- [6] SMITH W K, DANNENBERG M P, YAN D, et al. Remote sensing of dryland ecosystem structure and function: Progress, challenges, and opportunities [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 233: 111401.
- [7] JACKSON R D, REGINATO R J, IDSO S B. Wheat canopy temperature: A practical tool for evaluating water requirements [J]. *Water Resources Research*, 1977, 13(3): 651-656.
- [8] JIANG L, ISLAM S, GUO W, et al. A satellite-based daily actual evapotranspiration estimation algorithm over South Florida [J]. *Global and Planetary Change*, 2009, 67(1): 62-77.
- [9] TIMMERMANS W J, KUSTAS W P, ANDERSON M C, et al. An intercomparison of the Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) and the Two-Source Energy Balance (TSEB) modeling schemes [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 108(4): 369-384.
- [10] SU Z. The Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2002, 6(1): 85-100.
- [11] NORMAN J M, KUSTAS W P, HUMES K S. Source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes in observations of directional radiometric surface temperature [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1995, 77(3): 263-293.
- [12] JIA L. Modeling Heat Exchanges at the Land-Atmosphere Interface Using Multi-Angular Thermal Infrared Measurements [D]. Netherlands: Wageningen University and Research, 2004.
- [13] CLEUGH H A, LEUNING R, MU Q, et al. Regional evaporation estimates from flux tower and MODIS satellite data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 106(3): 285-304.
- [14] 范梦颖, 吴宗俊, 崔宁博, 等. 云贵地区参考作物蒸散量模型适用性评价[J]. *排灌机械工程学报*, 2024, 42(9): 928-937.
FAN Mengying, WU Zongjun, CUI Ningbo, et al. Applicability evaluation of reference crop evapotranspiration models in Yun-Gui region [J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2024, 42(9): 928-937.
- [15] ZHANG Y, KONG D, GAN R, et al. Coupled estimation of 500 m and 8-day resolution global evapotranspiration and gross primary production in 2002-2017 [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 222: 165-182.
- [16] LIANG T, LI C, HE Y, et al. PML_30: A high resolution (30 m) estimates of evapotranspiration based on remote sensing model with application in an arid region [J]. *Journal of Hydrology*, 2024, 642: 131862.
- [17] PHIRI D, SIMWANDA M, SALEKIN S, et al. Sentinel-2 Data for Land Cover/Use Mapping: A Review [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(14): 2291.
- [18] FISHER J B, LEE B, PURDY A J, et al. ECOSTRESS: NASA's next generation mission to measure evapotranspiration from the international space station [J]. *Water Resources Research*, 2020, 56(4): e2019WR026058.
- [19] JUNG M, KOIRALA S, WEBER U, et al. The FLUXCOM ensemble of global land-atmosphere energy fluxes [J]. *Scientific Data*, 2019, 6(1): 74.
- [20] MASEK J G, WULDER M A, MARKHAM B, et al. Landsat 9: Empowering open science and applications through continuity [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 248: 111968.
- [21] JU J, ROY D P. The availability of cloud-free Landsat ETM+ data over the conterminous United States and globally [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(3): 1196-1211.
- [22] WU B, YAN N, XIONG J, et al. Validation of ETWatch using field measurements at diverse landscapes: A case study in Hai Basin of China [J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 436/437: 67-80.
- [23] LAIPELT L, HENRIQUE B K R, SANTOS F A, et al. Long-term monitoring of evapotranspiration using the SEBAL algorithm and Google Earth Engine cloud computing [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2021, 178: 81-96.
- [24] 刘涛. 叶尔羌河流域山区-平原水库联合调度研究[J]. *水利科学与寒区工程*, 2023, 6(4): 68-71.
LIU Tao. Research on joint operation of mountainous plain reservoirs in the Yarkand River Basin [J]. *Hydro Science and Cold Zone Engineering*, 2023, 6(4): 68-71.
- [25] 杨诗秀, 雷志栋, 沈言俐, 等. 叶尔羌河平原绿洲土地类型及耗水的分析[J]. *灌溉排水*, 1999(2): 43-46.
YAG Shixiu, LEI Zhidong, SHE Yanli, et al. Analysis of oasis land types and water consumption in Yarkand River Plain [J]. *Irrigation and Drainage*, 1999(2): 43-46.
- [26] 杨红娟, 丛振涛, 赵岩, 等. 叶尔羌河流域绿洲蒸散量的遥感估算[J]. *干旱区研究*, 2012, 29(3): 479-486.
YANG Hongjuan, CONG Zhentao, ZHAO Yan, et al. Remote sensing estimation of oasis evapotranspiration in Yarkand River Basin [J]. *Arid Area Research*, 2012, 29(3): 479-486.
