

# 2000—2014年天山山区蒸散发时空动态特征

邓兴耀<sup>1,2,3</sup>, 姚俊强<sup>4</sup>, 刘志辉<sup>2,3</sup>, 刘洋<sup>1,2,3</sup>

(1. 新疆大学 资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830046; 2. 新疆大学 干旱生态环境研究所, 乌鲁木齐 830046;  
3. 新疆大学 绿洲生态教育部重点实验室, 乌鲁木齐 830046; 4. 中国气象局 乌鲁木齐沙漠气象研究所, 乌鲁木齐 830002)

**摘要:**利用 MODIS ET 数据集中 2000—2014 年的地表实际蒸散发量产品, 运用变异系数、Theil-Sen median 趋势分析与 Mann-Kendall 检验和 Hurst 指数法, 探讨了中国天山山区蒸散发的空间格局、空间异质性和时间变化特征及未来趋势预测。研究表明: (1) 2000—2014 年天山山区蒸散发量总体较高, 蒸散发量大于 400 mm 的区域占总面积的 49.172%。受降水量控制, ET 在空间上有西部大东部小、北部大南部小的特点; 受土地覆盖的影响, ET 的高值区 (>400 mm) 主要为山区的林地和草地, 而低值区 (<200 mm) 主要为稀疏植被区, 不同土地覆盖的 ET 大小为: 农用地 > 林地 > 草地 > 稀疏植被。(2) 近 15 a 全区蒸散发变异程度不明显, 以相对较低的波动变化为主, 面积比例为 45.140%, 其中高波动变化的区域是受土地覆盖演变的影响。(3) 15 a 间全区年均蒸散发量大致分布在 305~387 mm, 呈波动变化, 总体有减小趋势, 变化率为 -2.911 6 mm/a。基于像元尺度的分析也表明全区 ET 以减小的变化趋势为主, 面积比例为 83.022%。天山山区蒸散发量的减小趋势, 是区域降水量减少所致。(4) 全区 ET 的 Hurst 指数均值为 0.747, Hurst 指数大于 0.5 的范围所占比例为 86.382%。未来全区蒸散发的变化趋势以持续性减小为主, 面积比例为 69.888%, 其中 15.589% 区域的变化趋势无法确定。

**关键词:** 蒸散发; MODIS; 天山山区; 降水量; 趋势分析

**中图分类号:** P426.2

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2017)04-0266-08

## Spatiotemporal Dynamic Change Characteristics of Evapotranspiration in Tianshan Mountains from 2000 to 2014

DENG Xingyao<sup>1,2,3</sup>, YAO Junqiang<sup>4</sup>, LIU Zhihui<sup>2,3</sup>, LIU Yang<sup>1,2,3</sup>

(1. College of Resources and Environment Science, Xinjiang University, Urumqi 830046, China; 2. Institute of Arid Ecology and Environment, Xinjiang University, Urumqi 830046, China; 3. Key Laboratory of Oasis Ecology of Education Ministry, Xinjiang University, Urumqi 830046, China; 4. Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration, Urumqi 830002, China)

**Abstract:** Using MODIS ET data of actual surface evapotranspiration products that were concentrated from 2000 to 2014, we used variable coefficients, the Theil-Sen median trend analysis, Mann-Kendall test, and Hurst index, to investigate the spatial pattern of evapotranspiration, spatial heterogeneity, characteristics of time variation, and future trends considering the Tianshan Mountains. The results showed as the following. (1) Evapotranspiration over the entire region was very high from 2000 to 2014, and the area with evapotranspiration greater than 400 mm accounts for 49.172% of the total area. Affected by precipitation, evapotranspiration is high in the west and north, but low in the east and south. Affected by land cover types, areas with higher value of evapotranspiration (more than 400 mm) mainly included the mountain forestland and grassland, but the area with low value of evapotranspiration (less than 200 mm) concentrated in sparse vegetation region. Evapotranspiration data decreased in the order: cropland > forestland > grassland > sparse vegetation. (2) The degree of variation in evapotranspiration over the past 15 years for the entire region is not obvious, but shows a slight fluctuation. The proportion of areas with slight fluctuations accounts for 45.140% of the total area. Among them, the region of high fluctuation was caused by the change of land cover types. (3) The value of evapotranspiration over

收稿日期: 2016-06-23

修回日期: 2016-07-03

资助项目: 国家科技支撑计划项目课题(2012BAC23B01); 水利部公益性行业科研专项经费项目(201301103); 新疆维吾尔自治区研究生科技创新项目(XJGRI2015019)

第一作者: 邓兴耀(1992—), 男, 甘肃武威人, 硕士研究生, 研究方向为水文与水资源学。E-mail: xjdengxingyao@163.com

通信作者: 刘志辉(1957—), 男, 新疆石河子人, 教授, 博士生导师, 从事干旱区流域水文过程机理方面的研究。E-mail: lzhi@xju.edu.cn

the past 15 years for the entire region varied from 305 mm to 387 mm and shows changes in the fluctuations with a weakly decreasing trend with the change rate of  $-2.9116$  mm/year. An analysis based on the pixel scale also shows a mainly decreasing trend, the area with decrease trend accounts for 83.022% of the total area. This decrease trend of regional evapotranspiration was caused by the decrease of precipitation. (4) The Hurst index average of evapotranspiration for the entire region is 0.747. The area with Hurst index greater than 0.5 accounts for 86.382% of the total area. The change trend of evapotranspiration in the future for the entire region is mainly towards a persistent decrease and this area accounts for 69.888% of the total area. However, the trend of changes for 15.589% of the area cannot be determined.

