

# 2000—2018 年祁连山蒸散发时空变化及影响因素

邱丽莎<sup>1,2,3</sup>, 张立峰<sup>1,2,3</sup>, 何毅<sup>1,2,3</sup>, 陈有东<sup>1,2,3</sup>, 王文辉<sup>1,2,3</sup>

(1.兰州交通大学 测绘与地理信息学院, 兰州 730700; 2.地理国情监测技术应用

国家地方联合工程研究中心, 兰州 730700; 3.甘肃省地理国情监测工程实验室, 兰州 730700)

**摘 要:**为研究不同时期祁连山 ET 变化特征及其主要影响因子,基于 2000—2018 年的祁连山 MOD16 ET 数据和气象数据,利用趋势分析及相关性分析等方法,对比分析了不同时期祁连山 ET 的时空变化特征及其主要影响因子。结果表明:(1) MOD16 ET 产品精度能够满足祁连山 ET 时空变化分析的要求。(2) 祁连山 ET 时间序列在 2000—2008 年的增加速率为 3.02 mm/a,远大于 2009—2018 年(1.14 mm/a)。2008 年以后,由于暖湿化趋势的减缓,ET 增加趋势也有所减缓;空间呈东北高西南低的分布状态,2000—2008 年和 2009—2018 年两个时期面积显著增加分别为 21.47%和 9.81%。2008 年以后研究区中部 ET 显著减少。(3) 不同植被类型表现为草甸 ET>耕地 ET>林地 ET>荒漠 ET,其中耕地 ET 增加最为显著,草甸 ET 下降最明显。(4) 气温和风速对祁连山 ET 变化影响最为显著,2000—2008 年祁连山西北部的暖湿化是 ET 增加的主要原因。2008 年以后,中部地区 ET 的减小是气候因素和人类活动共同作用的结果。研究可为西北干旱区气候变化决策及水资源配置提供依据。

**关键词:**MODIS ET; 气候因子; MODIS NDVI; 祁连山

**中图分类号:**P426.2

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2020)03-0210-08

## Spatiotemporal Variations of Evapotranspiration and Influence Factors in Qilian Mountain from 2000 to 2018

QIU Lisha<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Lifeng<sup>1,2,3</sup>, HE Yi<sup>1,2,3</sup>, CHEN Youdong<sup>1,2,3</sup>, WANG Wenhui<sup>1,2,3</sup>

(1.Faculty of Geomatics, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730700, China; 2.National-Local Joint

Engineering Research Center of Technologies and Applications for National Geographic State Monitoring, Lanzhou 730700,

China; 3.Gansu Provincial Engineering Laboratory for National Geographic State Monitoring, Lanzhou 730700, China)

**Abstract:** In order to explore the characteristics of ET in Qilian Mountains and their main influencing factors at different periods, based on the MOD16 ET data and meteorological data of Qilian Mountain from 2000 to 2018, we used trend analysis and correlation analysis to analyze the temporal and spatial variation characteristics and main influencing factors on ET of Qilian Mountain in different periods. The results show as follows. (1) The accuracy of MOD16 ET products can meet the requirements of time-space change analysis of Qilian Mountain ET. (2) The increase rate of ET of Qilian Mountain in the time series of 2000—2008 was 3.02 mm/year, which was much larger than that in the period 2009—2018 (1.14 mm/a). After 2008, because the warm and humid trend became slow, the ET increase trend also presented the slowing trend. The spatial distribution was characterized as high ET in northwest and low ET in southeast, and the significant increases of ET in the two periods 2000—2008 and 2009—2018 were 21.47% and 9.81%, respectively. ET in the central part of the study area decreased significantly after 2008. (3) ET of Qilian Mountain was positively correlated with NDVI, and the area where the ET of Qilian Mountain was extremely significantly positively correlated with NDVI accounted for 21.27% of the total area. The ETs of different vegetation types decreased in the order: meadow ET>cultivated land ET>forest ET>desert ET, and the increase of cultivated land ET was the most significant, and the decline of meadow ET was the most obvious. (4) Temperature and wind speed had the most significant impact on the ET changes in Qilian Mountain. The warming and humidification of the northwestern Qilian Mountains was the main reason for the increase of ET from 2000 to 2008. The reduction of ET in the cen-

收稿日期:2019-08-09

修回日期:2019-08-23

资助项目:甘肃省自然科学基金(17JR5RA095);兰州交通大学天佑青年托举人才计划;甘肃省教育厅“兰州市主城区地面沉降 InSAR 监测”(2019A-043);中国博士后科学基金(2019M660092XB);兰州交通大学青年基金(2017002);兰州交通大学优秀平台支持(201806)

第一作者:邱丽莎(1993—),女,甘肃张掖人,硕士研究生,研究方向为生态环境遥感。E-mail:lisa\_qiu@lz.acmlife.org

通信作者:张立峰(1982—),男,吉林农安人,博士,副教授,研究方向为生态环境遥感。E-mail:119273207@qq.com

tral region was the result of the interaction of climatic factors and human activities after 2008. This study can Provide a basis for climate change decision-making and water resource allocation in arid regions of the North-west.

**Keywords:** MODIS ET; climatic factors; MODIS NDVI; Qilian Mountain

蒸散发 (Evapotranspiration, ET) 是区域地表能量、气候系统和水循环的主要组成部分<sup>[1]</sup>, 在区域水平衡中发挥着重要作用<sup>[2]</sup>。ET 包括土壤、水面蒸发和植被蒸腾<sup>[3]</sup>。衡量区域蒸散发情况的指标有地表实际蒸散发 (Actual evapotranspiration, ET) 和潜在蒸散发 (Potential evapotranspiration, PET), ET 反映直接参与陆地水文循环的量, 在农业灌溉管理和水资源优化配置等方面有着广泛的应用<sup>[4]</sup>。分析 ET 时空变化趋势及其与气象因子等的联系, 对宏观角度研究区域气候变化和流域水循环的相互关系具有重要意义<sup>[5]</sup>。祁连山作为西北重要的生态功能区, 也是生态环境脆弱区。全球变暖导致区域冰雪融化及出现的水资源短缺问题已严重影响到当地生态环境及社会经济发展<sup>[6]</sup>, ET 作为水量平衡研究中的重要参量, 监测其时空变化规律并分析其与气象因子的关联性对当地水资源及农业管理, 生态修复等有重要意义<sup>[7]</sup>。

