

基于台站和MOD16数据的山东省蒸散及潜在蒸散时空变化

赵 粦^{1,2}, 陈少辉^{1*}

(1. 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重点实验室, 北京 100101;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 蒸散发的时空格局分析对理解气候变化与水资源之间的相互影响具有重要的作用。本文基于 Penman-Monteith 公式, 利用 MODIS 全球蒸散发产品(MOD16)及气象站点的蒸发皿观测数据, 先对数据精度进行评价, 再从空间和时间两个尺度上对数据进行统计分析, 系统阐释了 2000-2014 年山东省地表蒸散(ET)及潜在蒸散(PET)的时空分布特征及其与气象因子的相关性。主要结论为: ①山东省不同区域蒸散分布差异明显, 地表植被对 ET 的月际变化趋势有重要影响; ②山东省 ET 及 PET 年际波动不大, 全省 ET 均值为 1529 mm, PET 均值为 2178 mm, 年均 ET 与 PET 相对较大的差值说明该省整体相对缺水。③ET 及 PET 的时空变化与诸多气象因子相关, 其中与降水及温度的关系最为密切。

关键词: MOD16; 蒸散; 潜在蒸散; 气象因子; 时空变化; 山东省

1 引言

区域蒸散发是构建区域水循环模型的重要组成部分, 亦是开发陆面过程模型(如 NOAH 模型)时必要的能量分量。蒸散(Evapotranspiration, ET)通常是指土壤蒸发(Evaporation, E)和植物蒸腾(Transpiration, T)之和, 是土壤、植被及大气这一循环体系中水分运动的重要过程, 也是农作物生长发育所消耗的水分和能量的表现, 作为陆面生态系统与水文过程的重要纽带, 其强度大小与气象条件、下垫面状态及植被等有密切的关系。潜在蒸散发(Potential Evapotranspiration, PET)是指充分供水条件下的区域蒸散发能力(Allen et al, 1998)。它是农田灌溉管理、作物需水量估算、稀缺资料地区水量平

衡等研究中的重要参量, 在水资源管理研究中有着广泛的应用(郎登潇等, 2017; 张静等, 2017)。因此, 揭示 ET 和 PET 时空尺度上的变化趋势及其与气象因子的联系, 有利于从宏观角度研究气候变化对流域水循环的影响, 且对水热转换、农业灌溉管理以及相应陆面过程模型的深入了解和研究具有重要意义。山东省是中国 13 个粮食主产区之一, 农业灌溉管理以及作物需水量估算等对该省农业的科学发展极具指导作用, 因而监测山东省 ET 及 PET 的时空变化并分析其与气象因子的关联性有重要的现实意义。

关于蒸散量的计算, 传统的算法都是利用各种蒸散公式基于气象站点观测资料进行估算(左德鹏等, 2011; 张晓琳等, 2012; 杜加强等, 2013), 如果区

收稿日期: 2016-12; 修订日期: 2017-02。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFB0203101); 国家自然科学基金项目(41371348, 41671368)[Foundation: National Key Research and Development Program of China, No.2017YFB0203101, National Natural Science Foundation of China, No.41371348; No.41671368]。

作者简介: 赵粦(1990-), 男, 河南南阳人, 硕士生, 主要从事区域地表蒸散及陆面过程模型研究, E-mail: zhaos.14s@igsrr.ac.cn。

通讯作者: 陈少辉(1978-), 男, 河北保定人, 副研究员, 主要从事区域地表蒸散研究及地表过程参数化研究,

E-mail: chensh@igsrr.ac.cn。

引用格式: 赵粦, 陈少辉. 2017. 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, 36(8): 1040-1047. [Zhao S, Chen S H. 2017. Spatiotemporal variations of evapotranspiration and potential evapotranspiration in Shandong Province based on station observations and MOD16[J]. Progress in Geography, 36(8): 1040-1047.]. DOI: 10.18306/dlkxjz.2017.08.013