**Keywords:** evapotranspiration; MODIS; the Tianshan Mountains; precipitation; trend analysis

蒸散发(Evapotranspiration, ET)包括土壤、水面蒸发和植被蒸腾,连接着地表水分、能量和碳的循环过程,是构成气候系统的中心环节<sup>[1]</sup>。研究陆面过程中的蒸散发,对旱涝监测、水资源管理及生态保护和修复等领域有重要意义<sup>[2]</sup>。基于地面观测的资料可以得到长时间序列的蒸散发信息,但站点观测值并不能提供区域蒸散发的空间分布信息,尤其是在站点稀疏的高寒山区。结合遥感技术可以反映蒸散发的空间格局,满足全球和区域尺度的研究。Jung等<sup>[3]</sup>利用全球监测网、气象和遥感数据发布了1982—2008年全球陆地蒸散发年尺度数据集;欧洲气象卫星应用组织发布了覆盖欧洲、非洲和南美洲东部的LSA-SAF MSG ET数据集<sup>[4]</sup>;美国蒙大拿大学森林学院工作组制作了2000年至今的全球MODIS ET (MOD16)数据集<sup>[5]</sup>。其中,MODIS ET数据集凭借较高模拟精度和时空分辨率,已成功应用于全球和区域蒸散发的动态监测<sup>[6-9]</sup>。天山山区位于欧亚大陆腹地,是中温带准噶尔盆地和暖温带塔里木盆地的分界线,是影响新疆乃至我国中、西部地区天气气候和生态环境的重要天然屏障<sup>[10]</sup>。天山山系巨大,结构复杂,不同海拔梯度的水热组合形成了复杂的山地生态系统,有独特的植被类型、生物多样性和自然景观<sup>[11]</sup>。在此背景下,区域天气气候和人类活动共同驱动下的天山山区地表实际蒸散发量的时空分布及变化研究受到诸多学者的关注。Zhang等<sup>[12]</sup>在天山乌鲁木齐河源,利用小型蒸渗仪资料计算了1986年和1991年不同下垫面状况下的日尺度地表实际蒸散发量,并分析了蒸散发量与土壤湿度、大气温度、风速等要素的关系;郭淑海等<sup>[13]</sup>利用小型蒸渗仪观测了阿克苏河上游天山高寒草甸的蒸散发,并利用最小二乘支持向量机估算地表实际蒸散发量;张明军等<sup>[14]</sup>利用1960—2006年天山山区24个气象站的资料,计算了区域日、月、季和年尺度潜在蒸发量,认为天山年潜在蒸发量自60年代以来呈波状减小趋势,1986年之后减小趋势更加明显,2000年以后呈增加趋势。

但由于干湿背景各异,潜在蒸散发量和实际蒸散发量之间的关系尚存在较大争论<sup>[15-16]</sup>。

可见,目前针对天山山区蒸散发的研究成果较多,但这些研究选用的站点资料有限,或以整体分析为主,缺乏不同时空维度的变异性研究,难以反映天山特殊的山地生态系统的异质性,对全区未来蒸散发变化趋势的定量研究还相对比较薄弱。本文探讨该地区蒸散发的时空变化规律和未来的变化趋势,为山区水资源的合理开发利用提供科学依据并为生态环境保护措施提供参考。

## 1 研究区概况

天山是亚洲中部最大的山系,位于中国境内的东天山西起中国与吉尔吉斯斯坦边界,东至哈密市以东的星星峡戈壁,东西长达1700 km,南北宽250~350 km,约占总长度的2/3,作为南疆和北疆的地理分界线,天山山区平均海拔4000 m,由一系列山脉、山间盆地、谷地及山前平原等地貌单元组成。山区降水丰富、积雪覆盖、冰川发育,孕育了众多河流和湖泊,全疆65%的河流源于此<sup>[17]</sup>,是天山南北水资源的主要来源。

## 2 数据与方法

### 2.1 数据来源

MODIS ET数据集包括地表实际蒸散发量(ET)、潜热通量(LE)、潜在蒸散发量(PET)和潜在潜热通量(PLE)产品,空间分辨率为1 km×1 km,时间分辨率有8 d,1月和1 a。其算法是Mu等<sup>[18]</sup>在Penman-Monteith公式基础上改进的,反演流程见图1。本文选用地表实际蒸散发数据的年合成产品(MOD16A3),时间序列从2000年1月至2014年12月,在美国蒙大拿大学森林学院工作组网站下载(<http://www.ntsg.umn.edu/project/mod16>)。DEM数据为SRTM3(Shuttle Radar Topography Mission),空间分辨率为90 m×90 m,来自中国科学院数据云(<http://www.csdb.cn/>)。土地覆盖数据为

2001 年和 2013 年的 MODIS MCD12Q1 产品(下载地址: <https://lpdaac.usgs.gov/>), 空间分辨率为 500 m, 该产品采用国际地圈生物圈计划全球植被分类方案, 将地表类型分为 17 种, 本文将其合并为水体、林地、草地、农用地、城市和建筑区、冰雪与稀疏植被 7 大类。

降水资料为英国 East Anglia 大学气候研究中心 (Climatic Research Unit, CRU) 发布的全球陆地表面月平均气候数据集 (<http://www.uea.ac.uk/>), 空

间分辨率  $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ , 选取的时间序列为 2000 年 1 月至 2014 年 12 月。该资料不包含卫星观测, 不使用模式同化, 仅用数学方法对数据进行整合和插值<sup>[19]</sup>。CRU 气候资料尽管包含插值带来的误差, 但经对比, CRU 降水除青藏高原西部外与中国台站的观测具有很好的一致性<sup>[20]</sup>, 故可用于本文的研究。径流数据为水文站的观测, 选取研究区 3 个典型流域, 包括天山北坡的呼图壁河, 天山南坡的阿克苏河与开都河。降水数据为各流域内及周边 14 个气象站的实测。

