

**引用格式:** Zhao Tianwei, Zhu Wenbin, Pei Liang, *et al.* Remote Sensing Estimation of Terrestrial Evapotranspiration and Analysis of Its Temporal-spatial Distribution Characteristics over the Three-River Headwater Region[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2022, 37(1): 137-147. [赵天玮, 朱文彬, 裴亮, 等. 三江源蒸散发遥感估算及其时空分布特征研究[J]. 遥感技术与应用, 2022, 37(1): 137-147.]  
DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2022.1.0137

## 三江源蒸散发遥感估算及其时空分布特征研究

赵天玮<sup>1,2</sup>, 朱文彬<sup>2</sup>, 裴亮<sup>1</sup>, 宝康妮<sup>1,2</sup>

(1. 辽宁工程技术大学 测绘与地理科学学院, 辽宁 阜新 123000;

2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 陆地水循环及地表过程院重点实验室, 北京 100101)

**摘要:** 蒸散发是地表水热平衡的基本变量,也是衡量植被生长水分适应性的重要指标。针对三江源地面实测资料匮乏的现状,以MODIS系列产品为主要数据源,通过对地表温度—植被指数特征空间法的改进,在日尺度实现了该地区2011~2019年蒸散发的连续遥感估算,并进一步解析其时空变化特征与影响因子,揭示不同土地覆被类型的蒸散发差异,以期为三江源畜牧业可持续发展与生态环境保护提供支撑。对比分析表明:蒸散发的估算结果达到了现有遥感蒸散发产品的精度要求,可用于分析三江源地区蒸散发的时空变化特征。近9年,三江源蒸散发总体呈现先减少后增加趋势,多年平均值为420.04 mm;受海拔与降水控制,蒸散发空间分布异质性明显,从东南向西北逐渐减少;3 194~4 620 m海拔范围内,蒸散发随海拔高度增加呈单峰型变化,站点尺度年蒸散发与降水量之间的相关系数为0.71。虽然不同土地覆被分类系统下蒸散发的统计结果存在差异,但单位面积蒸散发具有林地>灌丛/灌木林>草地/草甸>裸土地/无植被区的明显特征,像元尺度多年平均蒸散发与植被覆盖度的相关系数高达0.77。

**关键词:** 蒸散发;时空分布;遥感估算;土地覆被;三江源

**中图分类号:** P426.2; TP79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2022)01-0137-11

### 1 引言

近几十年来,受全球气候变化影响,素有“中华水塔”之称的三江源地区,出现气温升高、降水增加等现象,暖湿化趋势明显<sup>[1-3]</sup>。三江源属于生态环境脆弱区,对气候变化较为敏感,在暖湿化背景下,该地区冰川退缩、冻土消融、水循环加剧、蒸散发显著增加,这对地区社会经济发展与生态环境保护产生重大影响<sup>[4-6]</sup>。因此,探析地表能量平衡与水循环过程,对三江源水资源可持续利用与生态环境保护具有重要意义。

陆面蒸散发(ET)是地球陆地表层通过土壤蒸

发与植物蒸腾作用消散至大气中的水汽总和,维系着地表水分、碳与能量循环三者之间的关系。在ET准确估算的基础上,开展其时空变化特征分析,对气象学、水文学和生态学等诸多领域都具有至关重要的作用<sup>[8-9]</sup>。然而,ET作为连接自然生态系统水分与能量交换的纽带,是一种复杂的陆气交互作用过程,受气象、水文和土地覆被等多因素影响,虽然可通过蒸渗仪、大孔径激光闪烁仪、涡动相关仪等进行直接测量,但这些站点尺度的观测结果空间代表性非常有限,难以准确反映区域尺度ET的时空分布格局<sup>[10-11]</sup>。

相比之下,遥感技术具有覆盖范围广、成本低、

收稿日期: 2021-10-27; 修订日期: 2021-12-27

基金项目: 国家自然科学基金面上项目“大尺度土壤含水量与陆面蒸散发耦合优化模拟研究”(42077032), 青海三江源生态保护和建设二期工程科研和推广项目(2018-S-3), 中国科学院青年创新促进会资助项目(2020056)。

作者简介: 赵天玮(1997—), 女, 辽宁营口人, 硕士研究生, 主要从事遥感影像信息识别与提取研究。E-mail: zhaotvv@163.com

通讯作者: 朱文彬(1987—), 男, 山东青岛人, 副研究员, 主要从事遥感水文与水资源管理研究。E-mail: zhuwb@igsrr.ac.cn

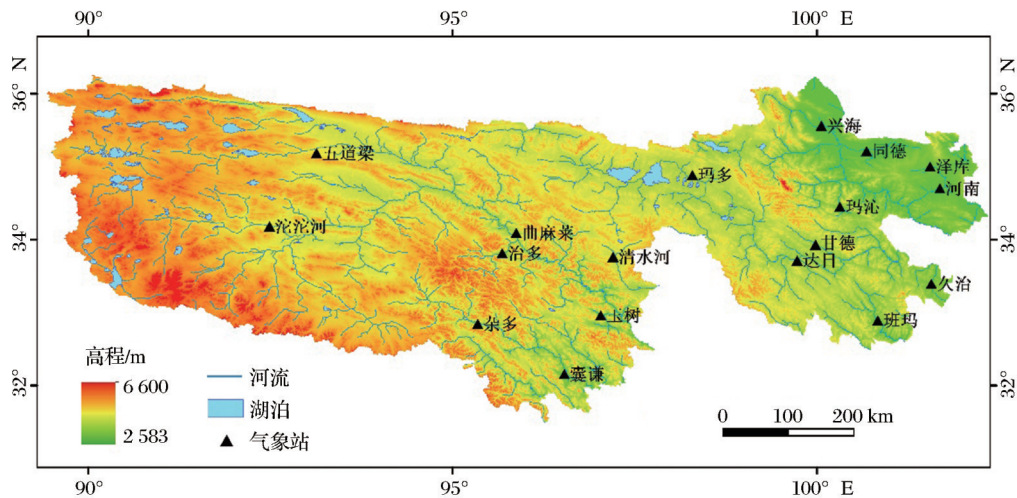
受地形影响弱等特点,因此成为当前获取区域尺度 ET 时空分布信息的主流方法。目前常见的遥感蒸散发模型有 Penman-Monteith 模型<sup>[12-13]</sup>、Priestley-Taylor 模型<sup>[14]</sup>、SEBAL 模型<sup>[15]</sup>、S-W 双层模型<sup>[16]</sup>、特征空间模型<sup>[17]</sup>等。虽然上述模型能够有效弥补地面观测方法空间代表性差的缺陷,在世界范围内得到了广泛应用,但大部分模型在实际应用中仍需要地面实测数据支撑,以实现蒸散发准确模拟,这严重限制了其在地面实测数据匮乏地区的应用。以研究区三江源地区为例,该地区地形复杂,自然环境恶劣,常规气象站点的观测密度严重低于全国平均水平。此外,大部分遥感蒸散发模型受云量干扰明显,通常仅适用于晴天条件下,蒸散发的时空连续模拟也存在较大挑战。相对来说,基于蒸发比(EF)的遥感蒸散发模型能够在很大程度上摆脱地面实测数据的限制,是实测数据匮乏条件下大尺度 ET 遥感估算的有效途径<sup>[18-19]</sup>。以地表温度-植被指数特征空间法为例,该方法仅需要地表温度与植被指数两个遥感参数,便可以实现蒸发比的遥感估算。虽然该方法在实测资料匮乏地区具有较好的应用前景,但仍存在时空连续性差、经验性强等缺陷。在此背景下,基于遥感数据构建了具有明确物

