

基于MOD16的山西省地表蒸散发 时空变化特征分析

温媛媛, 赵军*, 王炎强, 王玉纯, 王建邦

(西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070)

摘要: 基于MOD16全球蒸散发产品和气象站点实测数据, 运用变异系数法、Sen趋势法等研究了山西省2000—2014年地表蒸散发ET、潜在蒸散发PET的空间分布特征、变化趋势及影响因素。结果表明: ① MOD16蒸散发产品与气象站点实测蒸散发之间具有良好的时空相关性($R^2=0.90$), 其产品精度可以满足山西省蒸散发时空分布研究的要求; ② 山西省多年平均ET、PET分别为816.77、1608.46 mm, 年内变化表现为先增高后下降的“单峰”型分布, 二者差值在5月、6月最大, 此时山西省最为干旱; ③ 全省年平均ET呈现西北低、东南高的分布特征, PET呈西南高、东北低的分布特征, 二者差值整体上较大, 表现为全省地表水分比较缺乏, 其中忻州、吕梁西部最为严重; ④ 全省近15 a来ET和PET的际年变化都较小, 整体上全省PET在增加, ET在相对减少, 意味着近15 a来干旱情况在加剧; ⑤ ET、PET的时空变化与诸多气象因子相关, 在空间尺度上与降水、相对湿度密切相关, 在时间尺度上与气温、降水关系最为密切。

关键词: 蒸散发; 潜在蒸散发; 时空分布; MOD16; 山西省

蒸散发(evapotranspiration, ET)是地球下垫面向大气的水汽输送过程, 通常指地表土壤水分的蒸发(evaporation, E)和植物体内水分的蒸腾(transpiration, T)的总和, 是陆地生态系统的重要组成部分, 其以固态、液态、水汽等多种形式广泛存在于土壤-植被-大气连续体中, 在陆地水循环、碳循环以及能量平衡过程中起着决定性作用^[1]。潜在蒸散发(potential evapotranspiration, PET)是指在区域供水条件充分充足条件下的区域蒸散发能力, 是由天气气候条件所决定, 其变化直接影响着地区的水资源及生态状况^[2], 区域PET与ET的关系可以作为该地作物缺水及干旱的重要指标^[3]。

蒸散发的估算是地表水循环中最大且最难估算的分量, 传统方法是基于点尺度的测量和计算, 较难得到区域尺度的蒸散发, 遥感技术可以快速准

确地提取大范围的地表特征信息, 为准确估算区域尺度蒸散发提供了有效途径^[4]。目前利用遥感技术反演区域尺度蒸散发的方法主要有基于传统方法空间尺度扩展的遥感模型、经验统计公式、特征空间法、垂向能量平衡余项法等^[5-8]。基于不同方法, 许多团队发布了遥感数据反演的蒸散发产品, 例如英国布里斯托大学地理科学学院水文气象系研发的GLEAM(Global Land Evaporation and Amsterdam Model)产品^[9]、美国NASA和NOAA联合研发的GLDAS(Global Land Data Assimilation System)蒸散发产品^[10]以及美国NASA提供的MODIS16(MOD16)全球陆地蒸散发产品^[11]等。其中MODIS16/ET相较于其它产品具有时空分辨率高、易获取等特点, 在监测蒸散发时空分布特征方面具有一定的优势, 国内外学者从站点和流域尺度对MO-

收稿日期: 2019-01-18; 修订日期: 2019-03-18。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41661084)。[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41661084.]

第一作者简介: 温媛媛(1992—), 女, 山西吕梁人, 博士生, 主要从事环境遥感与GIS应用研究。

E-mail: littlewendy0203@163.com

*通信作者简介: 赵军(1963—), 男, 山西河津人, 教授, 博士生导师, 主要从事生态环境遥感与GIS应用研究。

E-mail: zhaojun@nwnu.edu.cn

引用格式: 温媛媛, 赵军, 王炎强, 等. 基于MOD16的山西省地表蒸散发时空变化特征分析[J]. 地理科学进展, 2020, 39(2): 255-264. [Wen Yanyuan, Zhao Jun, Wang Yanqiang, et al. Spatiotemporal variation characteristics of surface evapotranspiration in Shanxi Province based on MOD16. Progress in Geography, 2020, 39(2): 255-264.] DOI: 10.18306/dlkxjz.2020.02.007

DIS16产品开展了一系列评估工作,例如美国^[12]、陕西省^[13]、新疆自治区^[14]、中国流域^[15]、山东省^[16],证实了MOD16蒸散产品可以满足蒸散发的时空特征分析,且具有较高的精度。

山西省作为典型黄土高原地区之一,水资源严重缺乏、干旱频发,对农业影响极大。由于蒸散发和降水共同决定着该地区的干旱程度,相较于植被供水指数(vegetation supply water index, VSWI)、温度植被干旱指数(Temperature-Vegetation Dryness Index, TVDI)等传统遥感干旱指数,以蒸散发作为主要参数表征农业干旱的指标更能准确监测山西省实际情况^[17]。但是目前针对山西省的蒸散发研究较少,大多是基于站点尺度对参考作物蒸散量的研究,仅有的关于实际蒸散发的研究时序较短,多是基于数景影像的遥感估算,难以实现连续长时间序列的蒸散量变化特征研究^[18-19]。尤其近年来煤矿地区实施土地复垦等政策使得下垫面不断改善^[20],影响了陆面与大气之间的热量及水分的重新分配,因此科学合理地评价该地区地表蒸散发时空格局,不仅有助于加深对地表陆面过程的理解,了解区域生态需水规律,也有利于从宏观角度指导水资源的合理利用、预测旱情以及加强生态环境恢复建设。基于此,本文以MOD16蒸散产品为基础,结合气象实测数据,分析研究2000—2014年山西省地表ET和PET的时空分布、变化规律及影响因素,以期对山西省旱情监测和水资源合理利用提供科学依据。

1 数据来源和研究方法

1.1 研究区概况

山西省属中国华北内陆地区,地处110°14′~114°33′E、34°34′~40°44′N之间,位于黄河流域中游的东岸、华北平原西侧的黄土高原上,东依太行山,西、南依吕梁山,北与古长城相接,由北至南划分为晋北(大同、朔州、忻州)、晋中(太原、晋中、阳泉、吕梁)、晋南(临汾、运城、长治、晋城)3个地理单元(图1)。全省地势东北高西南低,山多川少、沟壑纵横,地貌以山地、丘陵为主,达到全省面积的80.1%;典型的暖温带、中温带大陆性气候,表现为四季分明,春季少雨干旱、风沙较多,夏季短而高温多暴雨,秋季短暂温和晴朗,冬季长而降水稀少、寒冷干燥。降水主要集中在汛期7—9月,占全年降水量的65%~80%。研究区内水资源严重贫乏,主要补给来源