域上站点分布不均且数量较少,会使区域蒸散的估算变得较为困难。近年来,随着遥感技术的发展,与蒸散相关的更为详细的地表参数得以反演,使得较大区域的蒸散估算成为可能。常用于遥感蒸散模型输入的参数包括反照率、地表温度以及植被指数等,可反演这些参数的卫星传感器包括 ASTER、MODIS 以及 AVHRR 等(冯景泽等, 2012)。利用遥感方法估算 ET 的理论基础是能量平衡原理,由此发展出多种遥感蒸散算法及相应的模型,较常用且典型的模型有 SEBS(Surface Energy Balance System) 模型和 SEBAL(Surface Energy Balance Algorithm for Land) 模型。SEBS 是由荷兰籍华人学者苏中波在估算湍流热通量时所提出(Su, 2002),该模型可利用气象观测数据及遥感数据来获取非均匀下垫面的蒸发比和地表湍流热通量。SEBAL 是由 Bastiaanssen 等学者在估算能量平衡方程各分量时提出的(Bastiaanssen et al, 1998)。该模型可以利用可见光及热红外数据反演 NDVI、地表比辐射率、地表温度及地表反照率等特征参数;此外,还可利用大气透过率、平均风速、温度及植被覆盖度等下垫面信息,无需进行复杂的数值计算即可获取不同土地覆盖类型的土壤热通量、净辐射通量及感热通量,并可用余项法获取潜热通量蒸散。

尽管国内外学者利用遥感资料可较为准确地估算出区域蒸散量(卢玲等, 2007; 潘竞虎等, 2010; 李星敏等, 2011; 李超凡等, 2012; 杨文峰等, 2013),但在山东省的应用研究较少,其蒸散量的年际及月际变化规律尚不清楚,而且分析其与气象因子之间的相关性的文献也较少。美国国家航空航天局(NASA)所推出的多年全球尺度 MOD16 蒸散产品有着较高的时间及空间分辨率,并且可以免费获取,使得研究某一特定区域的蒸散时空分布特征变得更为便捷。本文基于 NASA 获取的 2000–2014 年山东省区域 MOD16 产品,通过数据可视化处理及 GIS 空间分析等方法,研究山东省 ET 及 PET 的时空分布特征,在此基础上进一步分析各种气象因子与 ET 及 PET 的相关性,从而为山东省农业生产及农业灌溉的水资源有效利用提供科学依据。

2 研究与方法

2.1 研究区域

山东省位于中国东部沿海地区,东经 $114^{\circ}19' \sim$

$122^{\circ}43'$,北纬 $34^{\circ}22' \sim 38^{\circ}23'$ 。全省面积 15.7 km^2 (图 1)。在地形方面,山东省中部凸起,为山地丘陵区;东部半岛大部分区域为地势较缓的丘陵;北部和西部是由黄河冲积形成的冲积平原区,为华北大平原的组成部分。地形以平原为主,占全省面积的 55%,其余大多为山地和丘陵,占比近 30%。气候属于暖温带季风气候类型,气温地区差异东西大于南北,年平均气温 $11 \sim 14^{\circ}\text{C}$ 。山东是中国重要的粮食主产区之一,主要农作物为玉米、小麦、水稻、棉花、大豆、花生、大白菜及马铃薯等(王希等, 2013)。

2.2 数据来源

MOD16 蒸散数据集使用 MODIS 遥感反演,方法为 2011 年 Mu 等(2007, 2011)基于 Penman-Monteith 公式在 2007 年算法的基础上改进的蒸散算法。蒸散包括地表蒸发和植物蒸腾,因此陆表蒸散主要包括来自土壤蒸发的部分、从植被茎叶的气孔蒸腾出去的部分以及植被拦截未达地面的雨水蒸发。计算所需要的数据包括气温、气压、湿度以及辐射等气象数据及叶面积指数、反照率、地表覆盖类型等遥感产品。MOD16 有 ET 和 PET 两种产品。计算 ET 和 PET 时所用到的数据是一样的,但所需考虑的陆面水分环境特征参数有所区别。本文使用的 MOD16 是 2000–2014 年月合成 1 km 的 ET 及 PET(ftp://ftp.ntsg.umt.edu/pub/MODIS/NTSG_Products/MOD16)。利用 MODLAND 提供的 MRT(MODIS REPROJECTION TOOL)工具中对 MOD16 进行拼接并将投影转换为等经纬度投影,基准面设定为 WGS-84。考虑到与气象数据进行比对分析时的便捷性,前期准备工作中需要先行提取观测台站在经纬度坐标投影下对应位点的 ET 和 PET 值。