在全球变暖的背景下, 近 50 a 来全球蒸散发以下降趋势为主<sup>[8]</sup>。1961—2015 年中国平均 PET 为 621~1 733 mm, 以 0.52 mm/a 的速率递减, PET 减少主要是由风速减小, 日照时数降低和水汽压微弱增加共同作用的结果<sup>[9]</sup>。另有研究发现河西走廊, 南部岭南等地区 PET 值较大, 且西北诸河区减小趋势最为明显<sup>[10]</sup>。对于西北地区的 PET 研究表明近 52 a 来西北地区 PET 以 0.72 mm/a 的速率下降, 各季节主导因素均为风速, 且西北地区 81.35% 的区域 PET 在未来有增加趋势, 西北地区暖湿化程度将有所减弱<sup>[11]</sup>。张彩霞等基于 Penman-Monteith 方程式对河西地区的 PET 进行了分析, 发现 1975—2012 年河西地区随着海拔的升高, 降水量和湿润指数显著增加而 PET 显著降低, 河西地区平均气温和风速对 PET 影响的百分比分别为 41.1% 和 22.9%<sup>[12]</sup>。

已有学者对祁连山 ET 及 PET 进行了研究分析。曹广超等利用彭曼公式, 对祁连山 PET 进行了估算, 结果显示, 1960—2012 年祁连山南坡地区 PET 以 0.46/mm 的速率波动性上升, PET 最大影响因子为最高温和风速<sup>[6]</sup>; 李念等基于 Landsat8 遥感数据估算祁连山高寒草甸 ET 值, 对结果分析发现祁连山高寒草甸 ET 总量变化幅度较大, 平均为 205.4 mm, ET 对相对湿度, 净辐射比较敏感<sup>[13]</sup>; 田辉等基于 MODIS 数据对黑河流域夏季 ET 进行分析, 发现黑

河流域的祁连山区夏季 7 月平均蒸散发量是中下游地区的约 2.2 倍<sup>[14]</sup>; 刘春雨等采用 MODIS 数据对石羊河流域 ET 反演得出, 遥感 ET 量能很好的反映研究区地表的实际情况, 有较好的估算精度<sup>[15]</sup>。目前针对祁连山 ET 的研究大多利用蒸散公式基于气象站点数据展开, 不能提供较为精确的空间分布特征, 尤其对于西北内陆气象站点稀疏且分布不均的区域<sup>[3]</sup>。此外, 针对不同时期祁连山 ET 变化的主要影响因子的定量评价尚未开展, 各气象因子变化对 ET 变化产生的影响并未得到有效的评估。同时对该地区不同时期 ET 时空变化特征的了解欠缺。因此本文以 2000—2018 年 MOD16 ET 数据为基础, 结合气象站数据和 MOD13 NDVI 数据, 分析祁连山 ET 的时空变化规律, 揭示其与主要影响因子之间的相互关系, 为该地区气候变化决策及水资源配置提供科学依据。

## 1 研究区概况

祁连山地处西北内陆干旱半干旱地区, 横跨甘肃, 青海两省, 东起乌鞘岭, 西至当金山口, 北临河西走廊, 南接柴达木盆地, 是青藏, 蒙新, 黄土三大高原的分界线<sup>[16-17]</sup>, 山势由西向东降低由多条西北—东南走向的平行山脉和宽谷组成 (图 1), 全长约 1 000 km, 宽 300 km, 绝大部分地区海拔 3 500~5 000 m<sup>[18]</sup>。祁连山自然条件复杂, 水热条件差异大, 属于典型的大陆性气候, 年均温 0.6℃ 左右, 年降水为 400~700 mm, 水分空间分布表现从东向西递减的变化趋势<sup>[19]</sup>。祁连山河流多以冰川融水补给为主, 主要河流有党河、疏勒河、北大河、黑河、石羊河、大通河和湟水<sup>[15]</sup>。植被分布受大气环流和地势格局的共同作用呈独特的垂直地带性特征, 海拔由低到高分布有荒漠草原、山地草原、山地森林草原、高山灌丛草甸、高寒草甸和高寒稀疏草甸<sup>[6]</sup>。

## 2 数据及方法

### 2.1 数据来源及预处理

本文所用数据来源于美国国家航空航天局提供的 2000—2018 年, 时间分辨率为 8 d, 空间分辨率为 1 000 m 的 MOD16A2 和 MOD13A2 数据产品, 数据可在 NASA 网站下载。利用 MODIS Reprojection Tool (MRT) 软件对下载的 MODIS 数据进行拼接,

投影转换等预处理工作,然后应用 ArcMap 软件对预处理后的数据进行裁剪,剔除无效值,并基于最大合成法生成祁连山各月 ET 数据。

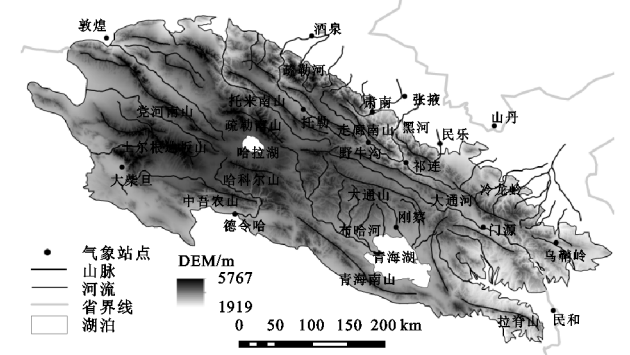


图 1 祁连山地理位置

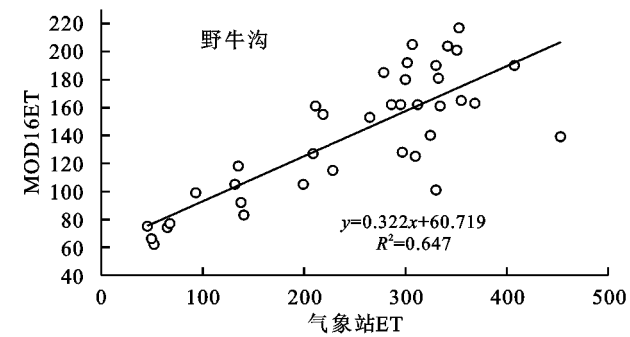
采用的气象数据来源于中国气象科学数据共享服务网,包括 2000—2016 年的月均温度,降水量,平均风速,日照时数和平均湿度 5 个气象因子数据,涵盖祁连山及周边地区的 16 个气象站点,用于讨论 ET 与各气象因子之间的相互关系。

