

Spatiotemporal Distribution Characteristics of Evapotranspiration Based on SEBAL Model and Remote Sensing

Peng Qiao, Lan Wang

Turpan Water Management Center, Turpan Xinjiang
Email: shawnqiao@163.com

Received: Jun. 10th, 2020; accepted: Jun. 25th, 2020; published: Jul. 2nd, 2020

Abstract

The evapotranspiration characteristics in Turpan city were estimated and analyzed based on SEBAL model using MODIS, DEM and meteorological observation data during 2014-2018. The results show that the average total evapotranspiration is $3.25 \times 10^9 \text{ m}^3$ with significant spatiotemporal difference. 97% of the total evapotranspiration is concentrated in April-October which shows a fluctuating downward trend. For different types of land use, the average annual evapotranspiration per unit area is decreased in following order: cultivated land is greater than urban, industrial, mining lands, and residential land is greater than forestland, grassland, waters area, and other land. Grassland and other land annual total evapotranspiration are the highest due to they occupy larger area. Grassland, cultivated land and other land account for more than 90% of annual total evapotranspiration. Most of the water areas are snow-covered, seasonal, or small area, so the annual total and average evapotranspiration per unit area are not too large.

Keywords

Remote Sensing, Evapotranspiration, SEBAL Model, Turpan City

基于SEBAL模型遥感反演的蒸散量时空分布特征研究

乔鹏, 王岚

吐鲁番市水资源管理中心, 新疆 吐鲁番
Email: shawnqiao@163.com

作者简介: 乔鹏(1987-), 男, 山东菏泽人, 硕士, 水利工程师, 主要从事水资源管理研究。

收稿日期：2020年6月10日；录用日期：2020年6月25日；发布日期：2020年7月2日

摘要

应用2014~2018年MODIS产品、气象观测数据、DEM等数据资料，采用SEBAL模型估算分析吐鲁番市的蒸散特征。结果表明：2014~2018年吐鲁番市平均年总蒸散量为 $3.25 \times 10^9 \text{ m}^3$ ，且蒸散量时空差异显著，97%的蒸散量集中在4~10月份，年际间呈波动下降趋势；对于不同土地利用类型，单位面积年蒸散量耕地 > 城乡、工矿及居民用地 > 林地 > 草地 > 水域 > 其他用地，其中草地及其他用地所占面积较大，年总蒸散量最高，草地、耕地及其他用地三者蒸散量占总蒸散90%以上，水域多为积雪区、季节性水域且面积较小，年总蒸散量及单位面积年均蒸散量均不高。

关键词

遥感，蒸散发，SEBAL模型，吐鲁番市

Copyright © 2020 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

蒸散发(Evapotranspiration, ET)指区域内土壤蒸发、水面蒸发和植物蒸腾的总称，作为唯一同时出现在水量平衡和能量平衡方程中的参数，是水循环中重要的水文过程[1]。目前随着遥感技术的飞速发展，利用多时相、多光谱、多分辨率的遥感数据定量反演蒸散发的技术逐渐成熟[2]，多年来，国内外学者建立了诸如 SEBI、SEBAL、SEBS、METRIC 等遥感 ET 计算模型并进行了广泛应用和研究[3] [4] [5] [6]。其中 SEBAL 模型是由 Bastiaanssen 在 1998 年提出的基于地表能量平衡的遥感反演模型[4]，Wang J.、李宝富、杜嘉、周妍妍等[7] [8] [9] [10]在我国西北干旱区、塔里木河流域、三江平原、疏勒河等地进行了应用研究，结果显示该模型具有较好的适用性，能够很好地反映研究区地表蒸散发的实际情况。

吐鲁番市属于干旱内流区艾丁湖流域，近 30 年来，吐鲁番市水资源环境急剧恶化，地下水多年超采，地下水水位不断下降，坎儿井 80% 以上断流，艾丁湖湖面严重萎缩，已成为季节性湖泊[11]，水资源短缺导致的植被退化、土壤盐碱化、荒漠化等水环境恶化问题突出，对此一些学者开展了吐鲁番地下水水位变化、水资源优化配置等方面的研究[12] [13] [14]，但仍缺乏对吐鲁番水资源耗散过程的探讨。

研究吐鲁番市水资源耗散变化过程，对吐鲁番市水资源合理开发利用，促进水生态恢复，保障社会、经济和生态可持续发展具有重要意义。本文以 MODIS 数据产品、气象观测数据、土地利用数据、DEM 数据为基础，利用 SEBAL 模型对吐鲁番市 2014~2018 年蒸散量数据进行计算验证，分析研究吐鲁番市蒸散空间分布规律，以期对吐鲁番市水资源决策管理和生态保护提供支持。