理基础的时空二维特征空间模型,逐像元进行蒸发比的遥感估算,进而通过全天气条件下地表净辐射的遥感估算,在日尺度实现了三江源地区陆面蒸散发连续遥感估算,并基于估算结果,分析了该地区 ET 的时空变化特征和主要影响因子。此外,考虑到三江源地区主要的土地覆被类型为草地和草甸,其蒸散发的时空变化格局直接影响着该地区畜牧业的可持续发展与生态环境保护。针对该区的生态现状及放牧需求作进一步研究,对不同土地覆被类型的蒸散发差异进行重点分析。

## 2 研究区与数据源

### 2.1 研究区概况

三江源地处青藏高原腹地、青海省南部,介于  $31^{\circ}33' \sim 36^{\circ}17' \text{ N}$ 、 $89^{\circ}25' \sim 102^{\circ}16' \text{ E}$  之间,总面积约  $35.7 \text{ 万 km}^2$ ,是黄河、长江、澜沧江的源头汇水区,也是我国重要的水源涵养生态功能区之一<sup>[1,20]</sup>。该地区地形复杂、山脉众多,整体呈西高东低之势,平均海拔  $4500 \text{ m}$  左右。区内气候为典型的高原大陆性气候,冷热两季交替,干湿两季分明,日照充足,辐射强烈,多年平均降水量约为  $400 \text{ mm}$ ,随海拔高度变化具有明显的空间差异性<sup>[5,21]</sup>。图 1 为三江源地理位置与海拔分布图。



审图号:GS(2016)2556号

图 1 三江源地理位置与海拔分布图

Fig.1 Geographical location and topography of the Three-River Headwater Region

### 2.2 数据源

#### 2.2.1 MODIS 数据

MODIS (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer) 是搭载在 TERRA 与 AQUA 卫星上的中分辨率成像光谱仪 (Moderate-resolution Imaging

Spectroradiometer), 共有 36 个光谱波段, 实现可见光到热红外的全光谱覆盖<sup>[22]</sup>。TERRA 与 AQUA 均为太阳同步极轨卫星, 研究采用的数据均来自 TERRA 卫星, 在日间地方时上午 10:30 过境。MODIS 目前共有 44 个数据产品, 表 1 列出了研究

涉及到的 7 种产品。其中,MOD03、MOD06\_L2、MOD07\_L2、MOD11A1 和 MCD43B3 用于地表净辐射的估算,MOD13A2 通过 3 次样条插值法获得日尺度归一化植被指数(NDVI),用于植被覆盖度的估算,MCD12Q1 用于分析不同土地覆被类型的蒸散发差异。

表 1 研究中涉及的 MODIS 产品

Table 1 MODIS products used in this study

MODIS 产品	分辨率	所用参数
MOD03	1 km	太阳天顶角
MOD06_L2	1 km	云量、云的光学厚度、云的发射率、云顶温度和地表温度
MOD07_L2	5 km	空气温度与露点温度
MOD11A1	1 km	地表温度与地表发射率
MOD13A2	1 km	归一化植被指数
MCD12Q1	500 m	土地覆被类型
MCD43B3	1 km	白空与黑空反照率

### 2.2.2 气象数据

三江源地区共有 18 个国家级气象站点,分别为五道梁、兴海、同德、泽库、沱沱河、治多、杂多、曲麻莱、玉树、玛多、清水河、玛沁、甘德、达日、河南、久治、囊谦和班玛(图 1)。研究获取了 2011~2019 年日尺度气象数据,包括降水、空气温度、相对湿度和风速,数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn>)。除此之外,为了分析区域尺度降水对蒸散发的影响,还采用了国家青藏高原科学数据中心发布的全国高分辨率降水数据<sup>[23]</sup>,空间分辨率为  $0.1^\circ$ ,时间跨度为 1979~2018 年,在文中简称为降水栅格数据。

### 2.2.3 土地利用/覆被数据

为降低不同土地利用/覆被数据对结果分析带来的不确定性,本研究选用 3 种土地利用/覆被数据,用于分析不同土地覆被类型的蒸散发差异,分别为中国 1:100 万植被类型空间分布数据、2015 年中国土地利用现状遥感监测数据与 2011~2019 年 MCD12Q1 遥感数据,上述数据分别来源于植物科学数据中心(<https://www.plantplus.cn>)、中国科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn>)及 MODIS 官网。

### 2.2.4 GLEAM 数据集

本研究 ET 遥感估算的精度是通过与其他蒸散发产品对比分析来进行说明的。虽然目前遥感蒸散发产品种类较多,但考虑到数据集实时更新情况及其覆盖范围,最终选用 GLEAM(The Global

Land Evaporation Amsterdam Model)数据集<sup>[24-25]</sup>作为对比对象。GLEAM 数据集采用 Priestley-Taylor 模型对全球陆面蒸散发进行估算,诸多研究表明,该数据集在中国具有较高精度<sup>[26-27]</sup>。研究选用的 GLEAM 数据的空间分辨率为  $0.25^\circ$ ,时间分辨率为月尺度,时间跨度为 2011~2019 年(<https://www.gleam.eu/>)。

## 3 研究方法

采用地表温度—植被指数( $T_s$ -VI)特征空间法来估算 ET。该方法的基本假设是,在均一大气条件下,若研究区内存在足够多可以充分反映地表土壤湿度与植被覆盖度变化情况的像元,则由  $T_s$  和 VI 构成的散点图将形成具有物理意义的三角形或梯形边界,上下边界分别代表蒸散发的最小值(干边)和最大值(湿边)。在干湿边界的约束下,通过线性插值的方法,可以求得任意像元的蒸发比(EF),进而结合地表净辐射( $R_n$ )估算结果,实现 ET 的遥感估算。可以看出,特征空间法应用的基本前提是均一的大气条件。因此,严格来讲,该方法仅适用于特定的空间尺度,难以直接应用于三江源此类地形复杂、大气条件异质性强的地区。基于此,本研究提出时空二维地表温度—植被指数特征空间法,即基于地表能量平衡原理,逐像元构建特征空间的干湿边界,从而实现三江源地区 ET 的遥感估算。针对 MODIS 遥感数据受云量影响、时空连续性差问题,本研究首先基于时空二维特征空间法进行晴天条件下蒸发比的估算,随后对其插值获得相邻有云天的数据,最终得到逐日时空连续分布结果。晴天与有云条件下净辐射的遥感估算则参考 Bisht 等<sup>[28-29]</sup>的方法实现,青海省  $R_n$  遥感估算结果及具体参数化方案详见余晓雨等的研究<sup>[30]</sup>。

根据 Zhu 等<sup>[31]</sup>提出的时空二维地表温度—植被指数特征空间法,干湿边界代表的是裸土在极端水分胁迫和充足水分供给条件下所能达到的理论地表温度,分别用  $T_{smax}$  和  $T_w$  表示。基于地表能量平衡原理,像元尺度  $T_{smax}$  的求解参考 Zhu 等<sup>[31-33]</sup>的研究,公式如下:

$$T_{smax} = \frac{(1 - \alpha_s)S_d + \varepsilon_{ss}\varepsilon_a\sigma T_{asd}^4 - \varepsilon_{ss}\sigma T_{asd}^4}{4\varepsilon_{ss}\sigma T_{asd}^3 + \rho c_p \left[ r_{as}(1 - c_s) \right]} + T_{asd} \quad (1)$$

其中:下角标“s”和“d”分别表示这些参数适用于纯裸土和极端水分胁迫条件下; $\sigma$ 为斯蒂芬—玻尔兹曼常数; $\varepsilon_{ss}$ 为裸土地表发射率,取值  $0.95^{[34]}$ ; $\rho$ 为空气