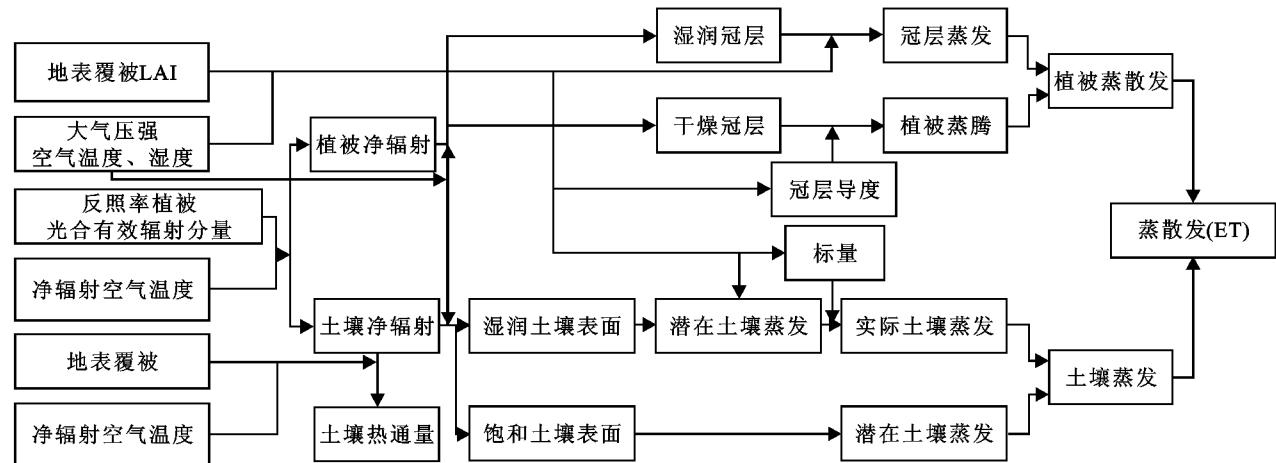


图 1 MOD16 ET 反演算法流程

2.2 研究方法

采用流域水量平衡法验证 MOD16A3 产品在天山山区的模拟精度<sup>[6]</sup>; 变异系数是描述随机变量分散程度的统计量, 用来分析蒸散发空间格局与空间分异规律<sup>[21]</sup>; Mann-Kendall 检验已经在水文、气象的时间序列分析中得到成功应用<sup>[22-23]</sup>, 与 Theil-Sen median 趋势分析相结合, 以判断时间序列中 ET 是否具有上升或下降的趋势<sup>[24]</sup>; Hurst 指数用于定量描述时间序列数据的可持续性, 在水文学、经济学、气候学等领域有着广泛的应用<sup>[25]</sup>。以上研究方法的具体原理和计算过程参阅相关文献。

3 结果与分析

3.1 MOD16A3 蒸散发产品精度验证

分析表 1, 水量平衡法计算的多年蒸散发量均值与 MOD16A3 数据的年均蒸散发量较为吻合, 二者的平均绝对误差为 44.30 mm, 平均相对误差为 13.72%, 均方根误差为 44.58 mm。MODIS ET 产品的年蒸散发值总体偏高, 但其精度基本满足区域尺度的研究, 可以用于研究天山山区蒸散发的时空动态特征。

3.2 蒸散发量的空间分布特征

将 2000—2014 年的 MODIS 蒸散发量、CRU 降水数据逐像元逐年平均(图 2), 分析 ET 的空间分布特征。

表 1 天山山区典型流域 MOD16 A3 数据精度评价

典型 流域	MOD16A3 数据的 水量平衡法计算		绝对 误差/mm	相对 误差/%
	年均蒸散发量/ mm	的多年蒸散发量 均值/mm		
呼图壁河	415.24	377.73	37.51	9.93
阿克苏河	321.84	272.40	49.44	18.15
开都河	397.53	351.59	45.94	13.07

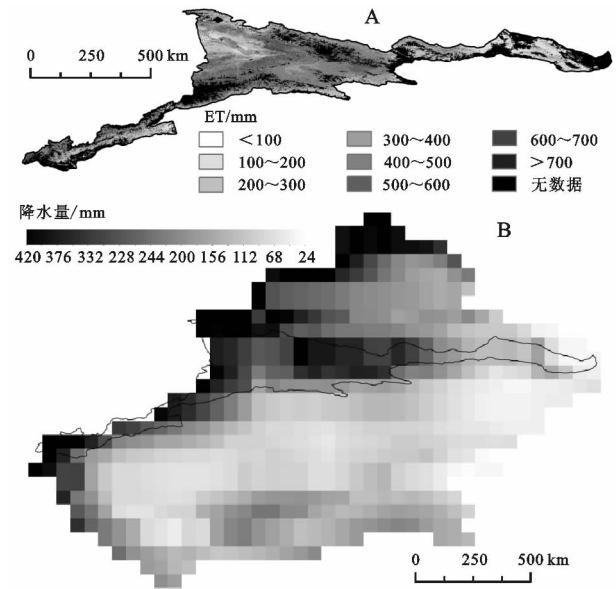


图 2 2000—2014 年天山山区年均 ET 空间分布(A)、新疆年均降水量空间分布(B)  
将年均 ET 值分为 8 级, 进行像元统计分析(表

2)。近 15 a 天山山区 ET 值总体较高,全区高蒸散发区域( $ET > 400$  mm)占总面积的 49.172%,低蒸散发区域( $ET < 200$  mm)占总面积的 10.149%。