2.2 研究方法

2.2.1 线性趋势法 本文采用线性趋势法来模拟 19 a 间祁连山地表温度变化趋势,其中变化率  $\theta_{\text{slope}}$  的计算公式为:

$$\theta_{\text{slope}} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (i \times \text{ET}_i) - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n \text{ET}_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2}$$

式中: $n$  为研究时段的累计年数; $\text{ET}_i$  为第  $i$  年的 ET;



$\theta_{\text{slope}}$  是变化率, $\theta_{\text{slope}} > 0$  说明 ET 在  $n$  年间呈增加的变化趋势;反之,即  $\theta_{\text{slope}} \leq 0$  则代表 ET 呈减小趋势<sup>[20]</sup>。在确定 ET 变化趋势的显著性水平时采用 F 检验法,并根据趋势线斜率的变化范围,定义了显著增加( $\theta_{\text{slope}} > 0, p \leq 0.05$ ),不显著增加( $\theta_{\text{slope}} > 0, p > 0.05$ ),显著减小( $\theta_{\text{slope}} \leq 0, p \leq 0.05$ ),不显著减小( $\theta_{\text{slope}} \leq 0, p > 0.05$ ) 4 种变化趋势<sup>[21]</sup>。

2.2.2 相关分析法 采用相关性分析法研究 ET 与气候因子及植被之间的关系,主要研究 ET 与气候因子及 NDVI 的相关程度,相关系数取值在  $[-1, 1]$  之间,相关系数绝对值越大,说明 ET 变化与影响因子之间的相关性越高,相关系数绝对值越低,则二者间相关性越低<sup>[22]</sup>。相关性计算公式为:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (a_i - \bar{a})(b_i - \bar{b})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (a_i - \bar{a})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (b_i - \bar{b})^2}}$$

式中: $n$  为监测时段累计年数; $a, b$  分别为相关性分析的两个变量; $\bar{a}, \bar{b}$  为变量的平均值。

2.3 MOD16 数据检验

选取研究区内拖勒,野牛沟两个气象站点 2000—2016 年的气象数据,利用彭曼公式法计算逐年月均 ET 数据,采用 Pearson 相关系数法对 MOD16 数据进行检验,结果显示(图 2)气象站 ET 与 MOD16 ET 具有较好的相关性,在 0.01 水平上具有双侧显著相关,相关系数均在 0.82 以上,表明 MOD16 数据可用于祁连山蒸散发的时空变化研究。

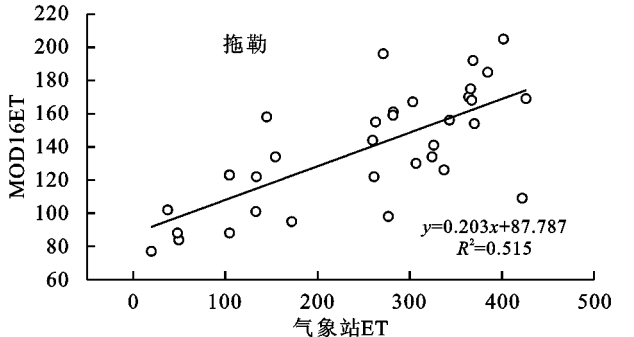


图 2 典型气象站实测 ET 与 MODIS ET 的关系

3 结果与分析

3.1 祁连山 ET 的时间变化特征

2000—2018 年祁连山 ET 年均值为 115.96 mm,最大值和最小值分别出现在 2017 年(132.15 mm)年和 2000 年(86.81 mm)。ET 的年际变化表明,近 19 a 祁连山 ET 以 1.66 mm/a 的速率微弱增加。经历了 2000—2002 年、2004—2005 年、2008—2010 年、2013—2017 年 4 个增长期,增长率分别为 14.1 mm/a,17.8 mm/a,6.3 mm/a,4.0 mm/a。而在 2003 年、2007 年、2010—2013

年,ET 呈显著减小趋势。2000—2008 年 ET 增加速率(3.02 mm/a)远大于 2009—2018 年(1.14 mm/a),2008 年以后,由于暖湿化趋势的减缓,ET 增加趋势也有所减缓,这一结论与中国西北地区近年来 ET 时间序列的研究结果一致<sup>[3]</sup>,黄会平等研究得出西北诸河区 PET 在 1992—2009 年有所增加,2009 年后又逐渐降低<sup>[10]</sup>。ET 季节性趋势分析发现,祁连山 ET 在春,夏,秋季呈增加趋势,变化率分别为 2.14%,3.74%和 0.74%,夏季有显著上升趋势,冬季 ET 以 0.05% 的速率缓慢减少(图 3A)。



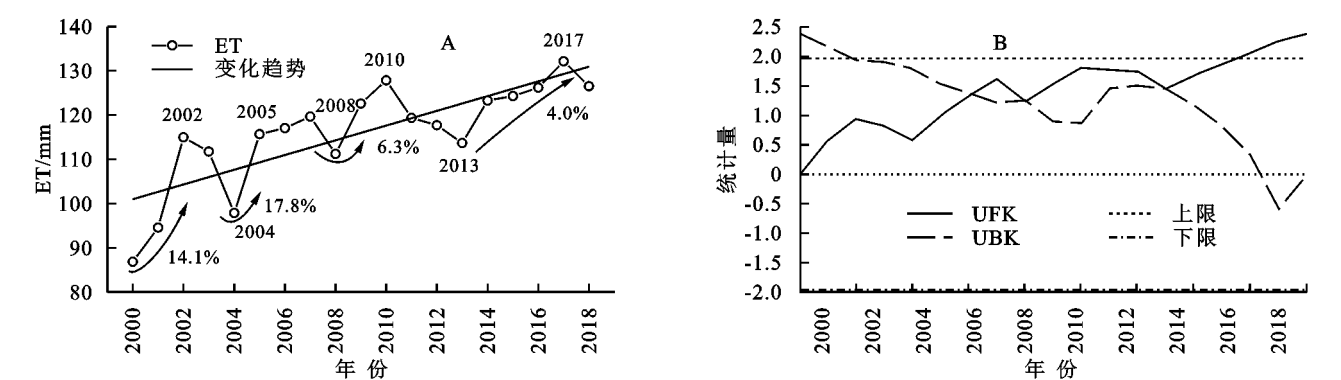


图 3 祁连山 2000—2018 年 ET 年际变化和 M-K 检验

为了解近 19 a 来祁连山 ET 的突变特征,运用 M-K 突变检测对研究区年均 ET 进行突变检验,由 UF 曲线可知,2000—2018 年期间,研究区 ET 呈不显著增加趋势,2016 年以后 ET 明显增加,达到 0.05 的显著性水平。UF 和 UB 曲线存在 3 个交点,为了进一步检验交点是否为突变点,对交点进行滑动 t 检验,结果未通过显著性检验。故按研究时段特征,将时间序列平均划分为 2000—2008 年和 2009—2018 年两个阶段,以分析不同时期祁连山 ET 的时空变化规律(图 3B)。