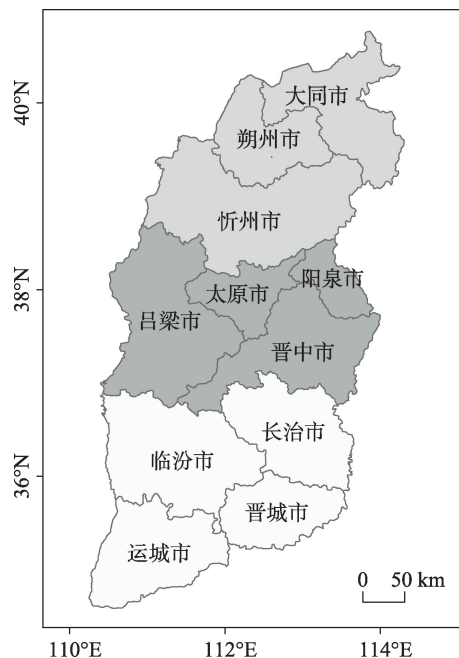


图1 山西省行政区划图

Fig.1 Administrative division of Shanxi Province

为降水,但是由于降水量分布不均及水文下垫面条件的差异,在空间上水资源分布极不均匀,总的趋势是由东南向西北递减。

1.2 数据来源及处理

MOD16全球陆地蒸散发产品主要包括蒸散发(ET)、潜热通量(LE)、潜在蒸散发(PET)、潜在潜热通量(PLE),时间分辨率为8 d合成、月合成及年合成,空间分辨率为1 km、0.05°、30 arcsec。其中ET产品是2011年Mu等^[11]在Penman-Monteith公式的基础上改进算法而得。本文使用的MOD16数据为2000—2014年月合成、年合成的1 km的ET和PET数据(<http://www.nts.gov.umt.edu/project/mod16>)。由于下载得到的MOD16产品为正弦曲线投影的HDF格式文件,所以利用NASA提供的MRT工具对其进行了批量拼接、投影转换处理,转换成基准面为WGS-1984、UTM投影的GeoTiff格式。

DEM数据来源于中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn>),利用ArcGIS对其进行拼接处理,用研究区矢量边界进行裁剪得到山西省1 km分辨率的DEM数据。

气象数据来源于国家气象信息中心(<https://data.cma.cn>),选取平均分布山西省的14个气象站点(图2),气象站2000—2014年实测蒸发皿数据来源于中国地面气候资料日值数据集(V3.0),对于部分气象站由于蒸发皿缺测的无数值情况,将所测E-

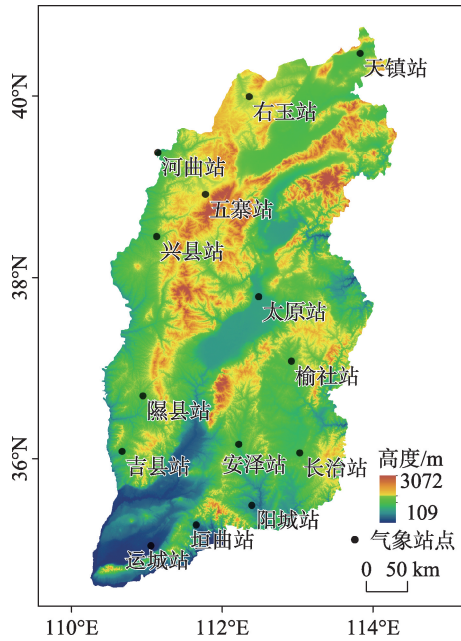


图2 山西省DEM及气象站点分布

Fig.2 Digital elevation model (DEM) of Shanxi Province and meteorological station distribution

601型蒸发皿ET值通过折算系数,折算为20cm口径蒸发皿数值^[21]。为与MOD16产品月、年数值对比,将日值数据处理为月值数据和年值数据。各气象站的气温、降水、相对湿度等气象因子数据来源于中国地面气候资料月值数据集。

1.3 研究方法

(1) 采用变异系数CV反映蒸散发的年际变化稳定度。为直观反映蒸散发变异程度,将CV值划分为4个不同等级:CV≤0.1时,变异程度为非常稳定;当0.1<CV≤0.2时,变异程度为稳定;当0.2<CV≤0.3,变异程度显示为不稳定;当CV>0.3时,变异程度为非常不稳定^[22]。CV计算公式为:

$$CV = \frac{SD}{\overline{ET}} \quad (1)$$

式中:SD为每个栅格多年的标准差; \overline{ET} 为每个栅格的ET多年平均值。

(2) 采用Theil-Sen Median趋势度逐像元分析ET和PET的变化趋势。在以往的蒸散发变化趋势研究中,学者们大多采用一元线性回归变化斜率法,该方法非常容易受到噪声的影响,而Sen趋势度分析是通过计算时间序列中的中值,不需要序列数据服从一定的分布,较好地减少了噪声的影响。Sen趋势度(β)计算公式为:

$$\beta = \text{Median} \left(\frac{ET_j - ET_i}{j - i}, j > i \right) \quad (2)$$

式中: i 和 j 表示时间序数;ET_{*i*}和ET_{*j*}分别表示每个栅格第*i*年和第*j*年的ET值。 β 为变化趋势:若 $\beta > 0$,表示呈上升趋势;若 $\beta < 0$,则表示呈下降趋势。

(3) 显著性检验。Sen趋势度所得到的 β 值,其本身不能实现时间序列的趋势显著性判断,因此引入Mann-Kendall方法对趋势度进行显著性分析,该方法对序列的数据分布没有要求并且对异常值不敏感。

定义一组时间序列 $ET = (ET_1, ET_2, \dots, ET_n)$,以参数 Z 作为标准化的检验统计量:

$$Z = \begin{cases} \frac{S - 1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S + 1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S < 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(ET_j - ET_i) \quad (4)$$

$$\text{sgn}(ET_j - ET_i) = \begin{cases} 1 & ET_j - ET_i > 0 \\ 0 & ET_j - ET_i = 0 \\ -1 & ET_j - ET_i < 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$\text{var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (6)$$