气密度;  $c_p$  为空气比热容;  $c_s$  为土壤热通量(G)与地表净辐射的常数比, 取值 0.315<sup>[35]</sup>;  $S_d$  和  $\varepsilon_a$  分别表示下行短波辐射和空气发射率, 可通过 Bisht 和 Bras<sup>[29]</sup> 的方法求得;  $r_{as}$  是裸土空气动力学阻抗, 可通过风速求得<sup>[36]</sup>;  $T_{asd}$  是极端水分胁迫条件下裸土的空气温度, 可通过 Szilagyi 等<sup>[37]</sup> 的方法由湿球温度( $T_{wb}$ )和露点温度( $T_d$ )求得。

不同文献中  $T_w$  的求解存在差异<sup>[19,38-39]</sup>。研究从像元尺度数据可获取性角度出发, 参考 Szilagyi<sup>[40]</sup> 的研究, 由  $T_{wb}$  进行代替, 求解公式如下:

$$T_w = T_{wb} \approx \frac{\gamma T_a + T_d \Delta(T_d)}{\gamma + \Delta(T_d)} \quad (2)$$

其中:  $\gamma$  为湿度计常数, 一般取值 0.0664 kPa°C<sup>-1</sup>;  $T_a$  为近地表空气温度, 根据 Zhu 等<sup>[41]</sup> 的方法求得;  $\Delta(T_d)$  为饱和水汽压随  $T_d$  变化曲线的斜率。

根据 Zhu 等<sup>[42]</sup> 的研究, 在  $T_{smax}$  和  $T_w$  的边界约束下, 每个像元卫星过境时刻的瞬时蒸发比可由其对应的地表温度  $T_s$  和植被覆盖度  $f_c$  求得, 公式如下:

$$EF = 1.26 \left[ a(1 - f_c) + f_c \right] \frac{\Delta(T_a)}{\Delta(T_a) + \gamma} \quad (3)$$

$$a = 1 - \exp \left( \frac{T_s + f_c T_{smax} - T_{smax} - f_c T_a}{T_{smax} + f_c T_w - f_c T_{smax} - T_w} \right) \quad (4)$$

其中:  $\Delta(T_a)$  为饱和水汽压随  $T_a$  变化曲线的斜率,  $f_c$  根据 Gillies 等<sup>[43]</sup> 的研究由 NDVI 求得, 公式如下:

$$f_c = \left( \frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \right)^2 \quad (5)$$

其中:  $NDVI_{max}$  与  $NDVI_{min}$  分别表示纯植被覆盖和纯裸土条件下的 NDVI 值, 参考 Zhu 等<sup>[44]</sup> 的研究, 分别取值 0.86 和 0.05。

上述方法求得的  $R_n$  与 EF 均为卫星过境时刻瞬时结果。在此基础上, 本研究根据蒸发比日尺度不变假设, 用瞬时 EF 来代替日尺度 EF<sup>[45-46]</sup>。日尺度净辐射( $R_{n,daily}$ )的估算, 则根据 Rivas 等<sup>[47]</sup> 的方法由  $R_n$  瞬时估算值转化求得, 公式如下:

$$R_{n,daily} = 0.43 R_n - 54 \quad (6)$$

最终, 根据 EF 定义, 基于下述公式, 求得日尺度蒸散发:

$$ET = R_{n,daily} \cdot EF \quad (7)$$

## 4 结果分析

### 4.1 精度评价

为保证 ET 估算结果的合理性, 首先进行精度评价。由于该地区缺乏陆面蒸散发实测数据, 研究以 GLEAM 数据集<sup>[24-25]</sup> 作为参考进行对比说明。此

外, 甘海洪<sup>[48]</sup> 最近也以 MODIS 产品为主要数据源开展了三江源地区逐日 ET 的模拟估算, 并公开发布了研究区整体的逐月统计数据, 所不同的是甘海洪采用的是表面通量平衡系统(SEBS)模型。该估算结果通过与气象站蒸发皿实测数据对比, 两者的相关系数为 0.79, 具有较高精度。基于此, 分别在月、年两个时间尺度上开展研究区 ET 估算结果的对比分析。图 2(a) 是 3 组数据在年尺度上的对比结果, 可以看出, 与本研究估算结果相比, GLEAM 数据集的蒸散发整体偏小, 年变化幅度较为平缓; 相比之下, 甘海洪的估算结果总体偏大, 且年际波动较大, 3 组数据差异明显。为进一步分析 3 组 ET 估算结果的细节差异, 在月尺度进行对比, 结果详见图 2(b) 与图 2(c)。可以看出, 估算结果与两组数据均呈现高度正相关性, 相关系数分别为 0.99 和 0.96, 差异较小。从平均绝对误差(MAE)来看, 本研究估算结果与甘海洪的估算结果更为接近; 从均方根误差(RMSE)来看, 估算结果与 GLEAM 数据集更为接近。上述对比分析表明, 虽然本研究估算结果与这两套数据存在差异, 但在月尺度上表现出较好的相关性, 且年尺度变化介于两者之间。这说明本研究估算结果达到了现有遥感蒸散发产品的精度要求, 可用于分析三江源地区 ET 的时空变化特征。

### 4.2 蒸散发时空分布特征及影响因子分析

#### 4.2.1 蒸散发时空分布特征

2011~2019 年期间, 三江源地区 ET 时间变化情况如图 3 所示。从年际变化来看, 年蒸散发变化范围在 392.63~461.07 mm 之间, 多年平均值为 420.04 mm, 最大值和最小值分别出现在 2012 年和 2016 年; 从变化趋势上看, ET 在 2011~2019 年间整体呈现先减少后增加趋势, 标准差为 20.39 mm。2012~2016 年间 ET 逐年递减, 年均减少 17.11 mm; 2016~2018 年间 ET 逐年增加, 年均增加 17.88 mm。对比图 3(a) 中的降水栅格数据可以看出, ET 的年际波动基本受控于降水变化, 尤其是最大值出现的年份完全吻合; 相比之下, ET 最小值出现的年份比降水晚了一年, 这说明降水对 ET 的影响不仅体现在当年, 还可能具有一定的延迟效应。从年内变化来看(图 3(b)), 不同年份的 ET 变化趋势基本一致, 均呈单峰型分布, 蒸散发主要集中在 4~9 月, 约占全年蒸散发的 88%。其中, 除 2015 年的峰值在 6 月外, 其余年份的峰值均在 7 月; 各年份谷值均在 12 月。按照气象部门的气象划分法, 以阳历 3~5 月为