### 3.2 祁连山 ET 的空间变化特征

祁连山平均 ET 在 30.66~281.53 mm(图 4),受水

热条件的影响,空间分布呈东北高西南低的特征。约有 2.82%的地区 ET 值在 200 mm 以上,ET 高值区主要集中在大通河,拉脊山和托来山等东部中高海拔地区;中西部荒漠与草原交接地带,ET 值介于 100~200 mm,占总面积的 77.93%;而在西南部的大柴旦,德令哈及中吾农山 ET 值常年保持在 100 mm 以下的低值水平。祁连山 ET 的空间分布特征与植被和降水空间分布近似,刘波等认为在干旱区 ET 最重要的影响因子是水分<sup>[23]</sup>,降水直接影响土壤含水量大小,进而影响 ET 的大小,受西南暖湿气流和东南季风扩展方向的影响,祁连山降水呈东高西低的分布形式<sup>[3,24]</sup>。

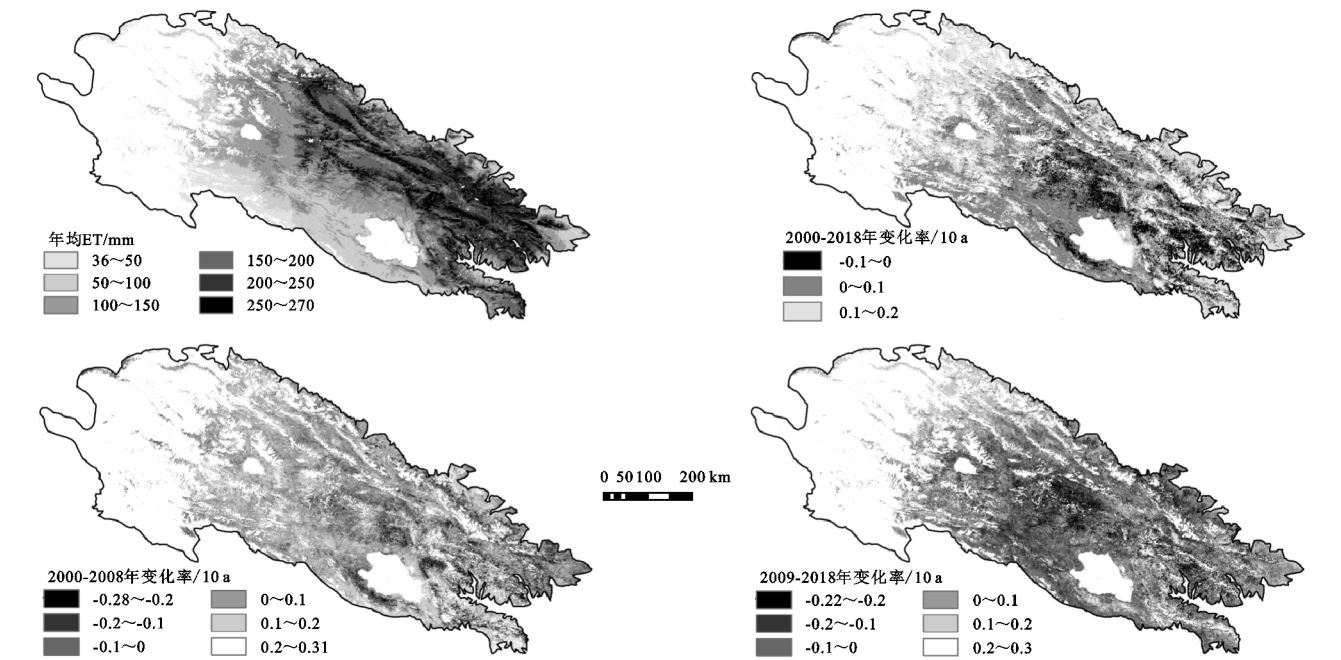


图 4 祁连山 ET 空间分布

2000—2008 年,祁连山 ET 呈显著增加趋势,显著增加面积占 21.47%,其中极显著增加为 14.21%,主要分布在哈科尔山,青海南山,西宁等南部地区及北部黑河流域。ET 显著减少区域仅占 2.37%,主要集中在东部的日月山,达坂山和大通山。2009—2018 年祁连山 ET 显著增加和减少面积分别为 9.81%和 3.56%,具有不显著增加趋势。显著改善区域主要分布于北大河和托来

山等西北部地区,而显著退化主要集中在中部的大通山,野牛沟等地。总体而言,近 19 a,祁连山 ET 以增加为主,但不同时期变化率有所不同,空间变化分布也有所差异。2008 年以前,研究区东南部 ET 显著增加,而 2008 年以后,增加趋势有所减缓,显著增加面积占比从 21.47%下降至 9.81%,显著增加区域转移至研究区的西北部,中部大通山等区域 ET 减小趋势明显。

不同植被类型下 ET 存在明显的差异(图 5),祁连山草甸 ET(56.35 mm)明显高于其他植被类型,其次为耕地ET(55.01 mm)和林地 ET(35.39 mm),荒漠 ET(34.10 mm)值最低。2000—2008 年期间,草甸,耕地,荒漠和林地 4 种植被类型 ET 显著增加面积分别为 29.94%,26.25%,46.91%和 26.58%,其中荒漠 ET 增加最为显著,而林地 ET 减少面积最大(5.46%)。2008 年以后,各植被类型 ET 值均有不同幅度的上升,荒漠年均 ET 值从 30.38 mm 上升到 41.81 mm,上升幅度最大。但是 ET 增加面积明显小于前 9 a,显著增加面积占比为