2. 研究区概况及数据材料

2.1. 研究区概况

吐鲁番市位于北纬 $41^{\circ}12' \sim 43^{\circ}40'$ ，东经 $87^{\circ}16' \sim 91^{\circ}55'$ 之间，属天山东部山间盆地，西临天山和觉罗塔格山，东以了墩隆起和哈密盆地分界，东西长约 245 千米；北部为天山东段博格达山南麓，南抵库鲁克塔格山，南北

宽约 75 千米,总面积 6.9×10^4 平方千米,其中平原区占 77%,山地占 23%。盆地整体北高南低,海拔在-155~4372 m,平均海拔 1013 m (图 1)。吐鲁番市属于典型的暖温带大陆性荒漠气候,降水主要集中在北部山区,盆地内全年日照充足,降雨稀少,极其干燥,多年平均降水 16.4 毫米,年蒸发潜力 3000 mm 以上,径流依靠山区降雨及融雪,河流汛期在春夏季节。人类活动集中在平原中部绿洲区域,主要农作物是葡萄、哈密瓜、棉花、果树,由于近 30 年来绿洲持续扩张,水资源短缺、地下水超采、艾丁湖季节性干涸等问题凸显。

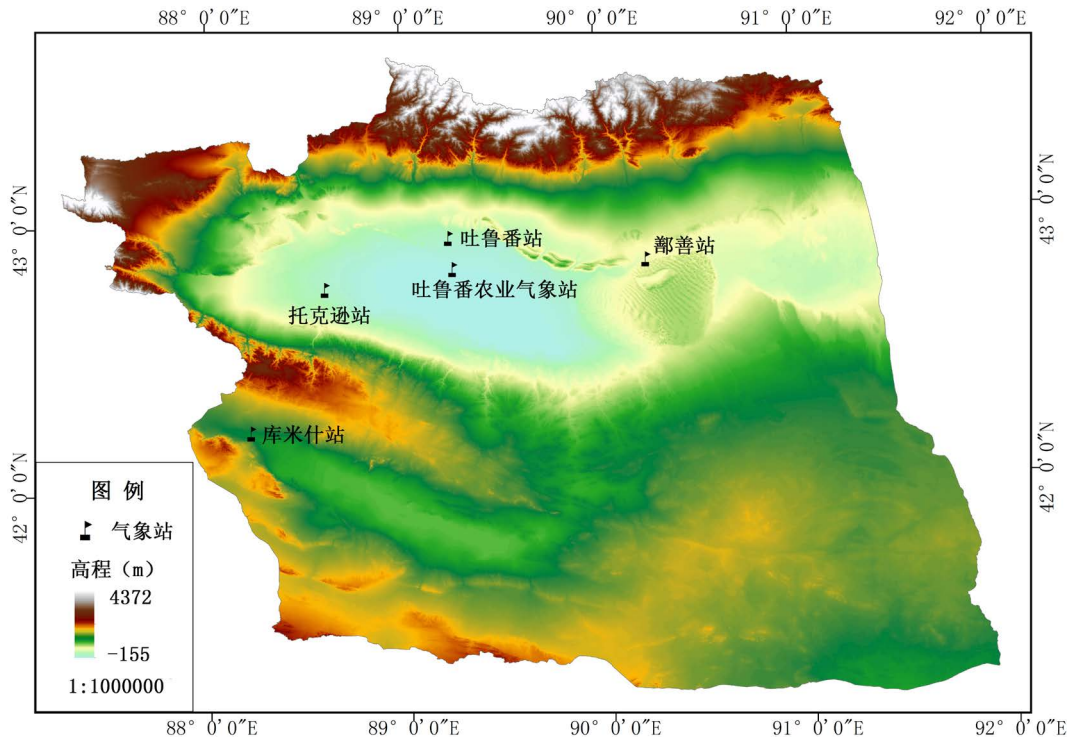


Figure 1. The DEM and location of weather station in Turpan city

图 1. 吐鲁番市 DEM 和气象站位置图

2.2. 数据资料

本文使用的数据包括: 1) 遥感数据: 2014~2018 年 MODIS 地表温度产品(MYD11A1)、地表反照率产品(MYD09GA)、BRDF/Albedo 数据(MCD43A1), 上述数据下载自 NASA 的 LADDS 数据网站 (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov>); GDEMv2 30M 分辨率数字高程数据, 下载自地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn/>)。2) 研究区内 5 个国家基本气象站点数据(图 1), 主要包括日最高气温、日最低气温、平均温度、气压、风速、相对湿度等, 获取自吐鲁番市气象局。3) 2016 吐鲁番市土地利用类型数据采用吐鲁番市世界银行贷款新疆坎儿井保护及节水灌溉项目成果, 数据由 Landsat 8 OLI 数据解译得到, 分辨率 30 m。