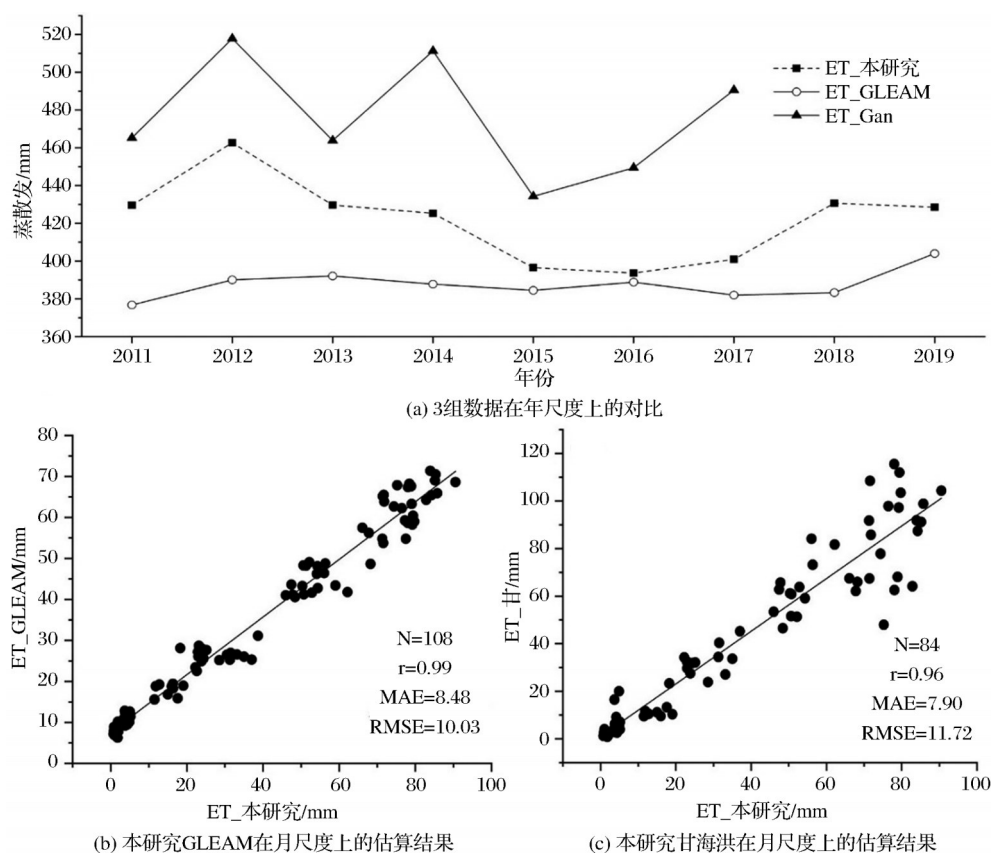
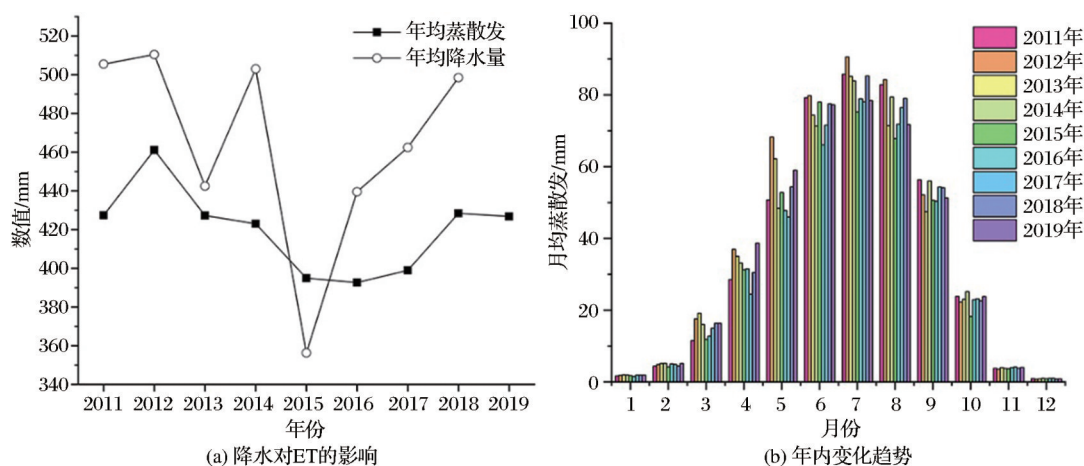
图2 本研究蒸散发估算结果与 GLEAM、甘海洪(ET\_甘)估算结果的对比分析图<sup>[48]</sup>Fig.2 Comparison of our evapotranspiration estimates with GLEAM and Gan<sup>[48]</sup>

图3 三江源地区蒸散发时间变化趋势图

Fig.3 Temporal variations of evapotranspiration in the Three-River Headwater Region

春季,6~8月为夏季,9~11月为秋季,12~2月为冬季。按此划分方式,春夏秋冬四季年际变化的标准差分别为12.19 mm、11.75 mm、3.89 mm和0.45 mm。由此判断,2011~2019年三江源地区冬季ET年际变化最小,秋季次之,春季与夏季波动较大。

图4是三江源地区2011~2019年多年平均ET空间分布图,为消除水体影响,基于MCD12Q1逐年产品对湖泊进行了剔除,可以看出三江源ET具有

明显的空间异质性,由东南到西北呈逐渐减少的趋势。ET的高值主要位于中南部、东南边缘低海拔地带,低值大多出现在西北边缘地带,这说明陆面蒸散发与其地形特征相关。为便于分析四季ET的空间变化,选取四季代表月份进行说明,分别为1、4、7、10月。结果表明,ET空间分布的异质性具有明显的季节差异。其中,由于研究区位于青藏高原腹地,冬季(1月)气温较低,水循环缓慢,ET均值

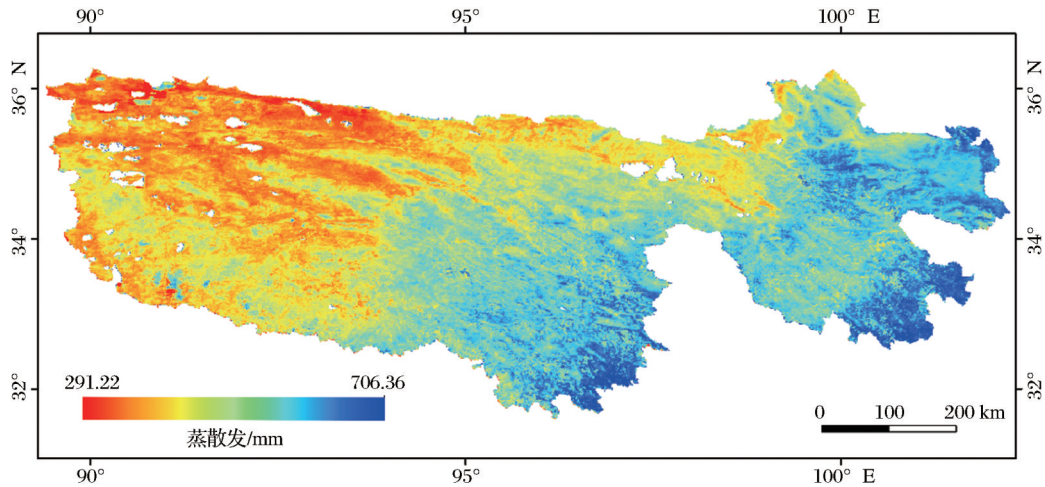


图 4 三江源地区多年平均蒸散发空间分布图

审图号:GS(2016)2556

Fig.4 Spatial distribution of annual average evapotranspiration in the Three-River Headwater Region

最小(1.66 mm),空间变异性也最小,标准差仅为 0.77 mm;夏季(7月)ET 均值最大(81.90 mm),与其他季节相比,东南地区明显高于其他地区,标准差为 9.02 mm;春季(4月)与秋季(10月)的 ET 均值分别为 31.74 mm 和 22.30 mm,且春季 ET 的空间变化幅度明显高于秋季,两者的标准差分别为 6.67 mm 和 5.37 mm。

#### 4.2.2 蒸散发影响因子分析

通过研究蒸散发、降水量、海拔高度三者之间的相互关系,进行三江源地区 ET 的影响因子分析。鉴于该地区气象站点的海拔高度介于 3194~4620 m 之间,将该范围以 200 m 为间隔划分为 7 个高度带,分别命名为 Z1(3 194~3 400 m)、Z2(3 400~3 600 m)、Z3(3 600~3 800 m)、Z4(3 800~4 000 m)、Z5(4 000~