耕地(12.99%)>林地(8.47%)>草甸(7.54%)>荒漠(2.69%),显著减少面积草甸(5.83%)>林地(3.85%)>耕地(3.09%)>荒漠(1.84%)。其中,耕地 ET 增加最为显著,而草甸 ET 减少最为明显,荒漠 ET 变化率最小,最为稳定。植被对土地水源涵养具有重要意义,人工种植和灌溉,使得耕地 ET 具有明显的变异性,故而变化率最大,已有的研究显示过去 50 a 中国西北地区耕地 ET 的增加与耕地面积的扩大密切相关<sup>[25]</sup>。此外西北部稀疏植被区植被覆盖的改善对提高当地土壤水分,调节气候具有现实意义<sup>[4]</sup>。

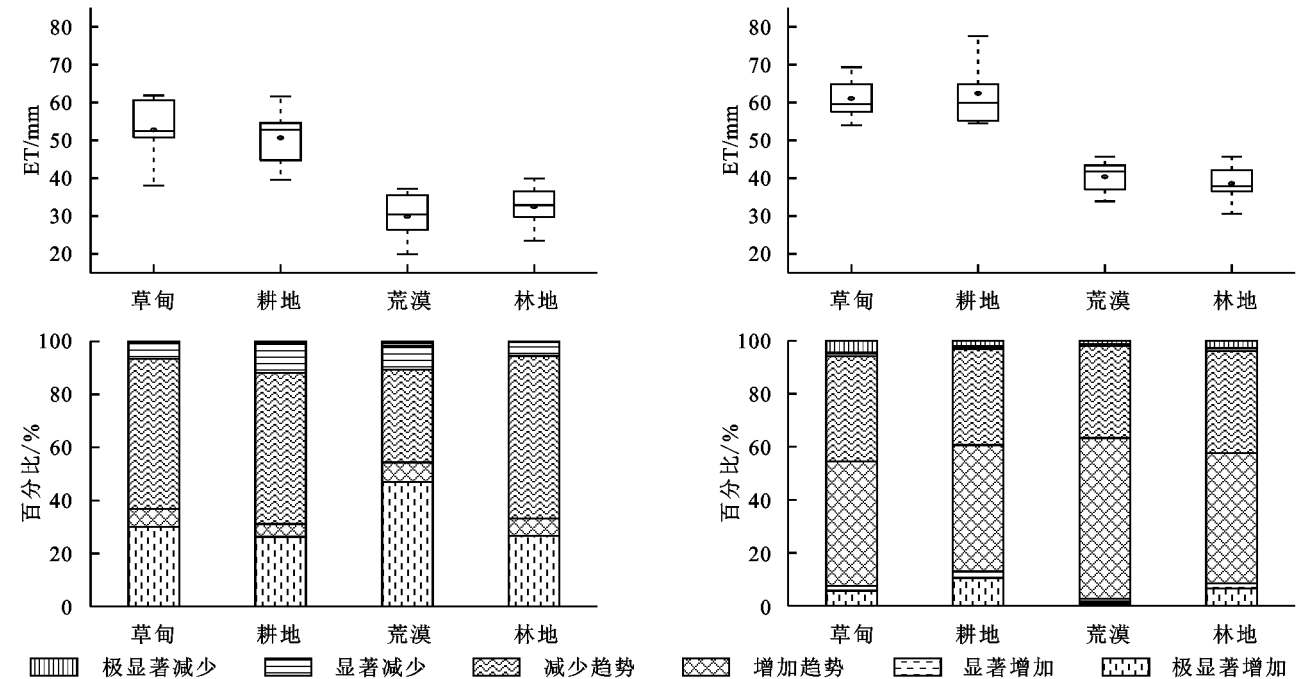


图 5 不同时期各植被类型 ET 及其变化率

3.3 ET 与气候因子的关系

本研究选取了气温,降水,风速,日照时数和相对湿度 5 个因子探讨气候对 ET 的影响(表 1),结果表明除湿度外,其余 4 个气象因子与 ET 均以正相关为主,其中风速与 ET 呈极显著正相关,气温与 ET 为显著正相关。各季节 ET 变化的主控气候因子不同,降水是春季 ET 增加的主要驱动力。夏季气温和日照时数均达到年内最高值,成为 ET 增加的主要控制因子。同时风速对 ET 正向作用也为全年最大。秋季 ET 与日照时数呈显著正相关,此外湿度对秋季 ET 变化也具有显著负向影响。冬季降水和风速对 ET 的影响逐渐减弱,气温成为 ET 变化的主要影响因子,气温与 ET 间呈显著正相关关系。ET 变化趋势是不同气象因子综合作用的结果,但总体而言,气温和风速是祁连山 ET 年际变化的主要影响因子,这与段春锋等对西北地区 ET 的研究及曹广超等对祁连山 ET 特征的讨论结果一致<sup>[6,26]</sup>。但研究区气温和风速与 ET 的相互关系仍需进一步讨论。

表 1 ET 与各气象因子的相关性

季节	气温	降水	风速	日照时数	湿度
年均	0.527 *	0.462	0.610 **	0.354	-0.015
春季	0.179	0.515 *	0.326	0.316	-0.333
夏季	0.401	0.452	0.355	0.503 *	-0.256
秋季	0.342	0.240	0.251	0.485 *	-0.561 *
冬季	0.599 *	0.154	0.152	0.375	0.040

气温作为祁连山 ET 重要的气候影响因子,对 ET 的年际变化影响以正相关为主。显著正相关面积占 6.71%,其中极显著正相关(3.29%)主要分布在托来南山,疏勒南山,哈科尔山和青海南山。2000—2008 年,气温与 ET 以显著正相关(15.86%)为主,正相关区域空间分布与 17 a 整体分布相似,但在西宁,乌鞘岭等东部地区气温的负向作用较为明显,显著负相关区域占 1.32%。2009—2016 年,气温对 ET 的影响进一步扩大,显著正相关面积上升至 19.29%,显著负相关面积也从 1.32%上升至 5.17%。但值得注意的是,东部青海南山,日月山,达坂山等负相关为主区域在 2008 年以后气温对

ET 的影响转变为正相关为主,而西部疏勒南山,哈科尔山等正相关地区则变为负相关,这可能与 2008 年以后祁连山气温的空间变化趋势有关(图 6)。

风速对 ET 的影响整体以正相关为主(图 6),但相关性不显著。极显著正相关仅占总面积的 5.32%,主要集中在西部的冷龙岭,托来山和中部的布哈河流域。显著负相关主要分布在疏勒南山,哈科尔山和中吾农山。2000—2008 年,风速对 ET 的正向作用较为显著,极显著正相关占 8.39%,尤其是在张掖等黑