式中: n 为时间序列的长度;给定一个显著性水平 α ,计算 $Z_{1-\alpha/2}$,当 $|Z|$ 大于该值时,则表示研究序列在 α 水平上存在显著变化。因此,当 $\alpha = 0.01, 0.05, 0.1$ 时,即 $|Z| > 2.576, 1.96, 1.645$ 时,表示该研究序列分别通过了信度为99%、95%和90%的显著性检验,其对应的显著性分别为极显著、显著和弱显著;当 $|Z| < 1.645$ 时,表示为该研究序列未通过信度为90%的显著性检验,变化不显著。

2 结果与分析

2.1 精度检验

为验证MOD16蒸散发产品在山西省的精度,基于气象站点的实测蒸散发及该站点蒸发皿与E-601型蒸发皿之间折算系数的数据可获取性,剔除位于无植被区域的有效站点,选取了均匀分布于研究区内的14个气象站点(图2),将气象站测得的蒸发皿ET日值数据处理为月值数据,并提取该气象站点所在栅格的PET值,进行点尺度上的精度验证。PET是在水分供应充足情况下的蒸散发,蒸发皿实测ET也是在不受水分影响的情况下测得,而ET则是受到水分和能量限制的实际蒸散发。因此,蒸发皿ET与MOD16-PET的数据更为接近,可

以通过建立蒸发皿ET和MOD16-PET的相关性来验证MOD16产品在山西省的适用性。

结果表明(图3),MOD16-PET与蒸发皿实测ET之间具有非常好的相关性, $R^2=0.90(P<0.01)$,说明MOD16蒸散产品与气象站点实测蒸散发之间具有良好的时空相关性,其精度可以满足山西省蒸散发时空分布研究的要求。图3显示蒸发皿实测ET和MOD16-PET构成的散点图趋势线向蒸发皿实测ET(x轴)方向偏,表明实测ET值高于MOD16-PET值,原因是蒸发皿测的是昼夜ET的总和,而PET只发生在白天,并且蒸发皿实测ET值只包括水面的蒸散发,而PET还包括其他下垫面的蒸散发,因此二者之间必然存在一定的差值。

2.2 全省2000—2014年平均ET和PET时间变化特征

2000—2014年间山西省ET和PET年际变化波

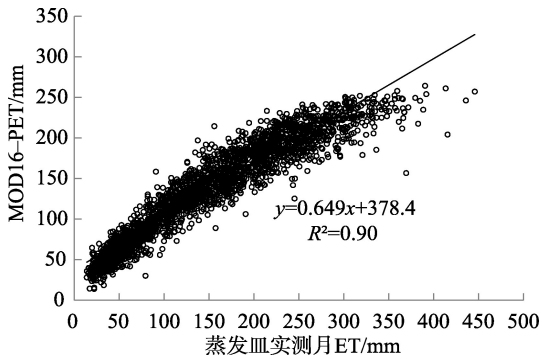


图3 蒸发皿实测月ET和MOD16-PET的关系
Fig.3 Relationship between MOD16 potential evapotranspiration (PET) product and monthly evapotranspiration (ET) at meteorological stations

动较小(图4),多年平均ET为816.77 mm,ET的波动范围为773.00~875.64 mm,其中2003年最大,2001年最小。全省多年平均PET为1608.46 mm,波动范围较ET大,为1421.21~1727.50 mm,其中2003年PET最小,2013年最大,高于多年平均PET。2002、2003和2012年ET变化波动较大,相对变化率分别达到6.18%、6.68%和5.08%,均表现为ET明显升高,而PET则在2003、2004和2013年波动比较大,相对变化率分别为-9.12%、9.64%和6.99%,在2002、2003年持续下降后2004年急剧上升,表明这几年PET波动比较剧烈。PET表示的是在一定的天气下地表水分供应充足时的最大蒸散量,而对应ET表示的是在该天气下、受水分约束的实际蒸散,因此PET与ET的差值可以表示该地区地表水分缺失状况,即地表的干旱情况。由图4可以看出,2013年二者之间的差值最大,表明该年山西省地表最为干旱。查阅山西省历年严重干旱发生情况,证实2009、2013年山西省均发生了干旱事件,且2013年为自1989年以来第3个严重少雨年,与PET和ET差值反映的干旱情况基本一致^[23]。

山西省多年ET和PET年内变化均为随着时间先呈增高趋势后呈下降趋势的“单峰”型分布(图5)。PET的最大值在6月,为209.37 mm;最小值在12月,为54.07 mm。ET的最大值则集中在7月、8月,8月最高,为69.08 mm。PET和ET的差值在5月、6月最大,表明山西省在5—6月间最为干旱,降水稀少、蒸散发增加导致地表水分最为缺乏。春季(3—5月)气温开始缓慢回升,且降水逐渐增多,植被

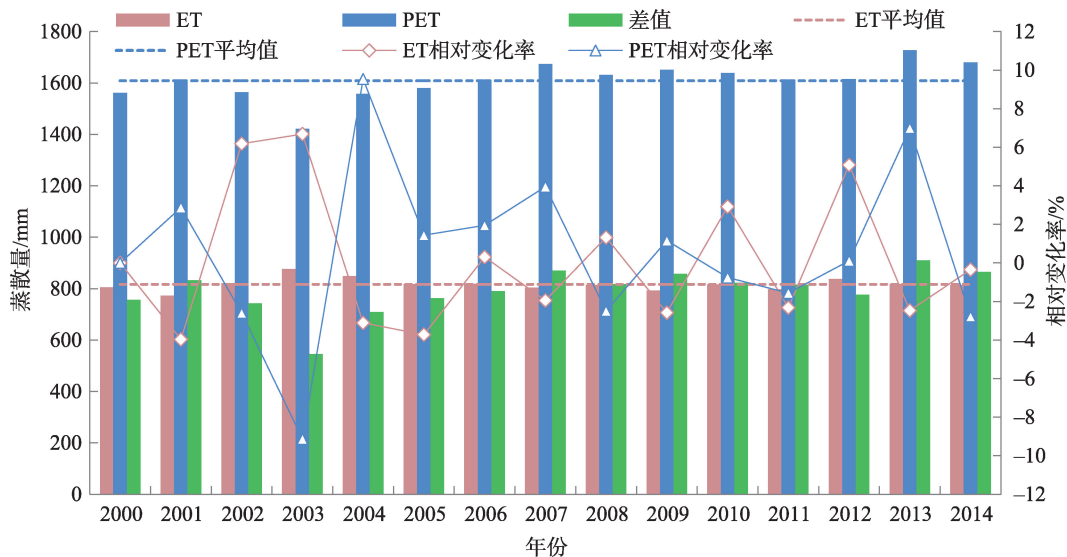


图4 山西省2000—2014年ET、PET年际变化

Fig.4 Annual variation of evapotranspiration (ET) and potential evapotranspiration (PET) in Shanxi Province, 2000-2014