- [27] 何玉春, 李金柱, 李江, 等. 基于“四水”转化模型的新疆叶尔羌河绿洲农业节水潜力研究[J]. *水利科学与寒区工程*, 2025, 8(1): 44-49.
HE Yuchun, LI Jinzhu, LI Jiang, et al. Research on the potential of water-saving in oasis agricultural based on “four-water” transformation model in Yeqiang River of Xinjiang [J]. *Hydro Science and Cold Zone Engineering*, 2025, 8(1): 44-49.

- [28] 刘文君,胡可可,苏里坦,等. 塔里木河流域农业耗水特征及其影响因素分析[J]. 干旱区地理, 1-13 [2025-04-15].
LIU Wenjun, HU Keke, SU Litan, et al. Characteristics and influencing factors of agricultural water consumption in the Tarim River Basin [J]. Arid Land Geography, 1-13 [2025-04-15].
- [29] 黄强,赵冠南,郭志辉,等. 塔里木河干流水资源优化配置研究[J]. 水力发电学报, 2015, 34(4): 38-46.
HUANG Qiang, ZHAO Guannan, GUO Zhihui et al. Study on optimization of water resources allocation in the Tarim River [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2015, 34(4): 38-46.
- [30] 罗菊花,麦麦提·古力巴尔. 叶尔羌河流域水文特性分析[J]. 水文, 2005, 25(3): 58-62.
LOU Juhua, MAIMAITI Gulibaer. Hydrological characteristics analysis of the Yarkand River Basin [J]. Journal of China Hydrology, 2005, 25(3): 58-62.
- [31] CLAVERIE M, VERMOTE E F, FRANCH B, et al. Evaluation of the Landsat-5 TM and Landsat-7 ETM+ surface reflectance products [J]. Remote Sensing of Environment, 2015, 169: 390-403.
- [32] VERMOTE E, JUSTICE C, CLAVERIE M, et al. Preliminary analysis of the performance of the Landsat 8/OLI land surface reflectance product [J]. Remote Sensing of Environment, 2016, 185: 46-56.
- [33] ROY D P, KOVALSKYY V, ZHANG H K, et al. Characterization of Landsat-7 to Landsat-8 reflective wavelength and normalized difference vegetation index continuity [J]. Remote Sensing of Environment, 2016, 185: 57-70.
- [34] XIE S, LIU L, ZHANG X, et al. Automatic land-cover mapping using Landsat time-series data based on Google Earth Engine [J]. Remote Sensing, 2019, 11(24): 3023.
- [35] LIANG S. Narrowband to broadband conversions of land surface albedo I: Algorithms [J]. Remote Sensing of Environment, 2001, 76(2): 213-238.
- [36] SOBRINO J A, RAISSOUNI N. Toward remote sensing methods for land cover dynamic monitoring: Application to Morocco [J]. International Journal of Remote Sensing, 2000, 21(2): 353-366.
- [37] SOBRINO J A, JIMENEZ-MUNOZ J C, SORIA G, et al. Land surface emissivity retrieval from different VNIR and TIR sensors [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46(2): 316-327.
- [38] 陈钟望,杨汉波,陈东. 叶尔羌绿洲近20年来地下水埋深变化及其原因分析[J]. 水力发电学报, 2016, 35(6): 58-66.
CHEN Zhongwang, YANG Hanbo, CHEN Dong. Analysis of groundwater table depth changes in Yarkant plain oasis in recent 20 years and their causes [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016, 35(6): 58-66.
- [39] 古力米日·买买提. 叶尔羌河主要灌区2003—2018年地下水埋深变化分析[J]. 地下水, 2022, 44(3): 59-60.
GULIMIRI Maimaiti. Analysis of groundwater table changes in the main irrigation area of the Yerqiang River from 2003 to 2018 [J]. Ground Water, 2022, 44(3): 59-60.
- [40] 雷志栋,李平,倪广恒,等. 叶尔羌河流域平原绿洲耗水研究[R]. 北京: 清华大学, 2006.
LEI Zhidong, LI Ping, NI Guangheng, et al. Research on Water Consumption in the Plain Oasis of the Yerqiang River Basin [R]. Beijing: Tsinghua University, 2006.
- [41] PANG X, LEI H, CONG Z, et al. Long term variation of evapotranspiration and water balance based on upscaling eddy covariance observations over the temperate semi-arid grassland of China [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2021, 308/309: 108566.
- [42] 林楠,姜然哲,刘强,等. 近20年三江平原地表蒸散发时空特征及驱动因素分析[J]. 中国地质, 2021, 48(5): 1392-1407.
LIN Nan, JIANG Ranzhe, LIU Qiang, et al. Spatiotemporal characteristics and driving factors of surface evapotranspiration in Sanjiang Plain in recent 20 years [J]. Geology in China, 2021, 48(5): 1392-1407.

(责任编辑 王海锋)