表 2 天山山区年均 ET 分级

蒸散发/mm	占总面积百分比/%
$\leq 100$	0.005
$100 < ET \leq 200$	10.144
$200 < ET \leq 300$	19.185
$300 < ET \leq 400$	21.494
$400 < ET \leq 500$	32.452
$500 < ET \leq 600$	15.714
$600 < ET \leq 700$	0.987
$> 700$	0.019

2000—2014 年天山山区年均蒸散发量在空间分布上有西部大东部小、北部大南部小的特点(图 2A)。ET 的高值区( $> 400$  mm)主要位于山区中西段,伊犁河谷周围的 ET 值最大。而 ET 的低值区( $< 200$  mm)主要在天山  $90^{\circ}E$  以西,ET 在天山山区北坡大于南坡。究其原因,干旱区的实际蒸散发主要受水分状况(降水量)控制,降水直接影响地表土壤含水率大小,进而影响蒸散发量大小<sup>[26]</sup>。天山山区位于降水量稀少的干旱区,但是地处气候过渡带,是我国西北干旱区最大的降水中心,被称为干旱区的“湿岛”<sup>[10]</sup>,造成全区 ET 值总体较高。分析新疆降水量分布(图 2B)可以看出,天山山区西部距大西洋较近的伊犁河谷具有特殊的喇叭口地形,使水汽得以充分进入,并在地形抬升作用下形成丰沛降水,水汽在长距离向东输送过程中,相对湿度持续降低,故山区降水由西至东逐渐减少;来自大西洋和高纬北冰洋的湿润气流在天山北坡受地形抬升,而在南部由于背风坡的雨影效应,导致北坡降水较南坡丰沛。上述降水量的空间分布格局造成了天山山区蒸散发量西部高于东部、北坡(迎风坡)大于南坡(背风坡)的特点。

此外,蒸散发的空间格局亦受土地覆盖的影响。分析图 3 可知,ET 的高值区主要为山区的林地和草地,低值区主要为稀疏植被区。同时,伊犁河谷农用地的 ET 值较高。为说明不同土地覆盖类型的蒸散发量特征,统计研究区典型的 4 种土地覆盖的 ET 平均值(图 4),各土地覆盖类型的 ET 平均值为:农用地 $>$ 林地 $>$ 草地 $>$ 稀疏植被,这是因为不同土地覆盖的动力和热力性质存在差异,导致地气相互作用中能量的重新分配<sup>[27]</sup>。农用地因人工种植和灌溉,其植被覆盖度和土壤水分都高于农用地边缘的草地,使得蒸散发表现出显著的空间异质性。

由于 MODIS ET 数据集对于无植被覆盖的裸土、戈壁等区域的蒸散发量不进行计算,故将无植被

覆盖的低山带和高山荒漠带的 ET 值设置为 NoData,且不计入面积统计范围。

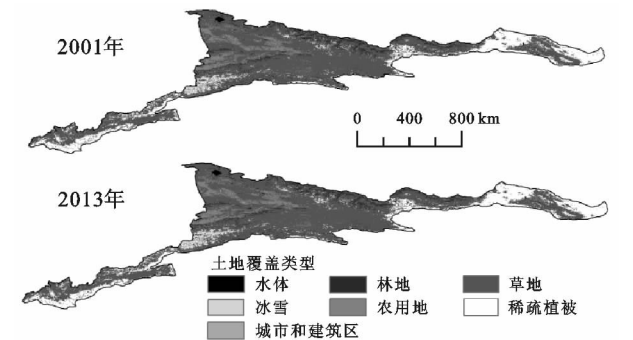


图 3 2001 年和 2013 年天山山区土地覆盖的空间变化

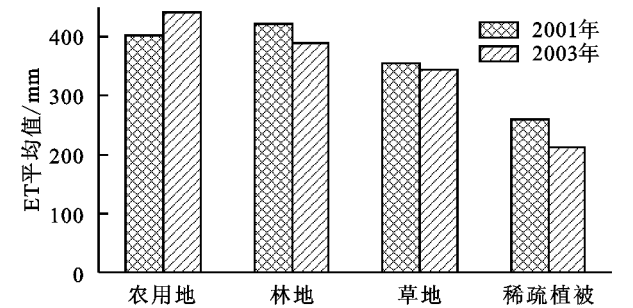


图 4 2001 年和 2013 年天山山区 4 种土地覆盖的 ET 平均值

3.3 蒸散发量的区域分异特征

逐像元计算 2000—2014 年 ET 的变异系数( $CV_{ET}$ ),统计分析蒸散发量在时间序列上的稳定性(图 5)。 $CV_{ET}$ 值越大,表明各年份之间 ET 值分布越离散,时序不稳定;反之,表明各年份之间 ET 值分布较为集中,时序较为稳定。将计算结果分为 5 级(表 3)。从整体上看,全区蒸散发变异程度以相对较低的波动变化和中等波动变化为主,面积百分比分别为 45.140%和 35.281%。

从图 5 可以看出,伊犁河谷蒸散发呈高波动变化( $CV_{ET} > 0.20$ ),是因为河谷内耕地面积扩大、种植结构调整和种植品种变化等人为因素引起区域 NDVI 的波动<sup>[28]</sup>,导致蒸散发量年际变化不稳定;低波动变化( $CV_{ET} \leq 0.05$ )区域主要有:和静县乌拉斯台、大尤路都斯盆地西部边缘及伊犁河谷南部的哈尔克他乌山北坡。

表 3 天山山区 ET 值的变异系数统计

ET 的变异系数	变异程度	占总面积百分比/%
$CV_{ET} \leq 0.05$	低波动变化	5.527
$0.05 < CV_{ET} \leq 0.10$	相对较低的波动变化	45.140
$0.10 < CV_{ET} \leq 0.15$	中等波动变化	35.281
$0.15 < CV_{ET} \leq 0.20$	相对较高的波动变化	12.145
$CV_{ET} > 0.20$	高波动变化	1.908