4 200 m)、Z6(4 200~4 400 m)、Z7(4 400~4 620 m),并逐一统计各高度带多年平均 ET 与多年平均降水量(图 5)。图中折线为 18 个气象站点提取到的站点尺度陆面蒸散发与降水量数据,可以看出,这两组数据虽然在趋势上并非完全一致,但具有较高的相关性,相关系数为 0.71。其中,降水量在 Z1、Z2 高度带的波动较大,与 ET 平缓的走势截然不同;在 Z3~Z7 之间,两组数据走势大体一致,同时随着海拔高度的增加呈弱减趋势。蒸散发与降水量前期差异较大有两方面原因,一是研究区气象站点空间分布不均,从图 1 中可以看出,站点大多集中在海拔较低的东部与中部,而西部高海拔区较少,仅有两个,因此提取结果受地形影响显著;二是站点数目仅为 18 个,不足以充分反映研究区整体的海拔分

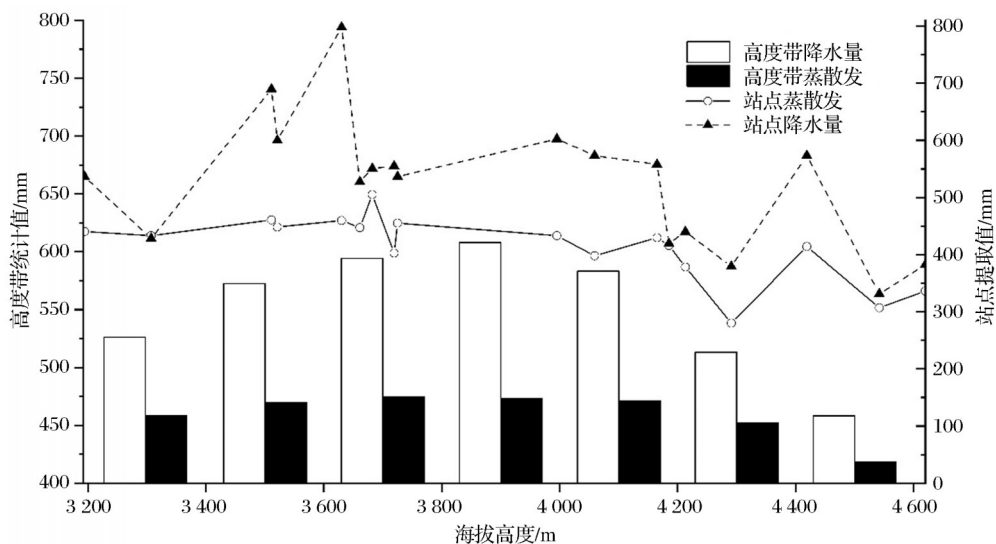


图 5 海拔高度—蒸散发—降水量关系图

Fig.5 Evapotranspiration variations with precipitation and altitude



布。与站点提取结果相比,图 5 中各高度带多像元统计的降水栅格数据、ET 与海拔高度之间的关系更具代表性,且规律性明显。两者随海拔高度的增加均呈现先增加后减少的趋势;降水峰值位于 Z4 高度带,为 607.99 mm;而 ET 峰值位于 Z3 高度带,为 474.72 mm。Z1~Z6 各高度带之间 ET 差异较小,相比之下,Z7 高度带 ET 较低,为 418.22 mm,与 Z3 高度带 ET 的差值高达 56.50 mm;Z1~Z3 区间 ET 增加较慢,各高度带平均约增长 8.14 mm,而 Z3~Z7 区间下降较快,各高度带平均约下降 14.13 mm,尤其是 Z5~Z7 区间,各高度带约下降 26.57 mm。

#### 4.3 不同土地覆被类型的蒸散发差异研究

从土地覆被角度来看,陆面蒸散发受植被类型与植被覆盖度两方面影响。受海拔高度、降水等多要素控制,三江源植被覆盖度总体呈西北低、东南高趋势,这与 ET 的空间分布具有很好的一致性。为分析两者之间的关系,提取三江源地区所有像元,共得到 241 013 个样本点,如图 6 所示。可以看出,在多年平均时间尺度上两者呈高度正相关性,相关系数为 0.78。图 6 中样本点的 ET 值大多集中在 200~600 mm 之间,存在部分异常值,这是因为,本研究侧重于陆面蒸散发的遥感估算,湖泊周边地区存在误差;此外,陆面蒸散发本身的估算结果也存在一定的不确定性。

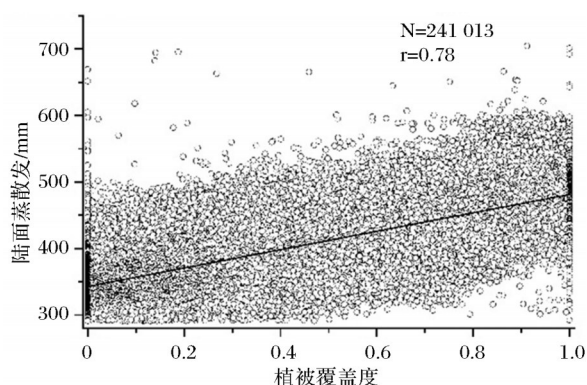


图 6 植被覆盖度与陆面蒸散发之间的关系图

Fig.6 Relationship between vegetation coverage and terrestrial evapotranspiration

研究区内地形复杂,土地覆被类型多样,水平地带性与垂直地带性分布规律较为明显。为进一步分析不同土地覆被类型的 ET 差异,本研究采用 3 种土地覆被分类系统对区内土地覆被类型进行划分,并对其单位面积年均 ET 及其总量进行统计。图 7 为 3 种土地覆被分类系统下年均 ET 统计结果的箱型图,在剔除异常值后,按各自类型的均值由

小到大排序。可以看出,虽然 3 种类型图的分类系统存在差异,但仍可大致分为裸土地/无植被区、草地/草甸、灌丛/灌木林和林地 4 大类,单位面积年均 ET 大小排序为林地>灌丛/灌木林>草地/草甸>裸土地/无植被区,这也与植被特性(一般木本植物的耗水量高于草本植物)相符。各类型图中最小年均 ET 均在 360 mm 左右,差异较小,主要为裸土地/无植被区;各类型图最大年均 ET 均为林地,但图 7(a)比图 7(b)和图 7(c)高 60 mm 左右,图 7(b)和图 7(c)差距较小。

造成同种土地覆被类型不同分类系统下 ET 统计结果存在差异的原因有以下两个方面。一是土地覆被分类系统本身的不确定性造成的统计误差,譬如对比分析表明区内同一位置,在不同分类系统下的土地覆被类型会存在显著差异;二是土地覆被类型像元数目的大小也影响统计结果,图 7 中的 ET 为多像元统计结果,这在一定程度上降低了 ET 估算结果的不确定性,因此对于草地/草甸、裸土地/无植被区这类分布面积较广的土地覆被类型而言,不同分类系统下的 ET 差异较小,而对灌丛/灌木林和林地此类分布较少的类型,不同分类系统下的统计结果差异相对明显。3 种类型图中面积最大的类型分别为草地、高寒草甸和低覆盖度草地,单位面积年均 ET 分别为 423.36、426.39 和 415.48 mm,平均值为 421.74 mm,这也与研究区多年平均蒸散发 420.04 mm 相差无几。