农作物返青生长,因此ET和PET均逐渐升高。夏季(6—8月)气温回升到最高值,这期间山西省进入汛期,降水也达到了最大值,因此ET呈上升的趋势,而同期降水日增多导致日照时数减少,地表接收到的太阳辐射也随之减少,PET随之呈下降趋势。秋季(9—11月)气温开始逐渐下降,降水也减少,气候条件都向着不利于蒸散发的条件转变,因此PET和ET都呈下降趋势。冬季(12月—次年2月)气温达到最低,雨雪天气增多导致日照时数更少,这期间PET和ET均在最低值附近,且无明显波动变化。

2.3 全省ET和PET空间变化特征

根据山西省南北间距较长的地理特征,将其分

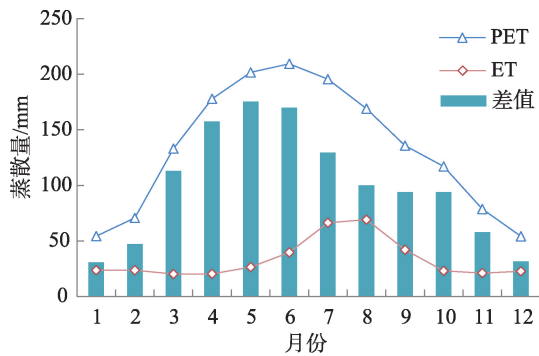


图5 2000—2014年山西省ET、PET年内变化
Fig.5 Monthly variation of evapotranspiration (ET) and potential evapotranspiration (PET) in Shanxi Province, 2000–2014

为晋北、晋中、晋南3个区域对ET和PET空间分布进行分析。由于MOD16蒸散发产品采用叶面积指数LAI间接反映随季节变化的土壤水分含量,弱化了土壤水分作用,因此在稀疏植被覆盖地区及沙漠区无值^[1],山西省ET/PET无值区主要为水域、裸地或稀疏植被区以及城市建筑区。从图6a、6b可看出,2000—2014年山西省ET和PET存在非常明显的空间分布差异。ET整体上呈现北低南高、西低东高的分布趋势,年平均ET波动范围为204.1~917.3 mm;PET整体上呈现为西南高、东北低的分布趋势,年平均PET波动范围为1397.2~1954.9 mm。图中显示大部分地区ET和PET有着正好相反的空间分布特征,有较低ET值的地区都对应较高的PET值,该现象可用蒸散发互补相关理论解释,晋南地区降雨量较大,农业灌溉引水等导致下垫面充分湿润,此时区域ET值高,而PET值低;晋北、晋中部分地区降水相对较少,下垫面水分不足时,陆面和大气更剧烈的相互作用会导致PET增大^[24]。PET和ET的差值可以初步反映地表水分及干旱情况(图6c),山西省地表水分总体上表现为比较缺乏,忻州、吕梁西部最为严重,晋南地区由于气候温暖湿润情况最好。PET与ET的差值整体上较大,波动范围为689.5~1685.9 mm,晋北地区最干旱,朔州市最为严重。晋中与晋北相比干旱略轻,太原市和晋中市地表水分供应都比较充足,但是吕梁西部与陕西交界处干旱最严重。晋南地区地表相对较湿润,但晋

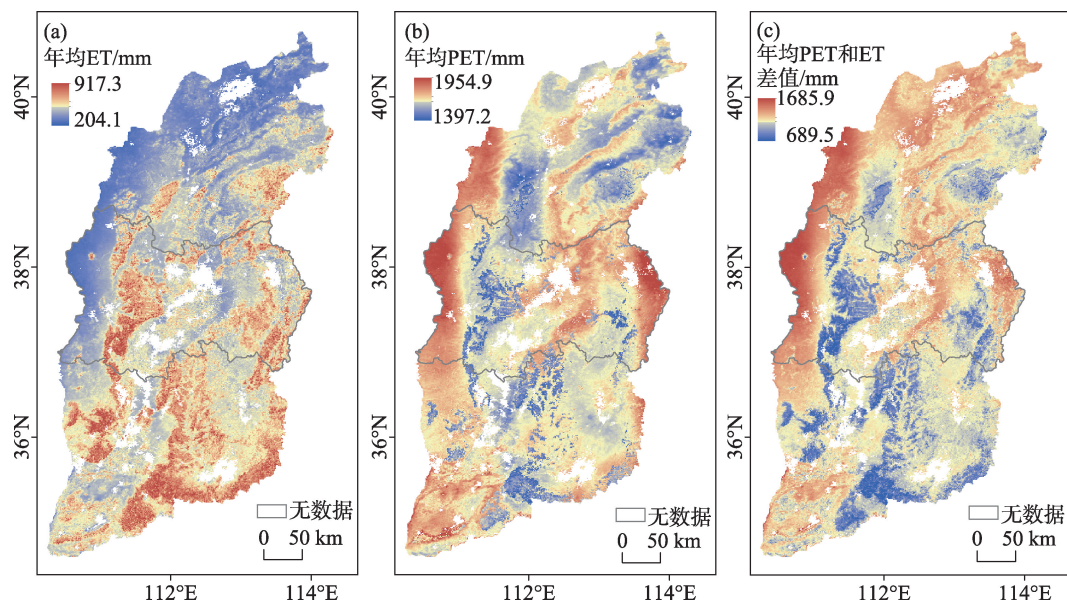


图6 2000—2014年山西省年平均ET、PET空间分布

Fig.6 Spatial distribution of annual evapotranspiration (ET) and potential evapotranspiration (PET) in Shanxi Province, 2000–2014