3.4 蒸散发量的时间变化特征

将 2000—2014 年 MODIS ET 的均值和 CRU 降水量作一元线性回归分析(图 6),探讨天山山区蒸散发

量随时间变化的特征。15 a 间,全区蒸散发量大致分布在 305~387 mm,最小值在 2008 年(305.96 mm),最大值在 2002 年(387.15 mm),蒸散发量与降水量的变化趋势是一致的,二者的相关系数为 0.663,总体均有减小趋势,ET 的变化率为-2.911 6 mm/a,降水量的变化率为-0.350 6 mm/a。

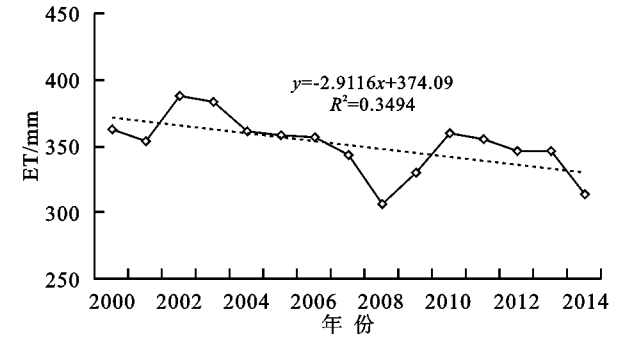


图 6 2000—2014 年天山山区年际 ET 变化、天山山区年降水量变化

结合 Theil-Sen median 趋势分析与 Mann-Kendall 检验的结果,得到 2000—2014 年全区像元尺度的蒸散发变化趋势(表 4,图 7)。在 Theil-Sen median 趋势分析中,根据计算结果  $\beta$ ,分为增强趋势( $\beta > 0$ )和衰减趋势( $\beta < 0$ )两类;在 Mann-Kendall 检验中选取显著性检验的置信水平为 0.05,将检验结果  $Z_c$  划分为显著变化( $Z_c > 1.96$  或  $Z_c < -1.96$ )和变化不显著( $-1.96 \leq Z_c \leq 1.96$ )。分析表 4,2000—2014 年全区蒸散发变化趋势以减小为主,减小区域占 83.022%,各类变化比例为:轻微减小>显著减小>轻微增加>显著增加。从变化趋势分布(图 7)可以看出:伊犁河谷的霍城—察布查尔—伊宁—巩留—新源沿线 ET 有显著增加趋势,是因为该区域有高密度的农业发展,土地覆盖的变化影响地表蒸散过程的信息链。据相关研究<sup>[29]</sup>,1985—2005 年,伊犁河谷土地利用格局发生巨大变化,其中耕地面积增加 31.53 万  $\text{hm}^2$ ,耕地的扩张主要来源于草地和未利用地。人工灌溉的耕地其土壤湿度和植被覆盖度都高于同气象条件下的草地和未利用地,所以伴随着农用地扩张的进程,伊犁河谷的蒸散发有显著增加趋势。

天山山地和平原过渡带的蒸散发为显著减小趋势。这是因为地表实际蒸散发亦受植被覆盖变化的影响,据相关研究<sup>[30-31]</sup>,1982—2012 年和 1982—2013 年天山山地和平原过渡带植被 NDVI 呈显著下降趋势。

表 4 天山山区 ET 值的变化趋势统计

$\beta$	$ Z_c $	ET 变化趋势	占总面积百分比/%
$\beta < 0$	$ Z_c  > 1.96$	显著减小	32.502
$\beta < 0$	$ Z_c  \leq 1.96$	轻微减小	50.520
$\beta > 0$	$ Z_c  \leq 1.96$	轻微增加	15.868
$\beta > 0$	$ Z_c  > 1.96$	显著增加	1.110

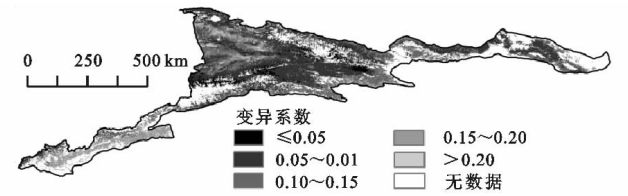


图 5 2000—2014 年天山山区 ET 值变异程度

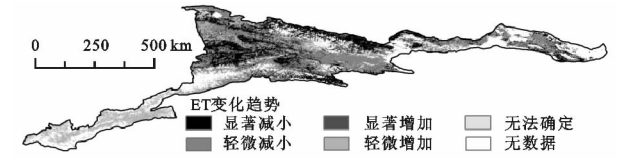
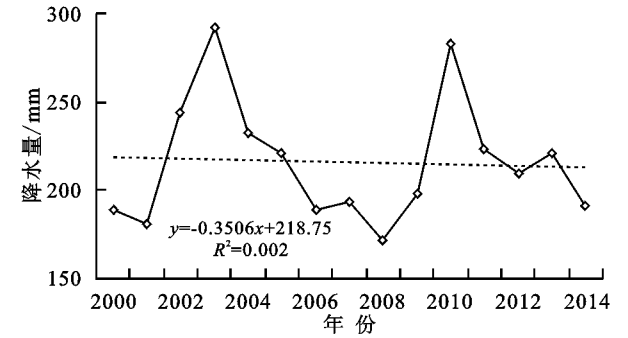