河中下游地区及布哈河流域。作为西北气流和冷空气的通道,河西地区较大的风速有利于水汽传播散失,进而使 ET 增加<sup>[27]</sup>。2009—2016 年,风速对 ET 的负向影响增强,显著负相关面积由 4.14%增加至 15.21%,尤其是在西宁盆地和哈科尔山,风速对 ET 的负向作用尤为显著。这些地区人类活动对气候变化的影响较为强烈,一方面城市化规模的不断扩大使风流动阻力增大,进而影响风速。另一方面,地区 LST 明显上升也是风速减小的主要原因<sup>[28]</sup>。

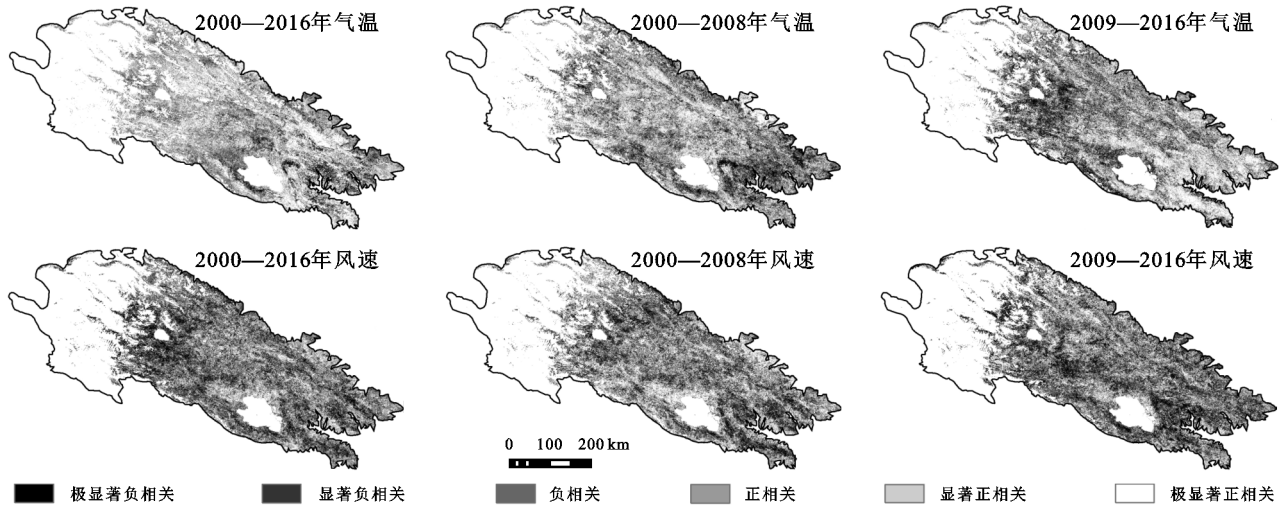


图 6 不同时期 ET 与气温及风速相关性空间分布

### 3.4 植被对 ET 变化的影响

植被覆盖亦影响 ET 的空间变化见图 7。2000—2018 年,NDVI 与 ET 以正相关为主,约有 86.70%的区域 NDVI 与 ET 呈正相关,其中极显著正相关占 21.27%,主要分布在研究区北部和南部的冷龙岭,走廊南山,青海南山,日月山等地区。仅有少部分地区 NDVI 与 ET 呈负相关,显著负相关仅占 2.49%,主要集中在大通山,达坂山和湟水等中部和东部低海拔地区,植被类型主要以耕地和草甸草原为主。2000—2008 年和 2009—2018 年两个时期 NDVI 与 ET 的相关性空间分布大致相同,与 19 a 整体分布有所差异。显著正相关区域主要集中在研究区北部和南部边缘地带的冷龙岭和青海南山南

部,分别占 24.21%和 15.13%。负相关关系在研究区中部和东部广泛分布,尤其是在大通山,日月山,青海南山,哈科尔山,布哈河等地区,NDVI 与 ET 负相关最为显著,2000—2008 年和 2009—2018 年 NDVI 与 ET 显著负相关占比分别为 7.25%和 10.97%,略高于 19 a 整体值。植被对于区域水源涵养具有重要意义,近年来祁连山中部长高山植被区随着气温的升高而呈现退化趋势,而人工绿洲的开发和耕地面积的增加也对当地水量分配和气候环境具有深远的影响<sup>[29]</sup>。此外,退耕还林和畜牧区的整治工作,促使研究区东北部植被和气候条件有所改善,从而使 ET 增加。表明人类活动在不同地区对于 ET 同时存在促进和抑制影响。

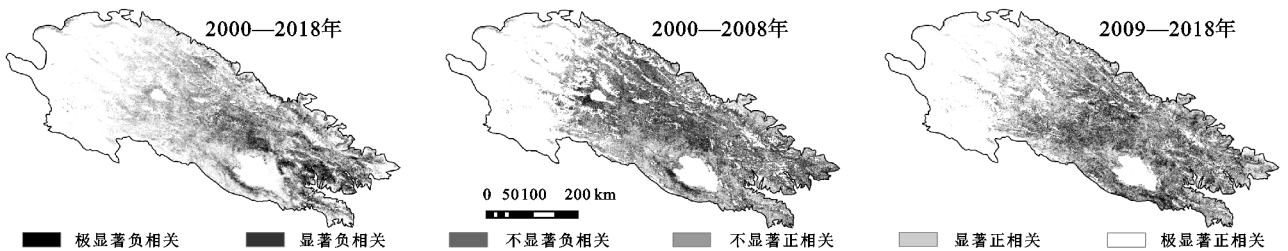


图 7 祁连山 ET 与 NDVI 相关性空间分布

时间序列上,2000—2018 年,祁连山 ET 与 NDVI 的相关系数为 0.677,呈极显著相关。并且 NDVI 与 ET 年际变化具有良好的一致性,除 2006 年,2012 年,2015—2016 年外,其余年份 NDVI 均随 ET 的变

化而变化。此外,武正丽等研究发现祁连山 NDVI 在 2008 年具有极小值<sup>[18]</sup>,徐浩杰等,蒋友严同样得出祁连山高山草原,高寒草甸,高山森林 NDVI 在 2008 年出现最小值<sup>[17,30]</sup>,植被的变异性可能是 2008