西南邻近陕西的少数地区也有轻微干旱。

从全省15 a季节多年平均ET、PET分布图(图7)可以看出,ET在夏季最高,冬季最低,春、夏、秋3个季节全省ET空间分布大致相同,均为从西北至东南递增,冬季晋中地区小部分地区ET很低,小于50 mm。春季ET值范围为28.2~212.6 mm,晋北及靠近陕西的西部地区ET值明显低于其他地区,与年均ET分布基本相一致。夏季气温升高且植被覆盖度增加,降水增多,蒸散发作用强烈,导致ET在夏季明显升高,且波动范围较大,为45.4~486.6 mm,其中晋中和晋南的大部分海拔较低的地区ET值显著升高。秋季气温下降,降水减少,ET也随之减小,此时全省ET分布差异不大,波动范围为55.9~180.9 mm,晋南地区ET仍大于晋北地区。冬季全省ET分布差异更小,仅为35.8~85.0 mm,与秋季相比,晋北地区无明显差异,而晋南地区则显著减小,晋中、太原、长治的小部分地区ET值也显著减小。

全省PET在夏季最高,其次为春季、秋季,冬季最低。春季PET值为432.1~602.3 mm,与年际PET分布基本一致,表现为从东、西向中部递减的趋

势。夏季全省PET明显升高,为510.3~698.3 mm,尤其是晋北朔州、忻州及吕梁西部地区显著升高,此时PET值表现为晋北最高、晋南最低,与夏季ET分布刚好相反。秋季PET开始减小,为268.6~409.3 mm,与春季分布基本相似,位于中部的吕梁、长治显著减小。冬季PET最小,为119.0~254.5 mm,北部的大同、朔州及部分忻州地区PET显著减小。全省春季和夏季ET与PET差值与其他两季相比较,表明山西省在春夏两季地表水分供应不足,会经常性出现春夏连旱的情况。

2.4 全省2000—2014年ET、PET变异程度

由山西省2000—2014年ET和PET的CV分布图(图8)可以看出,15 a间ET的平均CV值为0.09, PET的平均CV值为0.05,均小于0.1,表明整个山西省ET和PET的变异程度都较小。尤其是PET的变异程度特别小,几乎整个山西省PET的CV值都小于0.1;大部分地区ET的CV值小于0.1,表示这些地区ET年际变化程度非常小。还有一部分地区如大同、运城大部分的CV值介于0.1~0.2之间,表示这些地区ET的年际变化程度较小,仅运城局部ET

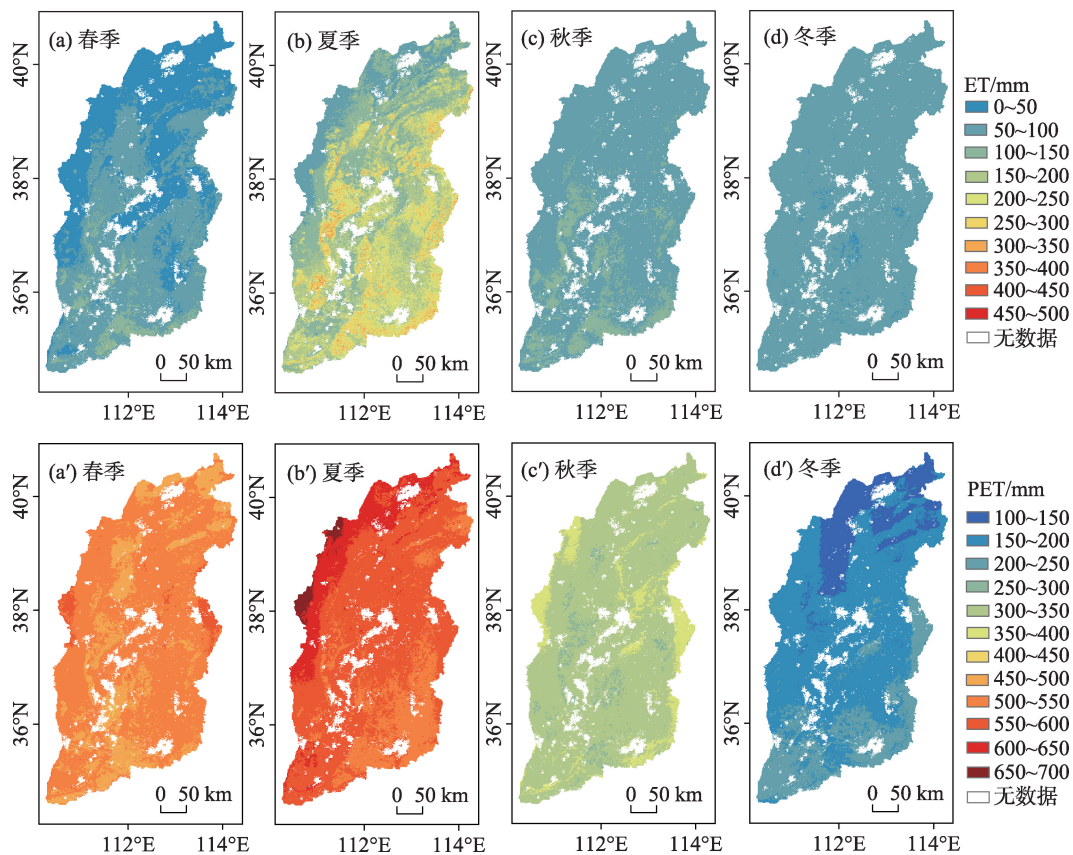


图7 2000—2014年山西省季节平均ET、PET空间分布

Fig.7 Spatial distribution of seasonal evapotranspiration (ET) and potential evapotranspiration (PET) in Shanxi Province, 2000–2014

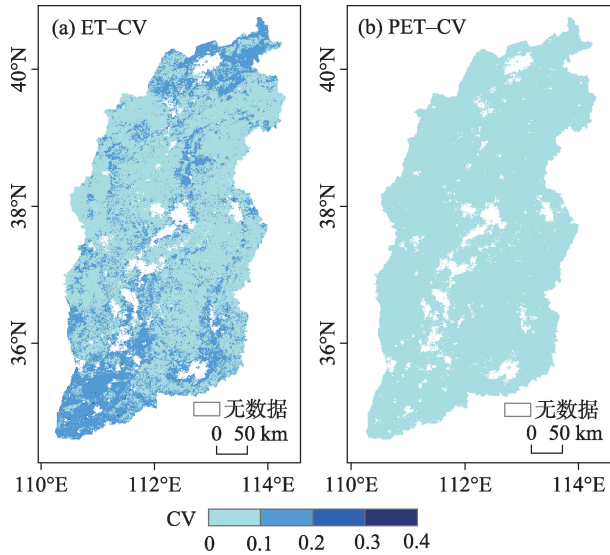


图8 2000—2014年山西省ET、PET的CV空间分布
Fig.8 Spatial distribution of coefficient of variation (CV) of evapotranspiration (ET) and potential evapotranspiration (PET) in Shanxi Province, 2000–2014