图 7 2000—2014 年天山山区 ET 变化趋势

3.5 蒸散发量的预测

利用 Hurst 指数研究蒸散发变化趋势的复杂度及对未来变化趋势进行预测,不同的 Hurst 指数( $H$ )对应不同的时间序列趋势变化:当  $H=0.5$  时,表明时间序列是完全独立的,没有相关性或只是短程相关; $0 < H < 0.5$  时,意味着未来的变化状况与过去相反,即反持续性, $H$  越小,反持续性越强;当  $H > 0.5$  时,意味着未来的变化状况与过去趋势一致,整个过程具有持续性, $H$  越大,持续性越强。计算得到 2000—2014 年天山山区蒸散发量的 Hurst 指数空间分布(图 8)。全区 ET 的 Hurst 指数均值为 0.747,Hurst 指数小于 0.5 的范围所占比例为 13.618%,大于 0.5 的比例为 86.382%,表明天山山区蒸散发的正向持续性较强,即未来的变化状况与过去趋势一致。

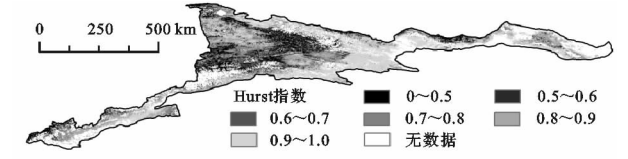


图 8 2000—2014 年天山山区 ET 的 Hurst 指数分布

为揭示 ET 未来的变化及其持续性,将 ET 的变化趋势结果(图 7)与 Hurst 指数结果(图 8)进行叠加分析,得到变化趋势与持续性的耦合结果(图 9),统计结果见表 5。全区蒸散发持续减小的面积比重为 69.888%,其中显著减小的区域主要在中天山山前剥蚀平原和山间盆地;全区持续增加的面积比重为

14.523%，其中显著增加的区域主要在伊犁河谷的种植区；全区 15.589% 的区域未来变化趋势无法确定，主要在中天山地带，该区域未来蒸散发的变化状况需要持续关注。

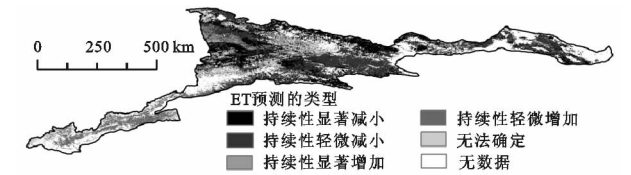


图 9 天山山区 ET 的预测

表 5 天山山区 ET 预测的类型统计

$\beta$	$ Z_c $	$H$	ET 预测的类型	占总面积百分比/%
$\beta < 0$	$ Z_c  > 1.96$	$> 0.5$	持续性显著减小	29.444
$\beta < 0$	$ Z_c  \leq 1.96$	$> 0.5$	持续性轻微减小	40.444
$\beta > 0$	$ Z_c  \leq 1.96$	$> 0.5$	持续性轻微增加	13.469
$\beta > 0$	$ Z_c  > 1.96$	$> 0.5$	持续性显著增加	1.054
—	—	$< 0.5$	无法确定	15.589

4 讨论与结论

4.1 讨论

(1) MODIS ET 数据集的反演算法考虑了土壤表面蒸发、冠层截流水分蒸发和植物蒸腾，较好地反映了山地生态系统的异质性。通过水量平衡法的验证，该产品的精度基本满足区域尺度的研究。因此，高空间分辨率的 MODIS ET 数据集可以用于揭示区域蒸散发的时空动态特征，尤其在观测站点稀疏的高寒山区。

(2) 天山山区蒸散发的空间格局受降水和土地覆盖的综合影响。天山是西北干旱区最大的降水中心，故全区 ET 值总体较高。山地北坡为迎风坡，降水量大于南麓（背风坡），伴随着大西洋水汽向东输送的过程，山区降水由西至东逐渐减少，使得天山山区蒸散发量北坡大于南坡、西部高于东部；同时，由于动力和热力性质差异，不同土地覆盖的蒸散发量差异显著：农用地>林地>草地>稀疏植被。王海波等<sup>[32]</sup>在黑河流域模拟了高寒草地和农田的蒸散发，得出生长季农田蒸散发量大于高寒草地的结论。田静等<sup>[33]</sup>利用 NOAH 陆面过程模拟了中国陆地蒸散发，认为年降雨量是决定蒸散发量大小的主要因素，西北地区不同土地利用类型的蒸散发量为：林地>耕地>草地>未利用地，与本研究的结论相似。因此，本研究的结论对认识天山山区不同空间维度的蒸散发格局增添了新的证据。

(3) 2000—2014 年天山山区蒸散发以相对较低的波动变化与中等波动变化为主，伊犁河谷发展了典型的绿洲农业，耕地面积的扩大、种植结构的调整和

种植品种的变化使得地表实际蒸散发呈高波动变化。土地利用/覆盖变化对地表蒸散发的影响已有较多探讨<sup>[34-35]</sup>，与以上研究相比，本研究有以下优势：运用变异系数法，定量分析了研究区 ET 在时间序列上的演变，探讨不同尺度的蒸散发时间变化和分异特征，揭示了山地生态系统的空间异质性。本研究的结论，对认识山地生态系统内部不同干湿背景下蒸散发的异质性提供了参考。

(4) 2000 年以来天山山区大部分区域蒸散发为减小趋势，是区域降水量减少所致，降水量减少使土壤水分降低，导致天山山区实际蒸散发量减少。这与 Roderick 等<sup>[26]</sup>认为在干旱区，实际蒸散发主要受水分状况（降水量）控制的结论是一致的。与 Nature<sup>[3]</sup>上发表的由于水分供给不足导致的全球陆面蒸散发呈下降趋势的结论是一致的。本研究对天山山区蒸散发的变化趋势增加了定量的分析，为认识区域天气气候变化和人类活动共同驱动下的高寒山区蒸散发量变化研究提供了一定参考。