年祁连山 ET 发生突变现象的主要原因。

## 4 讨论

### 4.1 不同时期 ET 变化的影响因子分析

研究区 ET 在 2000 年时处于最低值,从 2000—2003 年迅速增加,变化率达  $9.52 \text{ mm/a}$ ,此期间气温降水也呈明显上升趋势,变化率分别为  $0.305^\circ\text{C/a}$  和  $1.213 \text{ mm/a}$ 。此结果反映了研究区的暖湿化促进了 ET 的增加。2003—2004 年,降水的减少和风速的上升是 ET 减少的主要因素。2004—2007 年期间,祁连山 ET 以  $6.676 \text{ mm/a}$  的变化率快速上升,在此期间,日照时数和降水,湿度的变化率分别为  $-4.361 \text{ h/a}$  和  $0.698 \text{ mm/a}$ ,  $1.246 \text{ mm/a}$ ,湿度在这一时期达到较高值,不利于蒸散发的增加,同时日照时数减少使得研究区热动能显著减少,但持续增加的降水增加了 ET 的可用量,使得研究区 ET 仍然有小幅上升趋势。2008 年气温,降水,风速下降到较小值,导致 ET 进入波谷期。2009—2010 年,显著增大的风速促使 ET 大幅增加,风速变化率达  $0.63 \text{ m/(s}\cdot\text{a)}$ 。同一时期气温的显著上升和湿度的减少也是 ET 增加的主要驱动因素。2011—2016 年,祁连山 ET 呈先减少后增加的变化趋势,变化率为  $1.861 \text{ mm/a}$ ,具有轻微的上升趋势,整体变化趋于稳定。此期间,降水增加和风速增大是 ET 增加的主要驱动因子,变化率分别为  $0.187 \text{ mm/a}$  和  $0.32 \text{ m/(s}\cdot\text{a)}$ 。2011—2013 年 ET 减少是风速减小和降水减少共同作用的结果。

祁连山 ET 变化是不同气象因素综合作用的结果,不同时期主要影响因子不同。2000—2008 年,气温和降水是 ET 增加的主要驱动力,然而风速和日照时数的减小及湿度的增加共同作用抵消了部分气温上升带来的正向作用,从而导致研究区潜在蒸散发呈不显著上升趋势<sup>[31]</sup>。2008 年以后,气温和水分仍是祁连山 ET 增大的主要原因,但风速和日照时数的增加同样对 ET 的增加具有促进作用。

### 4.2 不同时期 ET 空间变化的影响因子

祁连山东西部地形差异明显,不同地区气候条件,高程条件,纬度条件和植被类型的差异导致了不同地区 ET 在同一时间的控制因素不同。曹雯等认为河西走廊西段 ET 变化的主导因子为风速,且 ET 多为下降趋势,而河西走廊东段 ET 上升的主导因子是气温<sup>[31]</sup>。曹广超等对祁连山 PET 的研究结果表明气温是托勒,野牛沟和祁连 PET 变化的主要影响因素,风速对门源 PET 的影响略强于气温<sup>[6]</sup>。对 ET 与气温,风速相关性空间分布特征可知,气温对于祁连山 ET 影响远大于风速。2000—2008 年期间,祁连山 ET 增加趋势自西向东逐渐减小。西部地区气温具有轻微的上升趋势,降水也明显增加,整个研究

区气候呈暖湿化的变化趋势,与施雅风等的近 50 a 来中国西北地区的气候由暖干向暖湿转型,祁连山及其北侧的中西段地区是气候转型显著的区域<sup>[32-34]</sup>。同一时期祁连山风速整体处于下降期,减小速率为  $0.017 \text{ m/(s}\cdot\text{a)}$ ,风速减小趋势自西向东逐渐减弱,这与河西地区风速的变化趋势一致<sup>[28,35]</sup>。曹广超等分析得出风速的大幅减小是祁连山 ET 减小的主要影响因子。但祁连山西北部暖湿化对 ET 的正向作用强于风速减小的负向影响,从而使得 ET 呈轻微增加趋势<sup>[6,31]</sup>。2008 年以后,祁连山西部 ET 增加不显著,而中部地区 ET 具有明显减小趋势。造成祁连山中中部地区 ET 明显下降的可能原因归纳为自然原因和人为原因,其中气温和降水中心的向东偏移可能是西部和中部 ET 减小的主要原因,此外,气温上升和人类活动导致的中部草甸植被退化和城市化进程使得风速持续减小,对 ET 的影响也不容忽略,气候空间变化,植被变化及人类活动综合导致 2008 年以后祁连山 ET 呈中部显著减小西北不增加的空间变化趋势。

## 5 结论

(1) MOD16 ET 数据与基于彭曼公式计算得出的气象站 ET 相关性显著,可有效应用于祁连山 ET 时空变化规律的研究。

(2) 祁连山 ET 以  $1.66 \text{ mm/a}$  的速率小幅增加,在 2000—2008 年、2009—2018 年两个时期的变化率分别为  $3.02 \text{ mm/a}$  和  $1.14 \text{ mm/a}$ 。2008 年以后,由于气温和降水变化幅度的减小,ET 变化亦有所减缓;空间上 ET 整体呈西北升高东南降低的变化趋势,不同时期 ET 变化空间差异显著。2000—2008 年 ET 显著减少区域集中在研究区东部地区。2008 年以后,ET 显著增加区域面积有所减小,由 2000—2008 年期间的 21.47% 下降至 9.81%。显著减少区域由 2.37% 增加至 3.56%,中部大通河等地区 ET 明显减小。

(3) NDVI 与 ET 变化关系显著,约有 86.70% 的区域 NDVI 与 ET 呈正相关,其中极显著正相关占 21.27%。ET 与 NDVI 在空间分布和时间序列上均具有一致性。2008 年以后,祁连山中中部植被退化是 ET 减小的另一重要原因。不同植被类型 ET 表现为草甸 ET > 耕地 ET > 林地 ET > 荒漠 ET,其中耕地 ET 增加最为显著,草甸 ET 下降最明显。

(4) 气温和风速是祁连山 ET 变化的主要影响因子,气温和降水的空间变化使得不同时期 ET 空间变化差异显著。2000—2008 年祁连山西北部高海拔地区的暖湿化是 ET 增加的直接原因。2008 年以后,气温和降水中心偏移,城市化进程使得中部和东部地区风速持续减小,ET 减小是人为因素和自然因素共同作用的结果。