的CV值大于0.2, 变异程度略高, 地表蒸散发年际变化比较不稳定。运城少数地区ET值年际变异程度略高的原因在于, 山西省南部地区尤其运城市夏季极易发生内涝灾害, 降水及地表水分情况的不稳定导致ET值也较不稳定。

从近15 a来山西省的ET和PET变化趋势的空间分布来看(图9), 晋中地区偏西部的吕梁山周围的临汾和忻州小部分地区及吕梁的大部分地区, ET呈增加趋势, 晋东南的长治和晋城ET为减小趋势。PET的变化趋势和ET相反, 全省大部分地区PET都呈增加趋势, 晋东南地区增加明显, 只有晋中地区PET在下降。整体上, 山西省PET在增加, ET在相对减少, 意味着近15 a来干旱情况在加剧。从变化占比及显著性来看(表1): 近15 a来全省ET不显著变化的面积最大, 占72.38%, 弱显著、显著及极显著变化的面积比例分别占比8.03%、12.52%和7.07%; 在ET发生了变化的地区, ET增加的面积占47.43%, ET减少的面积占52.57%。PET变化趋势的分布和ET差异很大, 不显著和弱显著变化占比分别仅13.38%和12.63%, 显著和极显著变化的范围较大, 面积占比达到39.74%和34.25%; 总体变化呈增加趋势, 增加面积占比达到78.1%, 减少面积仅有21.9%。

2.5 站点尺度ET、PET时空变化影响因素分析

为探究各气象因子与ET、PET相互作用的关

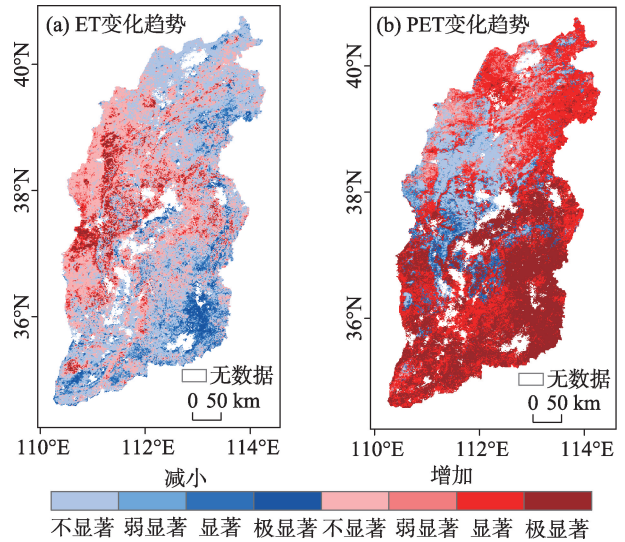


图9 2000—2014年山西省ET、PET多年变化趋势
Fig.9 Trend of change of evapotranspiration (ET) and potential evapotranspiration (PET) in Shanxi Province, 2000–2014

表1 2000—2014年山西省ET、PET变化趋势及显著性统计
Tab.1 Statistics on the trend and significance of evapotranspiration (ET) and potential evapotranspiration (PET) in Shanxi Province, 2000–2014

变化趋势	面积占比/%				总计/%
	不显著	弱显著	显著	极显著	
ET 增加	34.01	3.86	5.89	3.67	47.43
ET 减少	38.37	4.17	6.63	3.40	52.57
PET 增加	2.61	8.12	34.16	33.21	78.10
PET 减少	10.77	4.51	5.58	1.04	21.90

系, 将各气象站相关气象因子多年年均值与其年均ET及PET分别建立相关模型, 得到气象因子和ET、PET的空间相关关系。为分析时间相关性, 建立1—12月全省月均ET、PET和气象因子的相关关系, 得到相关系数(表2), 相关系数均通过了 $P=0.05$ 的显著性检验。

从表2可知, ET的空间分布与降水、相对湿度呈正相关关系, 而与日照时数呈负相关关系。PET的空间分布与气温、水汽压呈正相关关系, 而与相对湿度呈负相关。ET、PET与风速的相关系数比其他因子低, 表明风速对蒸散发的空间分布影响不大, 当其他气象条件在空间分布上基本一致时, 风速越大越有利于ET的发生。从气象因子的内在关系可以推知, 降水是影响相对湿度和日照时数的关键因素, 晋南地区纬度较低且地势较平坦, 降水较多导致大气相对湿度较高, 过多的降水会导致大

表2 ET、PET与气象因子相关系数
Tab.2 Correlation coefficients of climatic factors
with evapotranspiration (ET) and potential
evapotranspiration (PET)

气象因子	降水	风速	气温	水汽压	相对湿度	日照时数	
空间相关性	ET	0.73	0.23	0.35	0.39	0.46	-0.60
	PET	-0.23	-0.29	0.57	0.44	-0.48	-0.28
时间相关性	ET	0.81	-0.64	0.45	0.76	0.80	-0.18
	PET	0.68	0.40	0.93	0.74	-0.04	0.88

气层云层覆盖天数较多,即日照时数较少,因而晋南地区的年均ET较高而PET相对较低,晋北地区如朔州、忻州西部,降水不足且日照时间充足,在一定程度上导致这些地区的ET较低而PET较高。

在时间尺度上,ET的变化与降水、水汽压、相对湿度呈显著正相关,与风速呈负相关。水汽压的大小与蒸发快慢有关,而蒸发的快慢在水分一定的条件下由气温所决定,降水的增多会导致相对湿度变大。研究区风速存在明显的季节变化,一般冬、春季风速较大,特别是春季风速最大,冬季次之,夏季最小。因此ET的时间变化规律与降水、气温密切相关,其月际变化与气温、降水一致,夏季降水较多且气温较高,水汽压和相对湿度也较高,风速较小,这样的气候条件非常有利于ET的发生。PET的时间变化则与气温、日照时数呈显著正相关,相关系数绝对值都在0.8以上,夏季白昼变长,地表接受太阳辐射增多,气温与接收太阳辐射的多少密切相关,因此影响PET变化的最主要因素是太阳辐射,其月际变化与ET一致。