所需的气象观测数据包括山东省内 13 个站点 2000–2014 年观测的气压、气温、降水量、相对湿度、蒸发量、风向风速、日照时数和 0 cm 地温等日值数据。数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn>)的中国地面气候资料日值数据集(V3.0)。前期准备工作中,将该数据集的日值数据处理成对应的月值数据和年值数据,以便于与 MOD16 的月值 ET 及 PET 进行分析对比。

2.3 数据处理方法

本文中在对数据进行处理时所使用的方法涉及 Penman-Monteith 公式、MOD16 蒸散算法以及用 MRT 批处理 MOD16 数据产品。现分别加以详细介绍:

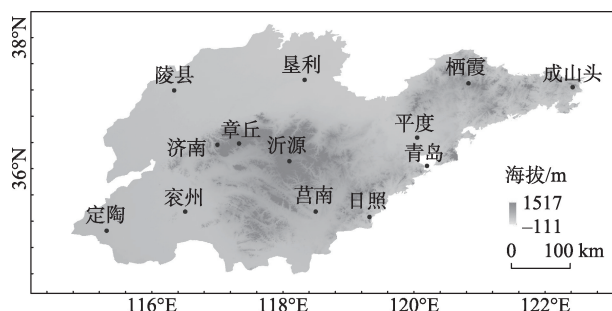


图1 山东省地形及气象站点分布

Fig.1 Topographical features of Shandong Province and meteorological station distribution

(1) MOD16蒸散算法

MOD16 蒸散算法是基于 Penman-Monteith 改进后的算法式(1), 计算时考虑了土壤表层蒸发、植被冠层的截流水分蒸发和植被蒸腾3个部分。

$$\lambda E = \frac{s(R_n - G) + \rho C_p (e_a - e_d)/r_a}{s + \gamma(1 + r_s/r_a)} \quad (1)$$

$$s = \frac{4098 e_a}{(T + 273.2)^2} \quad (2)$$

$$e_a = \frac{e_0(T_{\max}) + e_0(T_{\min})}{2} \quad (3)$$

式中: λE 为潜热通量; λ 为蒸发潜热; s 为饱和水汽压与温度的曲线斜率; R_n 为作物表面净辐射量, $\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$; G 为土壤热通量, $\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$; r 为空气密度; C_p 为空气定压比热; γ 为湿度计算常数; e_a 为空气平均饱和水汽压, kPa ; e_d 为空气实际水汽压, kPa ; r_a 和 r_s 分别为空气动力学阻抗和表面阻抗, 通过不同生态类型的气孔导度和有差异的边界层导度, 以及受到温度与水分胁迫时的导度变化趋势计算得到, 在该算法中使用一张由不同生物群落叶片气孔开闭时的水汽压差和临界温度组成的查找表进行计算; T 为空气平均温度。 $e_0(T_{\max})$ 及 $e_0(T_{\min})$ 是温度 T 条件下的饱和水汽压。

(2) 用MRT工具批处理MOD16数据产品

MRT 工具是一种针对 MODIS 产品的处理工具, 不仅可帮助用户把 MODIS 影像重新投影为标准的地图投影, 而且可选择影像中的波段子集以及空间子集进行投影转换, 这一过程的核心部分是对影像的重采样与镶嵌。

用 MRT 处理本文所用数据时, 首先要明确研究区数据所在的轨道号, 然后将数据输入 MRT 中对图像进行拼接和投影转换, 得到 GeoTIFF 格式的输出产品, 然后利用 ENVI 对该产品进行数据分析