(5) 对天山山区蒸散发未来趋势的预测显示，全区蒸散发持续减小的面积比重为 69.888%，这种持续减小的变化趋势，对冰川、针叶林、高寒草甸和湖泊等天山山区特殊的生态环境要素造成影响。蒸散发量的减小，对高山草原和河谷灌溉农业等有有利的影响，同时也能够缓解高寒草原的退化和山麓地带的荒漠化。随着区域气候系统的变化和人类活动的影响，蒸散发量减小的趋势是否会持续发展，山区水文循环、生态系统和地表过程将如何响应，尤其是对山区自然植被的保护和修复将产生怎样的影响，需要全面的、长序列的数据进行深入研究。

4.2 结论

(1) 利用水量平衡法验证了 MOD16A3 产品在天山山区的模拟精度，平均绝对误差为 44.30 mm，平均相对误差为 13.72%，均方根误差为 44.58 mm。MODIS ET 产品的模拟值总体偏高，但其精度基本满足区域尺度的研究。

(2) 空间格局上，近 15 a 天山山区 ET 值总体较高，ET 大于 400 mm 的区域占总面积的 49.172%。受降水量影响，ET 在空间上有西部大东部小、北部大南部小的特点，ET 的高值区(>400 mm)主要位于山区中西段，伊犁河谷周围的 ET 值最大，而 ET 的低值区(<200 mm)主要在天山 90°E 以西，ET 在天山山区北坡大于南坡；同时，受土地覆盖的影响，ET 的高值区主要为山区的林地和草地，低值区主要为稀疏植被区，不同土地覆盖的蒸散发量差异显著：农用地>林地>草地>稀疏植被。

(3) 区域分异特征方面,15 a 间天山山区蒸散发变异程度不明显,相对较低的波动变化和中等波动变化的面积比例分别为 45.140% 和 35.281%。伊犁河谷的高波动变化与区域耕地面积扩大、种植结构调整和种植品种变化等人为因素有关;低波动变化区域有乌拉斯台、大尤路都斯盆地西部及哈尔克他乌山北坡。

(4) 在时间演变上,近 15 a 天山山区年均蒸散发量大致分布在 305~387 mm,呈波动变化,总体有减小趋势,变化率为 $-2.9116\text{ mm/a}$ ,蒸散发量与降水量的变化是一致的,均为减小趋势,且二者相关系数为 0.663。

基于像元尺度的分析也表明全区 ET 变化趋势以减小为主,减小区域占 83.022%,各类变化比例为:轻微减小>显著减小>轻微增加>显著增加。其中,伊犁河谷的霍城—察布查尔—伊宁—巩留—新源沿线蒸散发有显著增加趋势,与土地覆盖演变有关;天山山地和平原过渡带的蒸散发为显著减小趋势,是受植被覆盖变化的影响。

(5) 对未来趋势的预测方面,天山山区 ET 的 Hurst 指数均值为 0.747, Hurst 指数大于 0.5 的范围所占比例为 86.382%,表明全区蒸散发未来的变化状况与过去趋势一致。具体来讲,全区蒸散发持续减小的面积比重为 69.888%,其中显著减小的区域主要在中天山山前剥蚀平原和山间盆地;全区持续增加的面积比重为 14.523%,其中显著增加的区域主要在伊犁河谷的种植区;全区 15.589% 的区域未来变化趋势无法确定,主要在中天山地带,该区域未来蒸散发的变化状况需要持续关注。

#### 参考文献:

- [1] Xiong Y J, Zhao S H, Tian F, et al. An evapotranspiration product for arid regions based on the three-temperature model and thermal remote sensing[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 530: 392-404.
- [2] Zhang K, Pan S, Zhang W, et al. Influence of climate change on reference evapotranspiration and aridity index and their temporal-spatial variations in the Yellow River Basin, China, from 1961 to 2012[J]. *Quaternary International*, 2015, 380: 75-82.
- [3] 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.
- [4] Ghilain N, Arboleda A, Gellens-Meulenberghs F. Evapotranspiration modelling at large scale using near-real time MSG SEVIRI derived data[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2011, 15(3): 771-786.
- [5] Mu Q, Heinsch F A, Zhao M, et al. Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 111(4): 519-536.
- [6] 贺添,邵全琴. 基于 MOD16 产品的我国 2001—2010 年蒸散发时空格局变化分析[J]. *地球信息科学学报*, 2014, 16(6): 979-988.
- [7] Kim H W, Hwang K, Mu Q, et al. Validation of MODIS16 global terrestrial evapotranspiration products in various climates and land cover types in Asia[J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2012, 16(2): 229-238.
- [8] Liu S M, Xu Z W, Zhu Z L, et al. Measurements of evapotranspiration from eddy-covariance systems and large aperture scintillometers in the Hai River Basin, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 487: 24-38.
- [9] Jang K, Kang S, Lim Y J, et al. Monitoring daily evapotranspiration in Northeast Asia using MODIS and a regional Land Data Assimilation System[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, 118(23): 12927-12940.
- [10] 胡汝骥. 中国天山自然地理[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2004.
- [11] 周德成, 罗格平, 韩其飞, 等. 天山北坡不同海拔梯度山地草原生态系统地上净初级生产力对气候变化及放牧的响应[J]. *生态学报*, 2012, 32(1): 81-92.
- [12] Zhang Y, Ohata T, Ersi K, et al. Observation and estimation of evaporation from the ground surface of the cryosphere in eastern Asia [J]. *Hydrological Processes*, 2003, 17(6): 1135-1147.
- [13] 郭淑海, 杨国靖, 李清峰, 等. 新疆阿克苏河上游高寒草甸蒸散发观测与估算[J]. *冰川冻土*, 2015, 37(1): 241-248.
- [14] 张明军, 李瑞雪, 贾文雄, 等. 中国天山山区潜在蒸发量的时空变化[J]. *地理学报*, 2009, 64(7): 798-806.
- [15] Penman H L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass[J]. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical and Physical Sciences*, 1948, 193(1032): 120-145.
- [16] Bouchet R J. Evapotranspiration réelle et potentielle, signification climatique [J]. *General Assembly of Berkeley*, Red Book, 1963, 62: 134-142.
- [17] 耿雷华, 黄永基, 郅建强, 等. 西北内陆河流域水资源特点初析[J]. *水科学进展*, 2002, 13(4): 496-501.
- [18] Mu Q, Zhao M, Running S W. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(8): 1781-1800.
- [19] 闻新宇, 王绍武, 朱锦红, 等. 英国 CRU 高分辨率格点资料揭示的 20 世纪中国气候变化[J]. *大气科学*, 2006, 30(5): 894-904.
- [20] 马柱国, 符淙斌. 中国干旱和半干旱带的 10 年际演变特征[J]. *地球物理学报*, 2005, 48(3): 519-525.
- [21] Milich L, Weiss E. GAC NDVI interannual coefficient