就蒸散发总量而言,三江源地区以草地/草甸为主,虽然因分类系统的不同有些许差异,但其占地面积总体最大。图 7(a)中以草地类型为主,其总面积为 31.00 万  $\text{km}^2$ ,占比 87.93%,年均 ET 总量高达 1 312.55 亿  $\text{m}^3$ ;图 7(b)中,高寒草原和高寒草地总面积分别为 7.77 万  $\text{km}^2$  和 20.30 万  $\text{km}^2$ ,两者总体占比 79.99%,年均 ET 总量 1 130.98 亿  $\text{m}^3$ ;图 7(c)中,草地细分为高覆盖度草地、中覆盖度草地和低覆盖度草地 3 个亚类,其面积分别为 1.80 万  $\text{km}^2$ 、8.70 万  $\text{km}^2$  和 13.54 万  $\text{km}^2$ ,其中以中、低覆盖度草地为主,整体占比 65.64%,年均 ET 总量 943.47 亿  $\text{m}^3$ 。林地为单位面积 ET 最高的覆被类型,对应至图 7 中分别为林地(图 7(a))、高山林地(图 7(b))、有林地和疏林地(图 7(c))。但因其占地面积较小,因此蒸散发总量偏低,3 种类型图的林地面积占比分别为 0.004%、1.10% 和 0.93%,年均 ET 总量分别为 0.08 亿  $\text{m}^3$ 、18.88 亿  $\text{m}^3$  和 15.60 亿  $\text{m}^3$ 。

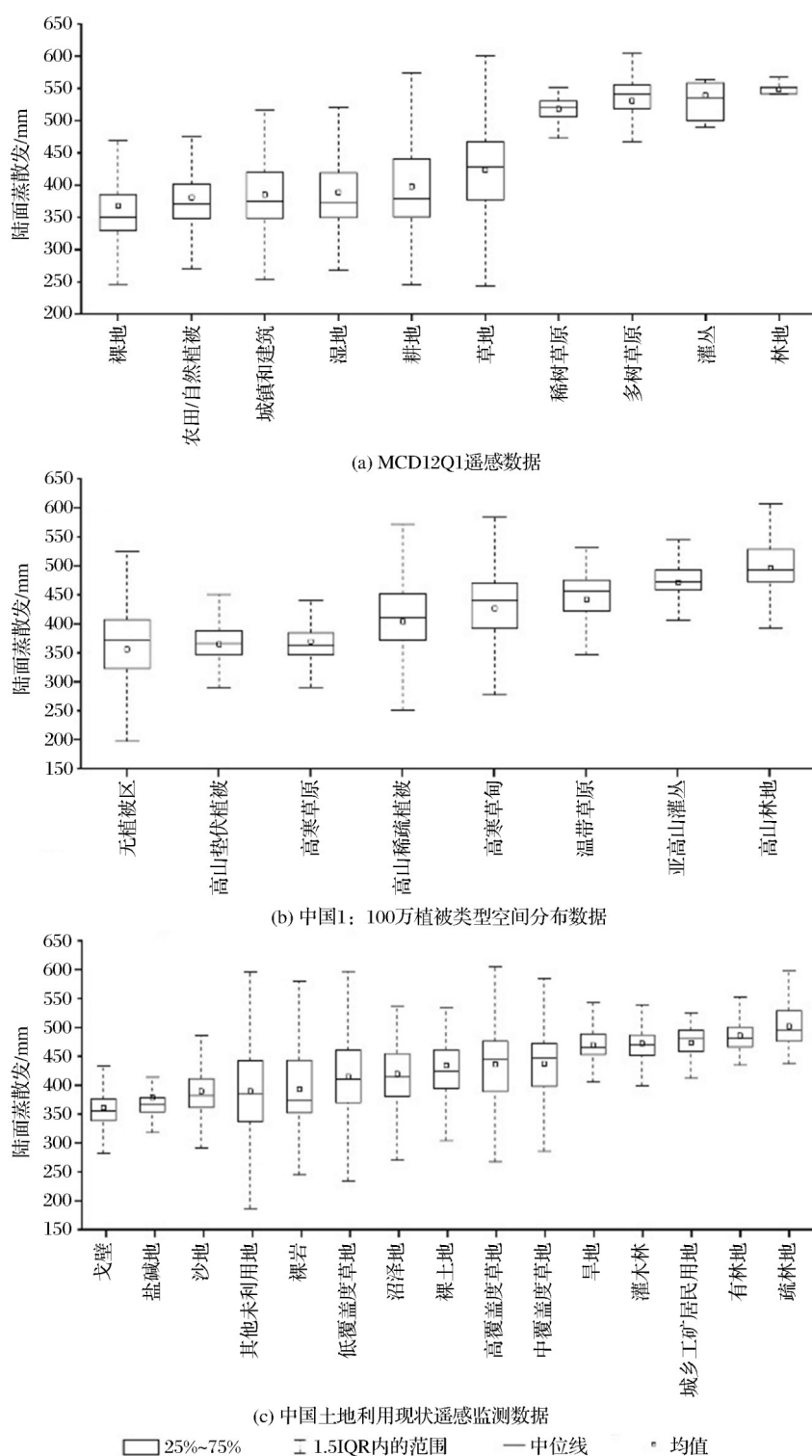


图7 三江源不同土地覆被类型单位面积年均蒸散发箱形图

Fig.7 Boxplots of annual average evapotranspiration per unit area within different land cover classification systems in the Three-River Headwater Region

## 5 结 论

实验基于地表温度—植被指数特征空间法,利用MODIS产品对三江源地区日尺度蒸散发进行估算,进而对其时空变化特征及影响因子进行分析,

得出以下结论:

(1)2011~2019年期间,三江源ET总体呈先减少后增加趋势,ET峰值和谷值分别出现在2012年(461.27 mm)和2016年(392.63 mm),9年平均值为420.04 mm。年内季节变化呈单峰型分布,ET主要



集中在4~9月,约占全年总ET的88%。

(2)受降水与海拔影响,研究区ET空间分布具有明显的异质性,总体由东南到西北呈逐渐减少趋势。上述空间异质性具有明显的季节差异,从代表月份ET空间分布的标准差来看,从冬季、秋季、春季、夏季,空间差异性逐步增强。

(3)三江源ET分布垂直地带性明显,在海拔高度3 194~4 620 m之间呈单峰型分布,峰值出现在3 800~4 000 m高度带;站点尺度年蒸散发与降水量之间的相关系数为0.71,两者随海拔高度前期差异较大,后期走势大体一致。

(4)不同土地覆被的ET受植被覆盖度与植被类型双方面控制,区内年均ET与植被覆盖度的相关系数为0.77;单位面积年均ET按大小排序为林地>灌丛/灌木林>草地/草甸>裸土地/无植被区;三江源土地覆被类型以草地为主,年均ET总量最大,而林地因占地较小,ET总量偏低。