及处理。

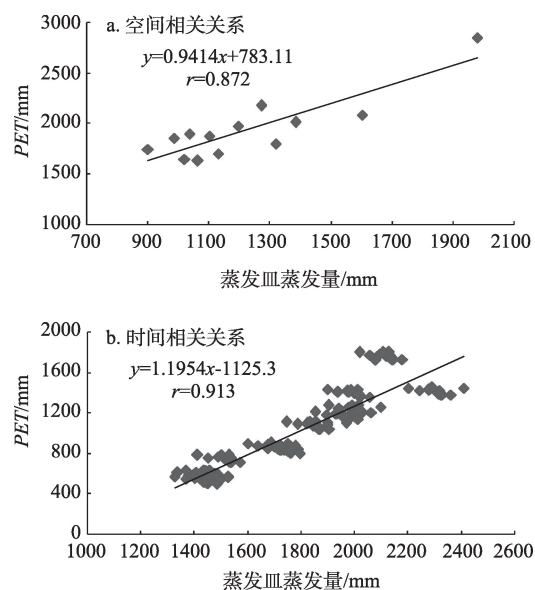
2.4 MOD16数据检验

为验证所用 MOD16 数据产品的精度, 采用相关性检验分析 MOD16 数据中的 PET 数据与观测站点的蒸发皿观测数据的相关性。相关性检验可分为两部分, 即空间相关性(Spatial Correlation)检验及时间相关性(Temporal Correlation)检验。空间相关性检验为自 2000-2014 年各个观测站点均值所构成的站点序列, 有效位点一共 13 个; 时间相关性检验为山东省自 2000-2014 年月均时间点序列, 有效位点一共 180 个。相关性分析结果表明: PET 与蒸发皿观测数据的空间相关系数 R 为 0.872 (信度检验 $p < 0.05$) (图 2a), 时间相关系数 R 更是高达 0.913 ($p < 0.05$) (图 2b), 说明观测站观测数据与 MOD16 数据产品在时空上均保持了相当高的相关性, 可满足探究山东省区域 ET 与 PET 时空变化的研究需求。

3 结果与分析

3.1 山东省 ET 及 PET 的空间变化规律

数据分析表明, 山东省 ET 和 PET 存在明显的地域差异。 ET 多年平均值自西部及北部内陆向东部沿海呈增加趋势 (图 3a), 从 574 mm 增至 1927 mm。而 PET 多年平均值自西部及北部内陆向东部

图2 MOD16 PET 与观测台站观测蒸发量的相关关系Fig.2 Relationships between MOD16 potential evapotranspiration (PET) and pan evaporation from meteorological observations

沿海则呈现减少趋势(图 3b),从 2849 mm 减至 1061 mm。 ET 和 PET 两者数值的变化趋势在空间上表现为反向对应状态,在 PET 低(高)值区为 ET 的高(低)值区,说明山东省西北内陆地区和东部沿海地区在蒸散上存在近乎相反的变化,再结合降水及温度等气象因子的时空分布状态,可探究其与 ET 及 PET 变化存在的联系。

上述差异性分布可具体反映在各相关气象因子上。从 ET 及 PET 多年均值与观测台站各气象因子 2000-2014 年观测数据的空间相关关系表(表 1)可知,年均降水及相对湿度与 ET 的相关关系系数分别为 0.757 及 0.741,二者与 ET 均呈显著正相关($p<0.05$);而日照时数与 ET 的相关关系系数为 -0.65,与 ET 显著负相关($p<0.05$)。无论是正相关系数还是负相关系数,其绝对值均可反应 ET 与上述气象因子的关联程度,即相关系数的绝对值越大,则该气象因子与 ET 或者 PET 的相关性越高。

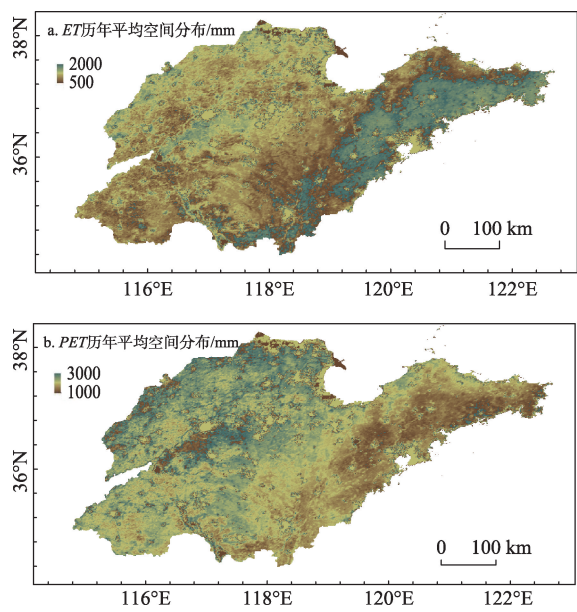


图3 山东省 ET 及 PET 的空间分布
Fig.3 Spatial distributions of evapotranspiration (ET) and potential evapotranspiration (PET) in Shandong Province

表1 ET 及 PET 与气象因子的空间相关系数
Tab.1 Spatial correlation coefficients of climatic factors with ET and PET

	相对湿度	气温	降水	气压	蒸发量	日照时数	风速
ET	0.741	0.628	0.757	0.221	-0.487	-0.653	-0.302
PET	-0.724	-0.509	-0.813	-0.206	0.621	0.862	0.432