3 结论

本文基于MOD16蒸散发产品,结合气象站实测蒸发皿数据,对MOD16产品在山西省的适用性进行了检验,在此基础上,分析了山西省2000—2014年间ET和PET的时空分布和动态变化,进一步揭示山西省15 a来陆面干旱情况及影响ET、PET时空变化的气象因子。主要结论如下:

(1) 将MOD16-PET与折算后气象站实测蒸发皿数据建立相关关系分析得到,二者的决定系数达到 $R^2=0.9(P<0.01)$,说明MOD16蒸散产品与气象站点实测蒸散发之间具有良好的时空相关性,MOD16产品精度可以满足山西省蒸散发时空分布研究的要求。

(2) 2000—2014年间全省的ET和PET年际变化波动较小,多年平均ET为816.77 mm,平均PET为1608.46 mm。ET的波动范围为773.00~875.64 mm,PET的波动范围为1421.21~1727.50 mm,2013年二者之间的差值为最大,表现为山西省在2013年地表最为干旱。ET、PET的年内变化表现为“单峰”型分布,ET的最大值出现在8月,达到69.08 mm,PET的最大值为209.37 mm。PET和ET的差值在5月、6月最大,表明山西省在此期间最为干旱。

(3) 2000—2014年全省年平均ET和PET有着非常明显的空间分布差异,ET整体上呈现西北低东南高的分布趋势,年平均ET波动范围为204.1~917.3 mm,PET整体上呈现西南高、东北低的分布趋势,年平均PET波动范围为1397.2~1954.9 mm。PET与ET的差值整体上较大,波动范围为689.5~1685.9 mm,表明山西省地表水分总体上表现为比较缺乏,忻州、吕梁西部最为严重,晋南地区由于气候温暖湿润情况最好。ET、PET均为夏季最高,冬季最低,且春、夏、秋季ET、PET分布与多年平均空间分布基本一致。

(4) 2000—2014年全省ET和PET的年际变化都较小,近15 a来吕梁山周围地区ET呈增加趋势,晋东南ET呈减少趋势,全省大部分地区PET都呈增加趋势,只有晋中地区PET在下降。整体上全省PET在增加,ET在相对减少,意味着近15 a来干旱情况在加剧。

(5) 通过站点尺度的ET、PET与气象因子相关分析得到,在空间尺度上,ET与降水、相对湿度呈显著正相关关系,与日照时数呈负相关,PET与气温、水汽压呈显著正相关关系,而与相对湿度呈负相关;在时间尺度上,ET、PET的时间变化均与降水、气温、水汽压有着较大的关系。

山西省蒸散发研究较少,大多是基于站点尺度对参考作物蒸散量的研究,实际蒸散发的研究多是基于数景影像的遥感估算,难以实现长时间序列蒸散发变化特征的研究。本文利用连续时段的高分辨率遥感产品及气象资料,深入讨论分析了山西省ET、PET多年时空特征、变化趋势及影响因素,弥补了现有山西蒸散研究的不足。由于陆面过程ET、PET的相互作用较复杂,因此还需进一步结合研究区实际情况,探讨不同因子对ET、PET变化趋势的影响。干旱研究一直是山西的研究热点,本文验证了MOD16数据在山西省的适用性,并用PET与ET的差值作为一个初步的干旱指标表征研究区多年

干旱变化情况, 所得结果较为可靠, 下一步将以蒸散发作为主要参数的作物水分亏缺指数表征山西干旱状况作为研究重点, 探讨适合于山西实际情况的遥感干旱指标, 实现在时间和空间上高精度的连续多年的干旱遥感监测。

参考文献(References)

- [1] Wang K, Dickinson R E. A review of global terrestrial evapotranspiration: Observation, modeling, climatology, and climatic variability [J]. *Reviews of Geophysics*, 2012, 50(2): 1-54.
- [2] 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. [Liu Changming, Zhang Dan. Temporal and spatial Change analysis of the sensitivity of potential evapotranspiration to meteorological influencing factors in China. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(5): 579-588.]
- [3] 汪左, 王芳, 张运. 基于CWSI的安徽省干旱时空特征及影响因素分析 [J]. *自然资源学报*, 2018, 33(5): 853-866. [Wang Zuo, Wang Fang, Zhang Yun. Spatio-temporal distribution characteristics and influencing factors of drought in Anhui Province based on CWSI. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(5): 853-866.]
- [4] Chen Y, Xia J, Liang S et al. Comparison of satellite-based evapotranspiration models over terrestrial ecosystems in China [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 140(1): 279-293.
- [5] Liu S, Sun R, Sun Z, et al. Evaluation of three complementary relationship approaches for evapotranspiration over the Yellow River Basin [J]. *Hydrological Processes*, 2006, 20(11): 2347-2361.
- [6] Wang K, Liang S. An improved method for estimating global evapotranspiration based on satellite determination of surface net radiation, vegetation index, temperature, and soil moisture [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2008, 9(4): 712-727.
- [7] Tang R L, Li Z L, Tang B H. An application of the Ts-VI triangle method with enhanced edges determination for evapotranspiration estimation from MODIS data in arid and semi-arid regions: Implementation and validation [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(3): 540-551.
- [8] Lian J, Huang M. Comparison of three remote sensing based models to estimate evapotranspiration in an oasis-desert region [J]. *Agricultural Water Management*, 2016, 165: 153-162.
- [9] Martens B, Miralles D G, Lievens H, et al. GLEAM v3: Satellite-based land evaporation and root-zone soil moisture [J]. *Geoscientific Model Development Discussions*, 2016, 10(5): 1-36.
- [10] Houser P R. Land data assimilation systems [M]// Swinbank R, Shutyaev V, Lahoz W A. *Data Assimilation for the Earth System*. Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2003.
- [11] Mu Q Z, Zhao M, Steven W. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(8): 1781-1800.
- [12] Velpuri N M, Senay G B, Singh R K, et al. A comprehensive evaluation of two MODIS evapotranspiration products over the conterminous United States: Using point and gridded FLUXNET and water balance ET [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 139(4): 35-49.
- [13] 何慧娟, 卓静, 董金芳, 等. 基于MOD16监测陕西省地表蒸散发变化 [J]. *干旱区地理*, 2015, 38(5): 960-967. [He Huijuan, Zhuo Jing, Dong Jinfang, et al. 2015. Surveying variations of evapotranspiration in Shaanxi Province using MOD16 products. *Arid Land Geography*, 2015, 38(5): 960-967.]
- [14] 阿迪来·乌甫, 玉素甫江·如素力, 热伊莱·卡得尔, 等. 基于MODIS数据的新疆地表蒸散量时空分布及变化趋势分析 [J]. *地理研究*, 2017, 36(7): 1245-1256. [Adilal Wufu, Yusubujiang Rusuli, Reyilai Kadeer, et al. Spatio-temporal distribution and evolution trend of evapotranspiration in Xinjiang based on MOD16 data. *Geographical Research*, 2017, 36(7): 1245-1256.]
- [15] 姜艳阳, 王文, 周正昊. MODIS MOD16 蒸散发产品在中国流域的质量评估 [J]. *自然资源学报*, 2017, 32(3): 517-528. [Jiang Yanyang, Wang Wen, Zhou Zhenghao. Evaluation of MODIS MOD16 evapotranspiration product in Chinese river basins. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(3): 517-528.]
- [16] 赵燊, 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. [Zhao Shen, Chen Shaohui. Spatiotemporal variations of evapotranspiration and potential evapotranspiration in Shandong Province based on station observations and MOD16. *Progress in Geography*, 2017, 36(8): 1040-1047.]
- [17] 田国珍, 武永利, 梁亚春, 等. 基于蒸散发的干旱监测及时效性分析 [J]. *干旱区地理*, 2016, 39(4): 721-729. [Tian Guozhen, Wu Yongli, Liang Yachun, et al. Drought monitoring and timeliness based on evapotranspiration model. *Arid Land Geography*, 2016, 39(4): 721-729.]
- [18] 金晓媚, 唐蕴. 山西三大盆地蒸散量的遥感研究 [J]. *科技导报*, 2007, 25(4): 31-34. [Jin Xiaomei, Tang Yun. Research on regional evapotranspiration of three basins in Shanxi based on remote sensing method. *Science & Tech-*