## 参考文献:

- [1] Zhang T, Chen Y. Analysis of dynamic spatiotemporal changes in actual evapotranspiration and its associated factors in the Pearl River Basin based on MOD16[J]. *Water*, 2017,9(11):832-850.
- [2] Ramoelo A, Majozi N, Mathieu R, et al. Validation of global evapotranspiration product (mod16) using flux tower data in the African Savanna, South Africa[J]. *Remote Sensing*, 2014,6(8):7406-7423.
- [3] 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.
- [4] 张静,任志远.基于 MOD16 的汉江流域地表蒸散发时空特征[J].*地理科学*,2017,37(2):274-282.
- [5] 赵荣,陈少辉.基于台站和 MOD16 数据的山东省蒸散及潜在蒸散时空变化[J].*地理科学进展*,2017,36(8):1040-1047.
- [6] 曹广超,张航,曹生奎,等.祁连山南坡潜在蒸散量变化特征及其影响因子分析[J].*青海师范大学学报(自科版)*,2016,32(3):43-50.
- [7] Zheng C, Wang Q. Spatiotemporal variations of reference evapotranspiration in recent five decades in the arid land of Northwestern China[J]. *Hydrological Processes*, 2014,28(25):6124-6134.
- [8] 刘昌明,张丹.中国地表潜在蒸散发敏感性的时空变化特征分析[J].*地理学报*,2011,66(5):579-588.
- [9] 吴霞,王培娟,霍治国,等.1961—2015 年中国潜在蒸散时空变化特征与成因[J].*资源科学*,2017,39(5):964-977.
- [10] 黄会平,曹明明,宋进喜,等.1957—2012 年中国参考作物蒸散量时空变化及其影响因子分析[J].*自然资源学报*,2015,30(2):315-326.
- [11] 刘宪锋,潘耀忠,张锦水,等.1960—2011 年西北五省潜在蒸散的时空变化[J].*应用生态学报*,2013,24(9):2564-2570.
- [12] 张彩霞,花婷,郎丽丽.河西地区潜在蒸散发量变化及其敏感性分析[J].*水土保持研究*,2016,23(4):357-362.
- [13] 李念,孙维君,秦翔,等.祁连山老虎沟地区高寒草甸蒸散发估算[J].*干旱区资源与环境*,2016,30(6):173-178.
- [14] 田辉,文军,马耀明,等.夏季黑河流域蒸散发量卫星遥感估算研究[J].*水科学进展*,2009,20(1):18-24.
- [15] 刘春雨,赵军,刘英英,等.石羊河流域蒸散发量遥感估算及时空格局分析[J].*国土资源遥感*,2011,23(3):117-122.
- [16] 戴声佩,张勃.基于 GIS 的祁连山植被 NDVI 对气温降水的旬响应分析[J].*生态环境学报*,2010,19(1):140-145.
- [17] 徐浩杰,杨太保,曾彪.2000—2010 年祁连山植被 MODIS NDVI 的时空变化及影响因素[J].*干旱区资源与环境*,2012,26(11):87-91.
- [18] 武正丽,贾文雄,赵珍,等.2000—2012 年祁连山植被覆盖变化及其与气候因子的相关性[J].*干旱区地理:汉文版*,2015,38(6):1241-1252.
- [19] 张存杰,郭妮.祁连山区近 40 年气候变化特征[J].*气象*,2002,28(12):33-39.
- [20] Guo X Y, Zhang H Y, Wang Y Q, et al. Comparison of the spatio-temporal dynamics of vegetation between the Changbai Mountains of eastern Eurasia and the Appalachian Mountains of eastern North America[J]. *Journal of Mountain Science*, 2018,15(1):1-12.
- [21] 马磊,闫浩文,何毅,等.2001—2015 年喜马拉雅南麓地区植被变化遥感监测[J].*干旱区地理*,2017,40(2):405-414.
- [22] Ling H, Wenjie F, Huazhong R, et al. Spatiotemporal dynamics in vegetation GPP over the Great Khingan Mountains using GLASS products from 1982 to 2015[J]. *Remote Sensing*, 2018,10(3):488-510.
- [23] 刘波,肖子牛,马柱国.中国不同干湿区蒸发皿蒸发和实际蒸发之间关系的研究[J].*高原气象*,2010,29(3):629-636.
- [24] 贾文雄.近 50 年来祁连山及河西走廊降水的时空变化[J].*地理学报*,2012,67(5):631-644.
- [25] Chen X, Mo X, Hu S, et al. Contributions of climate change and human activities to ET and GPP trends over North China Plain from 2000 to 2014[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2017,27(6):661-680.
- [26] 段春锋,缪启龙,曹雯.西北地区参考作物蒸散变化特征及其主要影响因素[J].*农业工程学报*,2011,27(8):77-83.
- [27] 刘普幸,卓玛兰草.甘肃省 1960—2008 年潜在蒸散量时空变化及其影响因子[J].*自然资源学报*,2012,27(9):1561-1571.
- [28] 刘艳艳,张多勇,张耀宗,等.1958—2012 年河西走廊风能资源时空变化特征及影响因素分析[J].*中国农业资源与区划*,2016,37(10):188-195.
- [29] Guan Q, Yang L, Pan N, et al. Greening and browning of the Hexi Corridor in Northwest China: Spatial patterns and responses to climatic variability and anthropogenic drivers[J]. *Remote Sensing*, 2018,10(8):1270.
- [30] 蒋友严,杜文涛,黄进,等.2000—2015 年祁连山植被变化分析[J].*冰川冻土*,2017,39(5):1130-1136.
- [31] 曹雯,申双和,段春锋.西北地区生长季参考作物蒸散变化成因的定量分析[J].*地理学报*,2011,66(3):407-415.
- [32] 施雅风,沈永平,胡汝骥.西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初步探讨[J].*冰川冻土*,2002,24(3):219-226.
- [33] 黄小燕,张明军,贾文雄,等.中国西北地区地表干湿变化及影响因素[J].*水科学进展*,2011,22(2):151-159.
- [34] 贾文雄,何元庆,李宗省,等.祁连山及河西走廊气候变化的时空分布特征[J].*中国沙漠*,2008,28(6):1151-1155.
- [35] 张克新,潘少明,曹立国.1961—2010 年河西地区平均风速时空变化趋势分析[J].*地理科学*,2014,34(11):1404-1408.