注:表中相关系数 $p<0.05$ 。

结合表(1)可知, PET 与年均降水、日照时数及相对湿度均有较高的相关性。从气象因子之间的内在关系推知,在降水较多的地区,大气的相对湿度较高,加之由于降水多且相对湿度较大的地区会有较厚的云层和较大占比的气溶胶等因素,从而使日照时数减少。因此东部沿海因降水较为充沛且相对湿度较高,其 ET 值较高, PET 值较低;而西部及北部内陆地区因降水不足且日照时间较长,在一定程度上导致其 ET 值较低而 PET 值较高。

山东省的农业用地主要集中在西部和北部的平原地区。水资源是农业生产的重要保障,而蒸散发的时空格局分析对理解气候变化与水资源之间的相互影响具有重要的作用。为了进一步探究蒸散发与农业生产之间的关系,选取具有代表性的站点做进一步研究。

选取陵县和栖霞观测站作为代表性站点,分别代表山东省农作物的两种主要类型:主粮和经济作物。陵县观测站位于德州市陵城区,地处黄河中下游冲积平原,地势低平,属于大陆季风气候暖温带,6-8月为雨季。该区域主要农作物为小麦、玉米和棉花。栖霞观测站位于烟台市栖霞县,地处山东半岛,濒邻黄海和渤海,属山区丘陵地形,该地区因盛产苹果而被誉为“中国苹果之乡”,其主要农作物为小麦、玉米、苹果。

陵县和栖霞站 2000-2014 年的 ET 及 PET 月际变化趋势如图 4 所示(其中各月 ET 及 PET 均为 15 年的平均值)。从图 4 可以看出,陵县站和栖霞站的 PET 月际变化趋势大致相同,都随月份的推移呈现先增后降的单波峰趋势,但是二者的 ET 月平均变化存在明显差异。其中陵县站的 ET 月际变化趋势中有 2 个明显的波峰,即呈现出先增加再减小再增加的双波峰变化趋势;而栖霞站的 ET 月际变化却呈现与其 PET 变化趋势相同的单波峰形态。考虑到陵县地区的土地利用以一年两熟的耕地为主,其中 3-6 月份为冬小麦,7-10 月份为夏玉米,所以可以从图 4a 中看到时值小麦收割的 6 月份,其 ET 值突然下降,然后随着夏玉米的播种期和生长期的到来,其 ET 值又呈现增长势态,这说明植被的蒸腾作用与 ET 的变化趋势之间呈正相关关系;另外由前文的分析可知 ET 的变化与降水和温度等气象因子均存在较高的相关性,因而在温度和降水都达到最高值的 8 月份 ET 值达到其最大峰值。栖霞地区主要农作物中,小麦和玉米的种植面积及占比较陵县

小,而苹果的种植面积及占比较大因此该地区的ET值也呈现先增大后下降的势态,但其峰值出现的月份及变化特征与陵县相比又有所差异。

3.2 山东省ET及PET的时间变化规律

从图5可知,山东省2000-2014年ET和PET的年际变化在较小范围内波动,它们之间的差值也稳定在500~750 mm之间。陵县与栖霞2个观测站的历年ET、PET变化趋势也进一步验证了这一结论,ET的多年均值为1529 mm,其年均值变化范围为1456~1602 mm,分别在2006年及2001年达到最小值和最大值;PET的多年均值为2178 mm,年均值变化范围为2095~2261 mm,分别在2002年及2012年达到最小值和最大值。考虑到ET表征的是实际蒸散量而PET表征的则是水分充足条件下的理论蒸散量,所以ET与PET之间的差值可在一定程度上反应研究区域的缺水情况,也即该区域的干旱程度。因此,由ET与PET之间差值较大可以推知山东省较易发生旱情。

将2000-2014年的ET及PET值求取多年月平均值(图6)可知:山东省ET及PET整体上都呈先增大再减小的分布趋势,但在数值上逐月变化的程度

有区别。从图6可以看出,在1-3月及11-12月ET与PET的差值较大且在3月的时候差值最大,这意味着初春和隆冬时节较为干旱缺水且在3月最为严重(苑文华等, 2010);而在7-8月,PET与ET的差值较小,在8月达到最小21.9 mm,说明该时间段内用于蒸发的水量较为充沛。这和山东省全年的气候特征,即四季较为分明,降水较为集中且雨热同季相吻合,这对山东省农业用水的合理分配具有重要的指导意义。