#### 参考文献(References):

- [1] Liu Xiaoqiong, Wu Zezhou, Liu Yansui, *et al.* Spatial-temporal characteristics of precipitation from 1960 to 2015 in the Three Rivers' Headstream Region, Qinghai, China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(9): 1803-1820.[刘晓琼, 吴泽洲, 刘彦随, 等. 1960~2015年青海三江源地区降水时空特征[J]. *地理学报*, 2019, 74(9): 1803-1820.]
- [2] Meng Xianhong, Chen Hao, Li Zhaoguo, *et al.* Review of climate change and its environmental influence on the Three-River Regions[J]. *Plateau Meteorology*, 2020, 39(6): 1133-1143. [孟宪红, 陈昊, 李照国, 等. 三江源区气候变化及其环境影响研究综述[J]. *高原气象*, 2020, 39(6): 1133-1143.]
- [3] Jin Yanli, Xu Maolin, Gao Shuai, *et al.* Analysis on the dynamic changes and driving forces of surface water in the Three-River Headwater Region from 2001 to 2018[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2021, 36(5): 1147-1154.[金岩丽, 徐茂林, 高帅, 等. 2001~2018年三江源地表水动态变化及驱动力分析[J]. *遥感技术与应用*, 2021, 36(5): 1147-1154.]
- [4] Zheng Zimei, Lü Meixia, Ma Zhuguo. Climate, hydrology, and vegetation coverage changes in source region of Yellow-River and countermeasures for challenges[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2020, 35(1): 61-72.[郑子彦, 吕美霞, 马柱国. 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*, 2020, 35(1): 61-72.]
- [5] Bai Xiaolan, Wei Jiahua, Xie Hongwei. Characteristics of wetness/dryness variation and their influences in the Three-River Headwaters Region[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(24): 8397-8410.[白晓兰, 魏加华, 解宏伟. 三江源区干湿变化特征及其影响[J]. *生态学报*, 2017, 37(24): 8397-8410.]
- [6] Jung M, Reichstein M, Ciais P, *et al.* Recent decline in the global land evapotranspiration trend due to limited moisture supply[J]. *Nature*, 2010, 467(7318): 951-954.
- [7] Xiong Y J, Zhao S H, Tian F. An evapotranspiration product for arid regions based on the Three-Temperature model and thermal remote sensing[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 530: 392-404.
- [8] Adam J P, Joshua B F, Michael L G, *et al.* SMAP soil moisture improves global evapotranspiration[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 219: 1-14. DOI: 10.1016/j.rse. 2018. 09.023.
- [9] Deng Xingyao, Liu Yang, Liu Zhihui, *et al.* Temporal-spatial dynamic change characteristics of evapotranspiration in arid region of Northwest China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(9): 2994-3008.[邓兴耀, 刘洋, 刘志辉, 等. 中国西北干旱区蒸散发时空动态特征[J]. *生态学报*, 2017, 37(9): 2994-3008.]
- [10] Zhao Wei, Huang Pan, Li Ainong. A review of evapotranspiration estimation using remotely sensed data in mountainous region[J]. *Journal of Mountain Science*, 2017, 35(6): 908-918.[赵伟, 黄盼, 李爱农. 山地地表蒸散发遥感估算研究现状[J]. *山地学报*, 2017, 35(6): 908-918.]
- [11] Li Xiaoyuan, Yu Deyong. Progress on evapotranspiration estimation methods and driving forces in arid and semiarid regions[J]. *Arid Zone Research*, 2020, 37(1): 26-36.[李晓媛, 于德永. 蒸散发估算方法及其驱动力研究进展[J]. *干旱区研究*, 2020, 37(1): 26-36.]
- [12] Mu Q, Zhao M, Running S W. MODIS Global Terrestrial Evapotranspiration (ET) Product (NASA MOD16A2/A3) Collection 5[DB]. NASA Headquarters. 2013.
- [13] Hu Chen, Ge Jiwen, Xu Xingnan, *et al.* Estimation of evapotranspiration and crop coefficient in Dajihupeatland of Shennongjia based on FAO56 Penman-JMonteith[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(5): 1699-1706.[胡晨, 葛继稳, 许向南, 等. 基于FAO56 Penman-Moneith公式估算神农架大九湖泥炭湿地蒸散发农作物系数[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(5): 1699-1706.]
- [14] Adam J P, Joshua B F, Michael L G, *et al.* SMAP soil moisture improves global evapotranspiration[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 219: 1-14.
- [15] Li Xiaolaing, Yang Lixiao, Xu Xuefeng, *et al.* Analysis of evapotranspiration pattern by SEBAL model during the growing season in the agro-pastoral ecotone in Northwest China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(7): 2175-2185.[李旭亮, 杨礼箫, 胥雪峰, 等. 基于SEBAL模型的西北农牧交错带生长季蒸散发估算及变化特征分析[J]. *生态学报*, 2020, 40(7): 2175-2185.]
- [16] Bao Yongzhi, Liu Yanxi, Duan Limin, *et al.* Simulation of evapo-transpiration for the mobile and semimobile dunes in the Horqin Sandy Land using the Shuttleworth-Wallace model[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(3): 867-876.[包永志, 刘廷玺, 段利民, 等. 基于Shuttleworth-Wallace模型的科尔沁沙地流动半流动沙丘蒸散发模拟[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(3): 867-876.]
- [17] Sanjay S N C, Nandagiri L. A Penman-Monteith evapotranspiration model with bulk surface conductance derived from remotely sensed spatial contextual information[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2019, 41(4): 1-26.
- [18] Zhang Baozhong, Xu Di, Liu Yu, *et al.* Review of multi-scale evapo-transpiration estimation and spatio-temporal scale