- of variation(CoV)images:ground truth sampling of the Sahel along north-south transects[J]. International Journal of Remote Sensing, 2000,21(2):235-260.
- [22] Yue S, Pilon P, Cavadias G. Power of the Mann-Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series[J]. Journal of Hydrology, 2002,259(1/4):254-271.
- [23] Fensholt R, Langanke T, Rasmussen K, et al. Greenness in semi-arid areas across the globe 1981—2007 an Earth Observing Satellite based analysis of trends and drivers[J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 121:144-158.
- [24] Jiang W, Yuan L, Wang W, et al. Spatio-temporal analysis of vegetation variation in the Yellow River Basin[J]. Ecological Indicators, 2015,51:117-126.
- [25] Liang S, Yi Q, Liu J. Vegetation dynamics and responses to recent climate change in Xinjiang using leaf area index as an indicator[J]. Ecological Indicators, 2015,58:64-76.
- [26] Roderick M L, Hobbins M T, Farquhar G D. Pan evaporation trends and the terrestrial water balance. II: Energy balance and interpretation[J]. Geography Compass, 2009,3(2):761-780.
- [27] 何延波, Su Z, Jia L, 等. 遥感数据支持下不同地表覆盖的区域蒸散[J]. 应用生态学报, 2007,18(2):288-296.
- [28] 郭锐, 朱燕君, 王介民, 等. 近 22 年来西北不同类型植被 NDVI 变化与气候因子的关系[J]. 植物生态学报, 2008,32(2):319-327.
- [29] 陈忠升, 陈亚宁, 李卫红, 等. 基于生态服务价值的伊犁河谷土地利用变化环境影响评价[J]. 中国沙漠, 2010, 30(4):870-877.
- [30] 刘宪锋, 朱秀芳, 潘耀忠, 等. 1982—2012 年中国植被覆盖时空变化特征[J]. 生态学报, 2015,35(16):5331-5342.
- [31] 许玉凤, 杨井, 陈亚宁, 等. 近 32 年来新疆地区植被覆盖的时空变化[J]. 草业科学, 2015,32(5):702-709.
- [32] 王海波, 马明国. 基于遥感和 Penman-Monteith 模型的内陆河流域不同生态系统蒸散发估算[J]. 生态学报, 2014,34(19):5617-5626.
- [33] 田静, 苏红波, 陈少辉, 等. 近 20 年来中国内陆地表蒸散的时空变化[J]. 资源科学, 2012,34(7):1277-1286.
- [34] 刘朝顺, 高志强, 高伟. 基于遥感的蒸散发及地表温度对 LUCC 响应的研究[J]. 农业工程学报, 2007,23(8):1-8.
- [35] 张殿君, 张学霞, 武鹏飞. 黄土高原典型流域土地利用变化对蒸散发影响研究[J]. 干旱区地理, 2011(3):400-408.

(上接第 265 页)

- [32] Wu T H, Watson A. In situ shear tests of soil blocks with roots[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1998, 35(4):579-590.
- [33] Ziemer R. Roots and the stability of forested slopes[C] // Davies, Timonhy R H. Erosion and Sediment Transport in Pacific Rim Steeplands, International of Hydrological Sciences, 1981.
- [34] Materechera S A, Alston A M, Kirby J M, et al. Influence of root diameter on the penetration of seminal roots into a compacted subsoil[J]. Plant & Soil, 1992, 144(2):297-303.
- [35] Hengchaovanich D. Vetiver System for Slope Stabilization Reviewer[C] // Proceedings of 3rd International Vetiver Conference, 2003:301-309.
- [36] 解明曙. 林木根系固坡土力学机制研究[J]. 水土保持学报, 1990,4(3):7-14.
- [37] 刘秀萍, 陈丽华, 宋维峰. 林木根系与黄土复合体的抗剪强度试验研究[J]. 北京林业大学学报, 2006,28(5):67-72.
- [38] 刘秀萍, 陈丽华, 宋维峰. 林木根系与黄土复合体的三轴试验[J]. 林业科学, 2007,43(5):54-58.
- [39] 王元战, 张智凯, 马殿光, 等. 植物根系加筋土剪切试验研究综述[J]. 水道港口, 2012,33(4):330-336.
- [40] 张晓明, 王玉杰, 夏一平, 等. 重庆缙云山典型植被原状土与重塑土抗剪强度研究[J]. 农业工程学报, 2006,22(11):6-9.
- [41] Davoudi M H. Influence of willow root density on shear resistance parameters in fine grain soils using direct shear tests[J]. Research Journal of Environmental Sciences, 2011,5(2):157-170.