ET及PET与各气象因子之间的时间相关关系见表2:2000-2014年山东省气温和降水与ET显著正相关,气压与ET显著负相关,说明ET与气温和降水的月际变化趋势较为一致,在6-8月,降水集中且温度达到最高,这样的气候环境对地表蒸散发较为有利,因而ET的值也趋于最大。从表2中还可知:气温及日照时数与PET显著正相关,气压与PET显著负相关,从其绝对值的大小来判断,温度

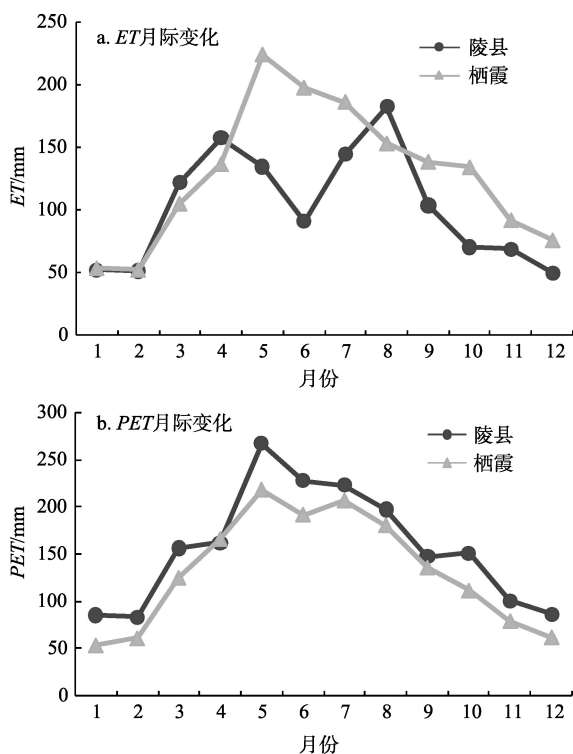


图4 陵县及栖霞ET与PET月变化趋势图

Fig.4 ET and PET monthly trends in Lingxian and Qixia, Shandong Province

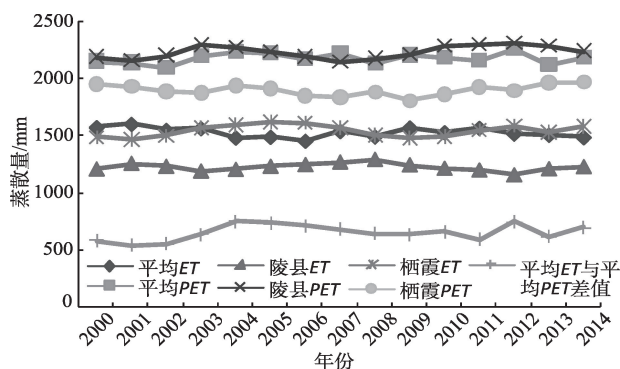


图5 2000-2014年山东省ET及PET历年变化趋势

Fig.5 Change of ET and PET in Shandong Province, 2000-2014

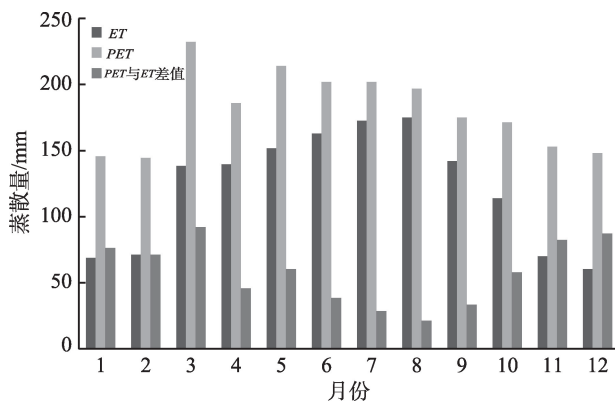


图6 山东省ET及PET月际变化

Fig.6 Monthly variations of ET and PET in Shandong Province

表2 *ET*及*PET*与气象因子时间相关系数
Tab.2 Temporal correlation coefficients of climatic factors with *ET* and *PET*