上述所有数据资料, 经在 ArcGIS 及 ERDAS 软件中格式转换、投影转换、插值、裁剪、重采样等, 处理为 WGS-1984 坐标系、通用墨卡托投影、250 m 分辨率的 TIFF 格式, 并剔除研究区云覆盖量大于 5% 的影像。

3. SEBAL 模型原理

SEBAL 模型以地表能量平衡方程为基础, 忽略了水平能量交换和光合作用[4], 如式(1)。

$$\lambda ET = R_n - H - G \quad (1)$$

式中: λ 为汽化潜热($J \cdot kg^{-1}$), ET 为蒸散量(mm), λET 即为潜热通量, R_n 为地表净辐射通量, H 为显热通量,

G 为土壤热通量(单位均为 $W \cdot m^{-2}$)。

地表净辐射通量指地表获得的太阳净辐射和大气逆辐射之和减去地表辐射能量后所得的净能量, 是地表能量的主要来源, 地表净辐射平衡方程见式(2)。

$$R_n = (1 - \alpha)R_s + R_l \downarrow - R_l \uparrow \quad (2)$$

式中: R_s 指入射至地表的太阳辐射, $R_l \downarrow$ 指大气逆辐射, $R_l \uparrow$ 指地表辐射(单位均为 $W \cdot m^{-2}$), α 指地表反照率, R_s 、 $R_l \downarrow$ 、 $R_l \uparrow$ 计算方法如式(3)至式(5)。

$$R_s = G_{sc} \cdot \cos \theta \cdot dr \cdot \tau_{sw} \quad (3)$$

式中: G_{sc} 是太阳常数, 取 $1367 W \cdot m^{-2}$; $\cos \theta$ 是太阳天顶角余弦, 在平原地区 $\cos \theta = \cos(\pi/2 - \varphi)$, φ 为纬度, 在山区则根据坡度 s 、坡向 γ 、太阳赤纬 δ 、太阳时角 ω 计算(均为弧度),

$$\cos \theta = \sin(\delta)\sin(\varphi)\cos(s) - \sin(\delta)\sin(s)\cos(\gamma) + \cos(\delta)\cos(\varphi)\cos(s)\cos(\omega) + \cos(\delta)\sin(\varphi)\sin(s)\cos(\gamma)\cos(\omega) + \cos(\delta)\sin(\gamma)\sin(s)\sin(\omega) \quad ; \quad dr \text{ 是日地距离因子,}$$

$dr = 1 + 0.33 \cos(DOY \cdot 2\pi/365)$, DOY 为儒略日; τ_{sw} 是大气透射率, $\tau_{sw} = 0.75 + 2 \times 10^{-5} \times Z$, Z 为海拔高度(m)。

$$R_l \downarrow = \varepsilon_a \cdot \sigma \cdot T_a^4 \quad (4)$$

$$R_l \uparrow = \varepsilon_s \cdot \sigma \cdot T_s^4 \quad (5)$$

式中: ε_a 为大气比辐射率, $\varepsilon_a = 1.08(-\ln \tau_{sw})^{0.265}$; τ_{sw} 为大气透射率, 计算方式同前式; ε_s 为地表比辐射率, $\varepsilon_s = 1.009 + 0.047 \ln(NDVI)$, 式中 $NDVI > 0$, 否则为 $\varepsilon_s = 1$; σ 指斯蒂芬-玻尔兹曼常数, 取 $5.67 \times 10^{-8} W \cdot m^{-2}$; T_a 指 2 m 处气温($^{\circ}C$); T_s 指地表温度($^{\circ}C$)。

土壤热通量是指土壤内部的热交换, 受植被盖度影像较大。Bastaanssen 等在 SEBAL 模型中提出利用净辐射通量、地表反照率、 $NDVI$ 、地表温度的计算植被覆盖区域土壤热通量的方法[15], 如式(6); 对于水体 $G = 0.41R_n - 0.51$; 对于城镇用地 $G = 0.3R_n$ 。

$$G = R_n \times T_s / \alpha (0.0038\alpha + 0.0074\alpha^2) (1 - 0.98NDVI^4) \quad (6)$$

显热通量指单位时间内地面和大气垂直方向间单位面积通过的热量, 其产生的唯一结果是温度变化, 计算方法如式(7)。

$$H = \rho \cdot C_p \cdot dT / r_{ah} \quad (7)$$

式中: ρ 为空气密度($kg \cdot m^{-3}$), C_p 为空气定压比热容, 取 $1004 J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$, dT 为 z_1 、 z_2 高度温度差值(K), r_{ah} 为热量传输空气动力学阻抗。