- expansion[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(6):8-16.[张宝忠, 许迪, 刘钰, 等. 多尺度蒸散发估测与时空尺度拓展方法研究进展[J]. 农业工程学报, 2015, 31(6):8-16.]
- [19] Tang Ronglin, Wang Shengli, Jiang Yazhen, *et al.* A review of retrieval of land surface evapotranspiration based on remotely sensed surface temperature versus vegetation index triangular/trapezoidal characteristic space[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2021, 25(1):65-82.[唐荣林, 王晟力, 姜亚珍, 等. 基于地表温度——植被指数三角/梯形特征空间的地表蒸散发遥感反演综述[J]. 遥感学报, 2021, 25(1):65-82.]
- [20] Wei Jing, Guo Yamin, Sun Lin, *et al.* Evaluation of ecological environment vulnerability for Sanjiangyuan area[J]. Chinese Journal of Ecology, 2015, 34(7):1968-1975.[韦晶, 郭亚敏, 孙林, 等. 三江源地区生态环境脆弱性评价[J]. 生态学杂志, 2015, 34(7):1968-1975.]
- [21] Zhang Jiping, Liu Chunlan, Hao Haiguang, *et al.* Spatial-temporal change of carbon storage and carbon sink of grassland ecosystem in the Three-River Headwaters Region based on MODIS GPP/NPP Data[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2015, 24(1):8-13.[张继平, 刘春兰, 郝海广, 等. 基于MODIS GPP/NPP数据的三江源地区草地生态系统碳储量及碳汇量时空变化研究[J]. 生态环境学报, 2015, 24(1):8-13.]
- [22] Liu Chuang, Ge Chenghui. Features and applications of remote sensing data from the Moderate Resolution Imaging Spectro-radiometer (MODIS) in the American Earth Observation System (EOS) [J]. Remote Sensing Information, 2000, 15(3):45-48.[刘闯, 葛成辉. 美国对地观测系统(EOS)中分辨率成像光谱仪(MODIS)遥感数据的特点与应用[J]. 遥感信息, 2000, 15(3):45-48.]
- [23] Yang K, He J. China meteorological forcing dataset (1979-2018). National Tibetan Plateau Data Center [DB/OL]. 2019. DOI: 10.11888/AtmosphericPhysics.tpe.249369.
- [24] Martens B, Miralles D G, Lievens H, *et al.* GLEAM v3: Satellite-based land evaporation and root-zone soil moisture[J]. Geoscientific Model Development, 2017, 10(5):1903-1925.
- [25] Miralles D G, Holmes T, De J, *et al.* Global land-surface evaporation estimated from satellite-based observations [J]. Hydrology and Earth System Sciences Discussions, 2010, 7(5):453-469.
- [26] Yang Xiuqin, Wang Guojie, Pan Xin, *et al.* Spatio-temporal variability of terrestrial evapotranspiration in China from 1980 to 2011 based on GLEAM data[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(21):132-141.[杨秀芹, 王国杰, 潘欣, 等. 基于GLEAM遥感模型的中国1980~2011年地表蒸散发时空变化[J]. 农业工程学报, 2015, 31(21):132-141.]
- [27] Li Jia, Xin Xiaozhou, Peng Zhiqing, *et al.* Remote sensing products of terrestrial evapotranspiration: comparison and outlook [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2021, 36(1):103-120.[李佳, 辛晓洲, 彭志晴, 等. 地表蒸散发遥感产品比较与分析[J]. 遥感技术与应用, 2021, 36(1):103-120.]
- [28] Bisht G, Venturini V, Islam S, *et al.* Estimation of the net radiation using MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectro-radiometer) data for clear sky days[J]. Remote Sensing of Environment, 2005, 97(1):52-67. DOI: 10.1016/j.rse. 2005. 03.014.
- [29] Bisht G, Bras R L. Estimation of net radiation from the MODIS data under all sky conditions: Southern Great Plains case study[J]. Remote Sensing of Environment, 2010, 114(7):1522-1534. DOI: 10.1016/j.rse.2010.02.007.
- [30] Yu Xiaoyu, Jia Shaofeng, Zhu Wenbin. Estimation of land surface net radiation flux based on remote sensing and analysis of its spatial-temporal characteristics in Qinghai Province[J]. Plateau Meteorology, 2022, 41(8):1-13.[余晓雨, 贾绍凤, 朱文彬. 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, 2022, 41(8):1-13.]
- [31] Zhu W, Jia S, Lü A. A universal Ts-VI triangle method for the continuous retrieval of evaporative fraction from MODIS products[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2017, 122(19):10206-10227.
- [32] Sun Liang, Sun Rui, Li Xiaowen, *et al.* Monitoring surface soil moisture status based on remotely sensed surface temperature and vegetation index information[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2012, 166-167, 175-187.
- [33] Long D, Singh V. A Two-source Trapezoid Model for Evapotranspiration (TTME) from satellite imagery[J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 121:370-388. DOI: 10.1016/j.rse.2012.02.015.
- [34] Zhang R, Tian J, Su H, *et al.* Two improvements of an operational Two-Layer Model for terrestrial surface heat flux Retrieval[J]. Sensors, 2008, 8(10):6165-6187. DOI: 10.3390/s8106165.
- [35] Kustas W P. Estimation of the soil heat flux/net radiation ratio from spectral data[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1990, 49(3):205-223.
- [36] Brutsaert W. Evaporation into the atmosphere, theory, history, and applications[M]. The Netherlands: D Reidel, Dordrecht, 1982.
- [37] Szilagyi J, Crago R, Qualls R. A calibration-free formulation of the complementary relationship of evaporation for continental-scale hydrology[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2017, 122(1):264-278.
- [38] Zare M, Drastig K, Zude-Sasse M. Tree water status in apple orchards measured by means of Land Surface Temperature and Vegetation Index (LST-NDVI) trapezoidal space derived from landsat 8 satellite images[J]. Sustainability, 2019, 2(1):70. DOI:10.3390/su12010070.
- [39] Hu X, Shi L, Lin L, *et al.* Nonlinear boundaries of Land Surface Temperature-Vegetation Index space to estimate water deficit index and evaporation fraction[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2019, 279:107736. DOI:10.1016/j.agrformet. 2019.107736.
- [40] Szilagyi J. Temperature corrections in the Priestley - Taylor equation of evaporation[J]. Journal of Hydrology, 2014, 519:455-464.
- [41] Zhu W, Lv A, Jia S, *et al.* Retrievals of all-weather daytime air temperature from MODIS products[J]. Remote Sensing of Environment, 2017, 189:152-163. DOI: 10.1016/j.rse. 2016. 11.011.
- [42] Zhu W, Jia S, Lall U, *et al.* An observation-driven optimization method for continuous estimation of evaporative fraction over large heterogeneous areas[J]. Remote Sensing of Envi-

- ronment, 2020, 247:111887. DOI:10.1016/j.rse.2020.111887.
- [43] Gillies R R, Kustas W P, Humes K S. A verification of the 'triangle' method for obtaining surface soil water content and energy fluxes from remote measurements of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and surface[J]. International Journal of Remote Sensing, 1997, 18(15):3145-3166. DOI: 10.1080/014311697217026.
- [44] Zhu W, Lü A, Jia S. Estimation of daily maximum and minimum air temperature using MODIS land surface temperature products[J]. Remote Sensing of Environment, 2013, 130:62-73. DOI: 10.1016/j.rse.2012.10.034.
- [45] Cui Y, Ma S, Yao Z, *et al.* Developing a gap-filling algorithm using DNN for the Ts-VI triangle model to obtain temporally continuous daily actual evapotranspiration in an arid area of China[J]. Remote Sensing, 2020, 12(7):1121. DOI: 10.3390/rs12071121.
- [46] Tang R, Li Z. An improved constant evaporative fraction method for estimating daily evapotranspiration from remotely sensed instantaneous observations[J]. Geophysical Research Letters, 2017, 44(5):2319-2326.
- [47] Rivas R E, Carmona F. Evapotranspiration in the Pampean Region using field measurements and satellite data[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2013, 55-57:27-34.
- [48] Gan Haihong. Temporal and spatial distribution of evapotranspiration in the Three-Rivers Headwaters Region[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2020.[甘海洪. 三江源区区域蒸散发的分布特征[D]. 北京:中国地质大学(北京), 2020.]

## Remote Sensing Estimation of Terrestrial Evapotranspiration and Analysis of Its Temporal-spatial Distribution Characteristics over the Three-River Headwater Region

Zhao Tianwei<sup>1,2</sup>, Zhu Wenbin<sup>2</sup>, Pei Liang<sup>1</sup>, Bao Kangni<sup>1,2</sup>

(1.School of Geomatics, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China;

2.Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

**Abstract:** Terrestrial Evapotranspiration (ET), defined as the sum of water lost to atmosphere from soil through evaporation and plant transpiration, is a primary process driving the energy and water exchange among the atmosphere, hydrosphere and biosphere. Facing a significant warm-wet change in the Three-River Headwater Region (TRHR), accurate ET information is of great importance for a wide range of applications including water resources management, hydrometeorological predictions and ecological protection. However, due to the complex topography and sparse distribution of ground-based meteorological observations, the accurate estimation of ET over the TRHR is always not easy. The traditional surface temperature-vegetation index triangular/trapezoidal characteristic space was transformed from regional to pixel scale based on land surface energy balance principle, so daily ET over the TRHR from 2011 to 2019 could be retrieved continuously from a series of MODIS (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer) products. Then we analyzed the temporal-spatial distribution characteristics of ET and its influencing factors over the study region with special focus on ET difference over a variety of land cover types. Comparison between our estimation with other remote sensing-based ET products shows that the accuracy of our algorithms has reached a comparable level, which lays a good basis for further analysis. Results show that ET in recent nine years over the whole TRHR decreased first and then increased with annual average value of 420.04 mm. Controlled by altitude and precipitation, the distribution of ET varied significantly in space with the high values in the southeast and low values in the northwest. ET with the elevation between 3 194 m and 4 620 m increased first and then decreased with altitude. The Pearson correlation coefficient ( $r$ ) between annual precipitation and ET at site scale was 0.71. The ET statistics of natural ecosystems varied with different land use/cover maps, but all statistics show clearly that ET per unit area followed the order: forest land > shrubland > grassland > bare land. The  $r$  between vegetation coverage and annual ET was as high as 0.77 at pixel scale.

**Key words:** Evapotranspiration; Temporal-spatial distribution; Remote sensing estimation; Land cover; Three-River Headwater Region