	相对湿度	气温	降水	气压	蒸发量	日照时数	风速
<i>ET</i>	0.560	0.725	0.732	-0.682	0.521	0.145	-0.143
<i>PET</i>	-0.072	0.913	0.573	-8.016	0.653	0.706	0.582

注：表中相关系数 $p<0.05$ 。

及气压与*PET*的相关性较高,其次是日照时数。温度上升会导致气体膨胀从而使大气环境的气压降低,而地表热量源自于太阳辐射,温度的高低与接收太阳辐射的量有关,因而平均气压及日照时数*PET*的相关关系仍可归因到平均温度与*PET*的相关关系上。诸气象因子与*ET*的相关关系亦可作此处理。

4 结论与讨论

本人首先通过分析MOD16产品与观测台站蒸发皿观测数据的时空相关关系,验证了MOD16产品的精度可满足研究需求,然后系统分析得到了2000-2014年山东省*ET*及*PET*时空变化规律,并进一步阐释了其与各气象因子的相关关系。

(1) 山东省*ET*及*PET*的空间分布差异较大。*ET*多年平均值自西部及北部内陆向东部沿海递增,而*PET*多年平均值则自西部及北部内陆向东部沿海递减。*ET*与*PET*近乎相反的变化趋势间接说明西部及北部内陆地区相对干旱,而其东部沿海地区降水则相对充沛。此外,地表植被的差异对*ET*的变化趋势影响较为明显,而对*PET*的变化趋势几乎无影响。山东是中国重要的粮食主产区,结合对栖霞和陵县2个观测站点的分析,考虑到其各地农作物种植结构的不同,需因地制宜地制定农业用水方案,重点关注作物生长过程各阶段的需水量,从而科学高效地提高水分利用效率。

(2) 从整体来看,山东省2000-2014年的*ET*及*PET*年际变化波动不大,但全省的多年平均*ET*与*PET*差值相对偏大,其中*ET*的均值为1529 mm,而*PET*的均值为2178 mm,二者相差649 mm。在1-3月及11-12月*PET*与*ET*的差值较大,说明在这2个时间段内山东省实际蒸发与蒸发潜力之间的缺口较大,亦即初春和暮冬时节灌溉用水较易蒸发,表明这一时期要做好抗旱工作;反之,在7-8月*PET*与

*ET*的差值较小,说明该段时期内实际蒸发与潜在蒸发的缺口较小,考虑到该时期降水较为集中,应做好防汛抗洪的准备。

(3) 结合与气象因子的相关性分析可以看出,*ET*及*PET*的空间分布与降水以及日照时数的关系较为密切;而二者在时间尺度上的分布与气温的联系最为密切,与降水量的联系次之。尽管气象因子涵盖平均降水量、平均气温、相对湿度及风速等诸多方面,*ET*及*PET*与气象因子的相关关系亦有所不同,但综合来看二者都与水热条件的时空变化有着相对较高的相关性。

此外,从图3a中可以明显看到在山东半岛地区*ET*的空间分布产生了一条梯度较大的分界线,结合山东省地形(图1)进行分析可知:山东半岛属暖温带湿润季风气候,夏秋季从热带海洋吹来的东南季风会受山地丘陵的阻隔而由东南向西北逐渐减弱,从而造成湿度和降水的依次减弱;同时从由*ET*与气象因子的相关关系分析可知,湿度及降水因子与*ET*呈高度正相关关系,所以在湿度和降水减弱的地区其*ET*值也较小。反之冬春季节亦然。因此在平原向山地丘陵的过渡地带产生了一条较明显的分界线。

从蒸散的时空分布可以看出,山东省秋冬及初春季节蒸发量与潜在蒸发能力之间的差值很大,鉴于*ET*及*PET*与降水等气象因素的密切关系,也可间接反映山东省在这一时期易发生旱灾;夏季雨热同季虽然有利于农作物的生长,但暴雨高度集中易导致洪水频发(孙安健, 2000; 杨罗, 2000; 王庆等, 2004),除了造成农田内涝外,往往亦容易形成河堤漫溢溃决。无论是旱灾抑或洪灾,都会对农业生产带来灾难性的影响。山东是中国的农业大省,如何利用遥感数据及气象观测数据更精准地分析和预测蒸散发的时空变化特征以便更好地服务农业生产是一项极具挑战性的研究课题。

参考文献(References)