对于中性层结大气, 空气动力学阻抗计算公式如下:

$$r_{ah} = \ln(z_2/z_1) / (ku^*) \quad (8)$$

$$u^* = ku_x / \ln(z_x/z_{om}) \quad (9)$$

$$z_{om} = \exp(a \cdot NDVI / \alpha + b) \quad (10)$$

式中: z_1 、 z_2 为参考植被零平面位移高度, 经验值一般取 0.1 m 和 2 m; k 为卡曼常数, 取 0.41; u^* 为摩擦速度 ($m \cdot s^{-1}$); z_x 为距地表某一高度; u_x 为此高度风速; z_{om} 为地表动量粗糙度长度(m)。

由经验公式 $z_{om} = 0.123h$ [16], h 为植被高度, 建立样本空间, 据式(10), 求出常数 a , b , 从而计算出每个像元的 z_{om} 。

随着高度增加, 大气受下垫面影响逐渐减弱, 到达一定高度时, 湍流速度不再受地表影响, 此高度称为混合高度, 经验值取 200 m, 并认为此风速作用于整个影像区域, 由气象站点数据根据式(11)计算出 u_{200} , 带入式

(9)得出每个像元 u^* 。

$$u_{200} = \frac{u^*}{k} \ln \left(\frac{z_{200}}{z_{om}} \right) \quad (11)$$

SEBAL 假定 dT 和地表温度 T_s 呈线性关系, 即 $dT = b + aT_s$, 并选取图像中冷热极值点, 冷点为温度较低近似于气温且水分充足, 显热通量为零, 一般选取水面区域; 热点为温度较高且极为干旱区域, ET 为零, 一般选取裸地或荒漠区域。根据实际冷点选取水库区域, 热点选择沙漠区域, 据冷热点计算出 a 、 b 系数。

$$a = \frac{(R_{hot} - G_{hot}) \cdot r_{ahhot}}{C_p \cdot \rho_{air} \cdot (T_{shot} - T_{scold})} \quad (12)$$

$$b = -a \cdot T_{scold} \quad (13)$$

考虑浮力效应对大气状态影响, SEBAL 模型引入莫宁-奥布霍夫长度, 对大气稳定状态及不稳定状态下的 r_{ah} 、 u^* 按照式(14)和式(15)进行修正, 并通过多次选取冷热点迭代计算 a 、 b 、 dT 、 H , 直至热点 dT_{hot} 、 r_{ah} 趋于稳定。

$$r_{ah} = \frac{\ln \left(\frac{z_2}{z_1} \right) - \psi_h(z_2) + \psi_h(z_1)}{ku^*} \quad (14)$$

$$u^* = \frac{k \cdot u_{200}}{\ln \left(\frac{z_{200}}{z_{om}} \right) - \psi_m(z_{200})} \quad (15)$$

式中: $\psi_h(z_1)$ 、 $\psi_h(z_2)$ 是 z_1 、 z_2 高度热量传输稳定度修正因子, $\psi_m(z_{200})$ 为 200 m 处动量传输稳定度修正因子, 按照 Paulson [17]、Webb [18] 提出公式计算。

由于上述热通量均为瞬时状态, 计算出的蒸散量是卫星影像获取时的瞬时蒸散量, SEBAL 模型采用蒸发比法将瞬时蒸散量扩展为日尺度, 假定每日潜热通量 λET 与净辐射减去土壤热通量($R_n - G$) 的比值不变, 如式(16), 则每日 ET_{24} 可用式(17)计算得到。

$$EF = \lambda ET / (R_n - G) \quad (16)$$

$$ET_{24} = 86400 \cdot EF \cdot (R_{n24} - G_{24}) / \lambda \quad (17)$$

由于获取的部分影像数据受云覆盖影像无法使用, 为计算月、年累计蒸散量, 这些时段蒸散量采用气象站点蒸散量数据比值和晴好日反演的蒸散量来推算, 如式(18)。

$$ET_j = \frac{ET_{stj}}{ET_{sti}} ET_{rei} \quad (18)$$

式中: ET_j 为第 j 天日蒸散量, ET_{sti} 、 ET_{stj} 为第 i 天和第 j 天气象站点蒸散量, ET_{rei} 为第 i 天的反演蒸散量。

4. 精度检验

选取研究区范围内 5 个国家气象站的气象观测数据, 以 FAO 56 推荐的 Penman-Monteith 公式[19]计算每个站点的地表日蒸散量作为校验依据, 对 SEBAL 模型结果进行精度检验。

$$ET = K_c \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)} \quad (19)$$

式中: K_c 为作物系数; e_s 为饱和水汽压(kPa); e_a 为实际水汽压(kPa); Δ 为饱和水汽压曲线的斜率; γ 为湿度

计算常数($\text{kPa}\cdot\text{C}^{-1}$); u_2 为 2 米处风速($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)。