- nology Review, 2007, 25(4): 31-34.]
- [19] 刘广东, 李艳, 刘海军, 等. 山西地区近55年参考作物蒸散量的变化特征及其主要影响因素分析 [J]. 灌溉排水学报, 2012, 31(5): 26-30. [Liu Guangdong, Li Yan, Liu Haijun, et al. Changing trend of reference crop evapotranspiration and its dominated meteorological variables in Shanxi Province in the past 55 years. Journal of Irrigation and Drainage, 2012, 31(5): 26-30.]
- [20] 党跃军, 王礼霄, 严俊霞. 山西省2003—2012年植被时空变化格局及对气候因子的响应 [J]. 水土保持研究, 2015, 22(2): 235-240. [Dang Yuejun, Wang Lixiao, Yan Junxia. Spatial temporal dynamics of vegetation and its response to climatic factors in Shanxi Province from 2003 to 2012. Research of Soil and Water Conservation, 2015, 22(2): 235-240.]
- [21] 王云峰. 山西省小型水面蒸发器折算系数分析 [J]. 山西水利, 2004, 20(2): 46-47. [Wang Yunfeng. Analysis of conversion coefficients of small water surface evaporators in Shanxi Province. Shanxi Water Resources, 2004, 20(2): 46-47.]
- [22] 张巧凤, 刘桂香, 于红博, 等. 基于MOD16A2的锡林郭勒草原近14年的蒸散发时空时态 [J]. 草地学报, 2016, 24(2): 286-293. [Zhang Qiaofeng, Liu Guixiang, Yu Hongbo, et al. Temporal and spatial dynamic of ET based on MOD16A2 in recent fourteen years in Xilingol Steppe. Acta Agrestia Sinica, 2016, 24(2): 286-293.]
- [23] 任丽娜. 山西现严重干旱, 为1989年以来第3个严重少雨年 [EB/OL]. 中国新闻网, 2013-04-19 [2019-03-10]. <http://www.chinanews.com/gn/2013/04-19/4747663.shtml>. [Ren Lina. Shanxi is now severely dry, the third severely dry year since 1989. China News, 2013-04-19 [2019-03-10]. <http://www.chinanews.com/gn/2013/04-19/4747663.shtml>.]
- [24] Roderick M L. The cause of decreased pan evaporation over the past 50 years [J]. Science, 2002, 298: 1410-1411.

Spatiotemporal variation characteristics of surface evapotranspiration in Shanxi Province based on MOD16

WEN Yuanyuan, ZHAO Jun*, WANG Yanqiang, WANG Yuchun, WANG Jianbang

(College of Geography and Environment Sciences, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Based on the MODIS evapotranspiration (ET) products (MOD 16) and the observation data of meteorological stations, coefficient of variation method and Sen+Mann-Kendall model were used to analyze the spatiotemporal feature, variation trends, and influencing factors of land surface ET and potential evapotranspiration (PET) in Shanxi Province from 2000 to 2014. The main conclusions are as follows: 1) The accuracy of the MOD16-ET ($R^2=0.9$) of Shanxi can meet the requirements of such research, and can be used to examine the spatiotemporal distribution of surface ET. 2) The mean annual ET and PET were 816.77 mm and 1608.46 mm, respectively. The annual distribution showed a unimodal pattern, which increased first and then decreased; the difference between ET and PET was the largest in May and June when it was the driest in the study area. 3) The annual average ET of the study area was low in northwest Shanxi and high in southeast, while the annual average PET was high in southwest and low in northeast of the study area. The overall difference between the annual average ET and PET was relatively large, which reflects that the whole province was shortage of water, especially in Xinzhou and the west of Lvliang. 4) The interannual variations of ET and PET have been relatively small in the past 15 years. Evapotranspiration showed a decreasing trend, and PET showed an increasing trend, which suggest that the drought was aggravated in Shanxi in the past 15 years. 5) The correlation analysis between evapotranspiration and meteorological factors indicated that the spatiotemporal variation of evapotranspiration was closely related to many climatic factors—they were related to precipitation and relative humidity spatially, and were most closely related to temperature and precipitation temporally.

Keywords: evapotranspiration; potential evapotranspiration; spatiotemporal distribution; MOD16; Shanxi Province