检验结果显示, SEBAL 模型计算结果的平均相对误差为 11.99% (表 1), 从二者相关性来看, 拟合优度 R^2 值为 0.87 (图 2), 说明蒸散量反演结果与实测值整体上有较好的正相关, 认为结果精度是可以适用的。

Table 1. Relative errors calculated by SEBAL model

表 1. SEBAL 模型计算的相对误差值

站点	经度	纬度	平均相对误差(%)
吐鲁番	89.23	42.95	13.16
吐鲁番农业站	89.25	42.83	14.61
托克逊站	90.23	42.85	9.49
鄯善站	88.60	42.77	13.78
库米什站	88.22	42.23	8.91
平均相对误差(%)			11.99

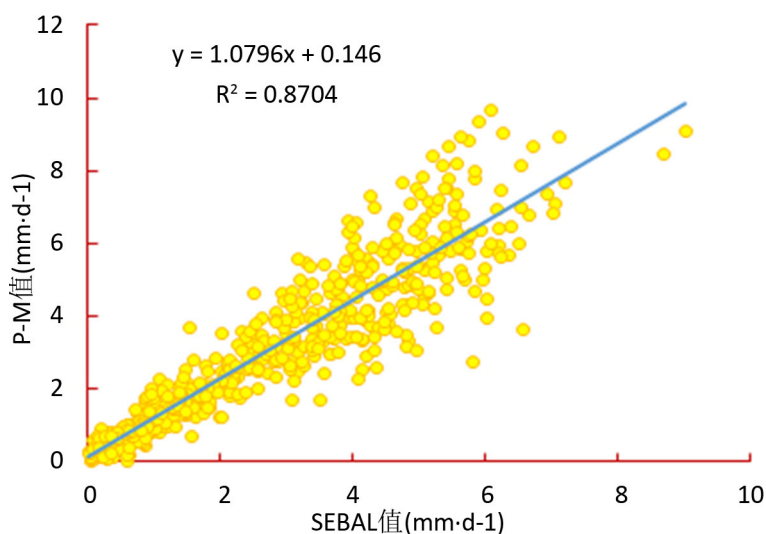


Figure 2. Scatter plot of SEBAL and P-M value
图 2. SEBAL 值与 P-M 值散点图

5. 结果分析

5.1. 日蒸散量

吐鲁番市冬季寒冷干燥, 蒸散发比较微弱, 从多年蒸散平均来看, 12 月、1 月、2 月日蒸散量在 0~2 mm/d; 春季气温回升较快, 3 月份月均温即从 2 月份的零下回升至 15℃左右, 植被开始复苏, 且春季多大风天气, 5 月份日蒸散量最大值已达 6.4 mm/d; 夏季蒸散量在 0~9.0 mm/d, 秋季蒸散量在 0~3.7 mm/d。

从不同土地覆被类型来看, 蒸散量差异性较大, 日蒸散量极大值水体 > 耕地 > 林地 > 草地 > 城乡、工矿及居民用地 > 其他用地。水域主要为冰川积雪、河流、水库、季节性湖泊等, 日蒸散量极大值出现在 7 月中下旬, 在 8.5~9.0 mm/d 左右。耕地主要种植作物为葡萄、棉花、瓜, 冬季棉花、瓜等一年生作物收获, 葡萄掩埋过冬, 蒸散发量主要集中在 4~10 月份作物生长季, 占全年蒸散量 99%, 日蒸散量极大值出现在 7 月初, 在 8.3~8.8 mm/d 之间。林地包括人工林地和自然林地, 蒸散量极大值出现在 8 月初, 在 4.3~4.6 mm/d 之间。草地蒸散量极大值同样出现在 8 月初, 在 3.5~3.9 mm/d 之间。城乡、工矿及居民用地呈零星分布, 多与耕地交错,

受混合像元影响较大,日蒸散量极大值在 3.4~4.5 mm/d 之间。其他用地包括裸土、裸岩、沙漠、戈壁等,这些地方降水稀少,全年日蒸散量基本在 0~2 mm/d。

5.2. 月蒸散量

月蒸散量时间变化规律与日蒸散量类似,2014 年~2018 年全年蒸散数据显示,蒸散量在各月份差异显著,主要集中在 4~10 月份,占全年总蒸散量的 97.04%,从季节上看,春季占比 22.06%,夏季占比 62.25%,秋季占比 14.83%,冬季占比 0.86%。冬季月均蒸散量在 3 mm 以下,春季开始增大,3 月、4 月、5 月平均蒸散量分别为 5.46 mm、19.89 mm、43.12 mm,夏季达到峰值,5 月、6 月、7 月平均蒸散量分别为 67.14 mm、68.29 mm、67.41 mm,秋季逐渐降低,9 月、10 月、11 月平均蒸散量分别为 43.34 mm、17.26 mm、1.47 mm。

各季节典型月份蒸散量分布如图 3,蒸散量较大区域集中在中部绿洲区及北部山区草地,其他平原区域多为荒漠、沙漠、戈壁,南部山区裸岩、裸土分布较广,干旱少雨,单位面积蒸散量小。

对于不同土地利用类型,月均蒸散量有较大差异,受冰川积雪占比、及混合像元影响,水域月均蒸散量在 4~10 月份低于耕地,最大值在 63.9 mm。耕地受灌溉影响,在作物生长季节蒸散发强烈,6 月份月均蒸散量达 179.6 mm,由于吐鲁番种植两季瓜,每年在 6 月底 7 月初收获,6 月份蒸散量稍高于 7 月,秋季作物收获后,蒸散量迅速下降。林地、草地蒸散量趋势相近,林地蒸散量 8 月份最大为 67.1 mm,草地为 59.4 mm。城乡、工矿及居民用地受混合像元中耕地影响,蒸散量 6 月最大为 49.2 mm。其他用地蒸散量较低,月均蒸散量最大为 10.9 mm。

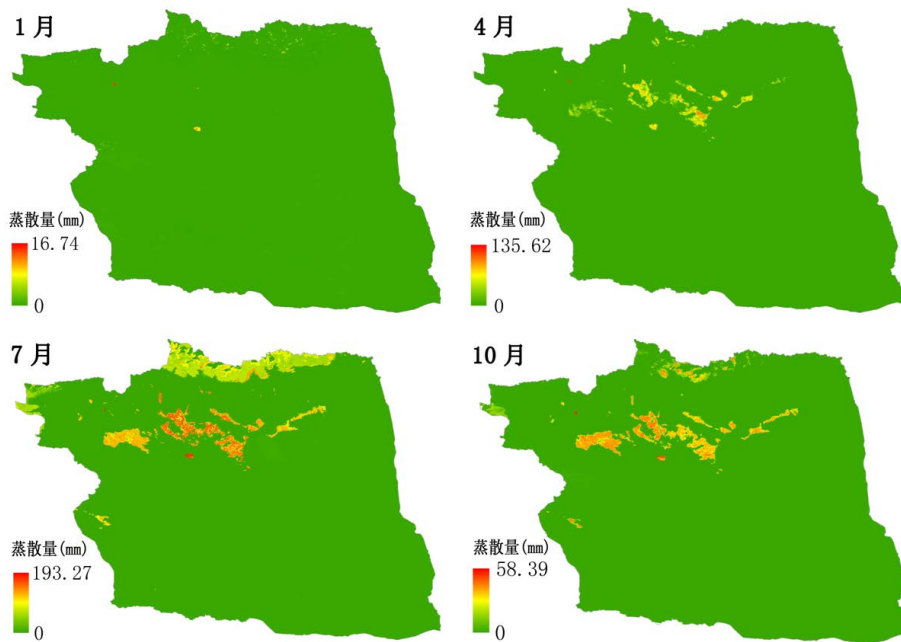


Figure 3. Spatial distribution of typical month average evapotranspiration, 2014-2018

图 3. 2014~2018 年各季节典型月份平均月蒸散量空间分布

5.3. 总蒸散量

2014~2018 年吐鲁番全市范围蒸散情况如表 2,平均总蒸散量为 $3.25 \times 10^9 \text{ m}^3$,从蒸散量年际变化来看,总蒸散量有波动下降趋势,对于不同土地利用类型,耕地、草地、城乡、工矿及居民用地总蒸散量总体呈下降趋势,林地蒸散量则有上升趋势,水域及其他用地耗水变化不大,上述变化的原因主要包括:一是吐鲁番推行退

地减水政策，逐步压减了耕地面积，同时通过改进灌溉方式提高了用水效率；二是地下水水位不断下降，草场面积有所缩减；三是当地节水政策促使工矿企业提高了中水利用率和居民节水意识；四是近年来吐鲁番人工造林面积不断扩大，林地用水及蒸散量均有所增加。

2014年~2018年全市单位面积平均年蒸散量 46.56 mm，从不同土地类型来看，草地平均年蒸散量 1.23×10^9 m³、其他用地 1.06×10^9 m³、耕地 7.54×10^8 m³，分别占全年蒸散量的 37.94%、32.66%和 23.21%，林地 1.11×10^8 m³，城乡、工矿及居民用地 8.01×10^7 m³，水域 9.74×10^6 m³，而单位面积平均年总蒸散量耕地 > 城乡、工矿及居民用地 > 林地 > 草地 > 水域 > 其他用地。耕地由于人工灌溉单位面积年蒸散量最高，但由于面积只占全市范围 1.26%，年总蒸散量低于草地和其他用地蒸散量；水域单位面积蒸散量较低的原因在于大部分水域为季节性水域或积雪区域，草地和其他用地单位面积年蒸散量不高，但由于面积分别占全市面积 82.98%和 14.06%，总蒸散量反而最高。

Table 2. Total evapotranspiration and different land use at Turpan city in 2014-2018 (m³)
表 2. 2014~2018 年全市及不同土地类型蒸散量/m³

年份	总蒸散量	耕地	林地	草地	城乡、工矿及居民用地	水域	其他用地
2014 年	3.40×10^9	8.13×10^8	1.12×10^8	1.32×10^9	9.51×10^7	1.08×10^7	1.05×10^9
2015 年	3.18×10^9	7.54×10^8	1.06×10^8	1.19×10^9	8.14×10^7	9.85×10^6	1.04×10^9
2016 年	3.28×10^9	7.45×10^8	1.08×10^8	1.25×10^9	7.87×10^7	9.84×10^6	1.09×10^9
2017 年	3.20×10^9	7.41×10^8	1.14×10^8	1.22×10^9	7.17×10^7	8.97×10^6	1.05×10^9
2018 年	3.18×10^9	7.17×10^8	1.14×10^8	1.18×10^9	7.44×10^7	9.22×10^6	1.08×10^9
平均	3.25×10^9	7.54×10^8	1.11×10^8	1.23×10^9	8.01×10^7	9.74×10^6	1.06×10^9
百分比	100%	23.21%	3.42%	37.94%	2.47%	0.30%	32.66%
面积占比	100%	1.26%	1.02%	14.06%	0.51%	0.17%	82.98%
单位面积平均年蒸散量 (mm)	46.56	859.87	156.43	125.55	223.19	83.07	18.33

6. 结论

本文以 MODIS 数据、气象观测数据、DEM 等为基础，通过 SEBAL 模型对吐鲁番市 2014~2018 年蒸散量进行估算，分析蒸散量时空分布特征，结论如下：

1) 吐鲁番市日蒸散量时空差异较大，夏季日蒸散量最大，春季、秋季次之，冬季蒸散量最小；日蒸散量极大值：水域 > 耕地 > 林地 > 草地 > 城乡、工矿及居民用地 > 其他用地。

2) 不同土地利用类型的月平均蒸散量极大值：耕地 > 水域 > 林地 > 草地 > 城乡、工矿及居民用地 > 其他用地。

3) 年总蒸散量以草地、未利用地和耕地蒸散量为主，分别占全区总蒸散量的 37.94%、32.66%和 23.21%，林地、城乡、工矿及居民用地和水域总蒸散量占比较少，分别占 3.42%、2.47%和 0.17%，单位面积年总蒸散量耕地 > 城乡、工矿及居民用地 > 林地 > 草地 > 水域 > 其他用地。

4) 年总蒸散量 97.04%集中在 4~10 月份，从季节上看，春季占比 22.06%，夏季占比 62.25%，秋季占比 14.83%，冬季占比 0.86%

利用 FAO 56 推荐的 P-M 公式和气象站观测数据对结果进行精度检验，平均误差为 11.99%，拟合优度 R² 值为 0.87。

基金项目

世界银行贷款新疆坎儿井保护及节水灌溉项目(P111163)。

参考文献

- [1] XU, C. Y., SINGH, V. P. Evaluation of three complementary relationship evapotranspiration models by water balance approach to estimate actual regional evapotranspiration in different climatic region. *Journal of Hydrology*, 2005, 308: 105-121. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.10.024>
- [2] 邱国玉, 熊育久. 水与能: 蒸散发、热环境及其能量收支[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
QIU Guoyu, XIONG Yujie. *Water versus energy: Evapotranspiration, thermal environment, energy budget*. Beijing: Science Press, 2014. (in Chinese)
- [3] MENENTI, M., CHOUDHURY, B. J. Parameterization of land surface evaporation by means of location dependent potential evaporation and surface temperature range. In BOLLE H. J., FEDDES, R. A. and KALMA, J. D. *Exchange processes at the land surface for a range of space and time scales (Vol. 212)*. Wallingford: IAHS Publ., 1993: 561-568.
- [4] BASTIAANSEN, W. G. M., MENENTI, M., FEDDES, R. A., et al. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): Part 1 formulation. *Journal of Hydrology*, 1998, 212: 198-213. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(98\)00253-4](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(98)00253-4)
- [5] SU, Z. The surface energy balance system (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2002, 6(1): 85-99. <https://doi.org/10.5194/hess-6-85-2002>
- [6] ALLEN, R. G., TASUMI, M. and TREZZA, R. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internationalized calibration (METRIC) model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2007, 133(4): 380-394. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2007\)133:4\(380\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2007)133:4(380))
- [7] WANG, J. M., BASTIAANSEN, W. G. M., MA, Y. M., et al. Aggregation of land surface parameters in the oasis-desert systems of north-west China. *Hydrological Processes*, 1998, 12(13/14): 2133-2147. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(19981030\)12:13/14<2133::AID-HYP725>3.0.CO;2-6](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(19981030)12:13/14<2133::AID-HYP725>3.0.CO;2-6)
- [8] 李宝富, 陈亚宁, 李卫红, 等. 基于遥感和 SEBAL 模型的塔里木河干流区蒸散发估算[J]. *地理学报*, 2011, 66(9): 1230-1238.
LI Baofu, CHEN Yaning, LI Wenhong, et al. Evapotranspiration estimation of the Tarim River Basin with SEBAL and remote sensing. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(9): 1230-1238. (in Chinese)
- [9] 杜嘉, 张柏, 宋开山, 等. 基于 MODIS 产品和 SEBAL 模型的三江平原地蒸散量估算[J]. *中国农业气象*, 2010, 31(1): 104-110, 162.
DU Jia, ZHANG Bai, SONG Kaishan, et al. Study on daily evapotranspiration estimation of Sanjiang Plain based on MODIS product and SEBAL model. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2010, 31(1): 104-110, 162. (in Chinese)
- [10] 周妍妍, 郭晓娟, 郭建军, 等. 基于 SEBAL 模型的疏勒河流域蒸散量时空动态[J]. *水土保持研究*, 2019, 26(1): 168-177.
ZHOU Yanyan, GUO Xiaojuan, GUO Jianjun, et al. Spatiotemporal dynamics of evapotranspiration in Shule River Basin based on SEBAL model. *Research of Soil and Water Conservation*, 2019, 26(1): 168-177. (in Chinese)
- [11] 李吉玫, 张毓涛. 近 60 年新疆吐鲁番盆地坎儿井衰败的影响因素及环境效应[J]. *水土保持通报*, 2013, 33(5): 239-244.
LI Jimei, ZHANG Yutao. Influence factors for Karez abandonment and its environmental effects in Turpan Basin of Xinjiang autonomous region over last 60 years. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2013, 33(5): 239-244. (in Chinese)
- [12] 傅小锋. 吐鲁番盆地水资源利用与绿洲经济发展探讨[J]. *地理研究*, 1996(4): 74-81.
FU Xiaofeng. The utilization of water resources and the oasis economic development in Turpan Basin. *Geographical Research*, 1996(4): 74-81. (in Chinese)
- [13] 曹培武, 白云岗, 张江辉. 吐鲁番地区水资源可持续利用的对策与建议[J]. *新疆水利*, 2011(5): 1-5.
CAO Peiwu, BAI Yungang and ZHANG Jianghui. Countermeasure and suggestion of Turpan water resource sustainable use. *Xinjiang Water Resources*, 2011(5): 1-5. (in Chinese)
- [14] 伏吉芮, 瓦哈甫·哈力克, 姚一平. 协调模式下的吐鲁番地区水资源合理供求模式[J]. *南水北调与水利科技*, 2017, 15(1): 67-71, 144.
FU Jirui, WAHAP HALIK and YAO Yiping. Analysis of rational supply and demand of water resources in Turpan area in the coordination mode. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2017, 15(1): 67-71+144. (in Chinese)
- [15] BASTIAANSEN, W. G. M. SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. *Journal of Hydrology*, 2000, 229(1-2): 87-100. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(99\)00202-4](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(99)00202-4)
- [16] BRUTSAERT, W. *Evaporation into the atmosphere—Theory, history, and application*. Dordrecht: D. Reidel Publishing Company, 1982.

- [17] PAULSON, C. A. The mathematical representation of wind speed and temperature profiles in the unstable atmospheric surface layer. *Journal of Applied Meteorology*, 1970, 9: 857-861.
[https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1970\)009<0857:TMROWS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1970)009<0857:TMROWS>2.0.CO;2)
- [18] WEBB, E. K. Profile relationships: The log-linear range, and extension to strong stability. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1970, 96: 67-90. <https://doi.org/10.1002/qj.49709640708>
- [19] ALLEN, R. G., PEREIRA, L. S., RAES, D., et al. *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements*. FAO irrigation and DRAINAGE Paper No. 56. Rome: United Nations Food and Agriculture Organization, 1998.