杜加强, 熊珊珊, 刘成程, 等. 2013. 黄河上游地区几种参考作物蒸散量计算方法的适用性比较[J]. 干旱区地理, 36(5): 831-840. [Du J Q, Xiong S S, Liu C C, et al. 2013. Comparison of models for estimating reference crop evapotranspiration in the headwater catchment of the Yellow River Basin, China[J]. Arid Land Geography, 36(5): 831-840.]
冯景泽, 王忠静. 2012. 遥感蒸散发模型研究进展综述[J]. 水利学报, 43(8): 914-925. [Feng J Z, Wang Z J. 2012. A re-

- view on evapotranspiration estimation models using remotely sensed data[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 43(8): 914-925.]
- 郎登潇, 师嘉祺, 郑江坤, 等. 2017. 近52a西南地区潜在蒸散发时空变化特征[J]. *长江流域资源与环境*, 26(6): 945-954. [Lang D X, Shi J Q, Zheng J K, et al. 2017. Spatial and temporal variations of potential evapotranspiration in southwestern China from 1962 to 2013[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 26(6): 945-954.]
- 李超凡, 罗格平, 李均力, 等. 2012. 近20a中亚净初级生产力与实际蒸散发特征分析[J]. *干旱区地理*, 35(6): 919-927. [Li C F, Luo G P, Li J L, et al. 2012. Net primary productivity and actual evapotranspiration of Central Asia in recent 20 years[J]. *Arid Land Geography*, 35(6): 919-927.]
- 李星敏, 杨文峰, 卢玲. 2011. 基于遥感技术的两种区域蒸散发估算方法的应用比较[J]. *高原气象*, 30(1): 125-132. [Li X M, Yang W F, Lu L. 2011. Comparison of application results of two evapotranspiration estimation methods by remote sensing[J]. *Plateau Meteorology*, 30(1): 125-132.]
- 卢玲, 李新, 黄春林, 等. 2007. 中国西部植被水分利用效率的时空特征分析[J]. *冰川冻土*, 29(5): 777-784. [Lu L, Li X, Huang C L, et al. 2007. Analysis of the spatio-temporal characteristics of water use efficiency of vegetation in West China[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 29(5): 777-784.]
- 潘竞虎, 刘春雨. 2010. 基于TSEB平行模型的黄土丘陵沟壑区蒸散发遥感估算[J]. *遥感技术与应用*, 25(2): 183-188. [Pan J H, Liu C Y. 2010. Retrieving evapotranspiration of loess hilly-gully region using TSEB parallel model based on remote sensing image[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 25(2): 183-188.]
- 孙安健, 高波. 2000. 华北平原地区夏季严重旱涝特征诊断分析[J]. *大气科学*, 24(3): 393-402. [Sun A J, Gao B. 2000. A diagnostic analyses of serious flood/drought during summer season in the north China plane[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 24(3): 393-402.]
- 王庆, 龚佃利, 孙即霖, 等. 2004. 山东夏季旱涝指数的振荡特征[J]. *中国海洋大学学报*, 34(2): 173-181. [Wang Q, Gong D L, Sun J L, et al. 2004. Oscillatory characteristic of Shandong summer rainfall index[J]. *Journal of Ocean University of China*, 34(2): 173-181.]
- 王希, 刘兰妹, 徐征和, 等. 2013. 山东省1960-2011年参考作物蒸散量变化特征研究[J]. *生态环境学报*, 22(8): 1371-1377. [Wang X, Liu L M, Xu Z H, et al. 2013. Variation characteristics of reference crop evapotranspiration from 1960 to 2011 in Shandong Province[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 22(8): 1371-1377.]
- 杨罗. 2000. 山东省水旱灾害变化规律分析及减灾对策建议[J]. *山东水利*, (2): 12-13. [Yang L. 2000. Analysis and Prevention countermeasures of drought flood hazards in Shandong Province changes[J]. *Shandong Water Resources*, (2): 12-13.]
- 杨文峰, 李星敏, 卢玲. 2013. 基于能量平衡的蒸散发遥感估算模型的应用研究[J]. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 41(2): 46-52, 60. [Yang W F, Li X M, Lu L. 2013. Application of remote sensing model based on energy balance to estimate evapotranspiration[J]. *Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition*, 41(2): 46-52, 60.]
- 苑文华, 张玉洁, 孙茂璞, 等. 2010. 山东省降水量与不同强度降水日数变化对干旱的影响[J]. *干旱气象*, 28(1): 35-40. [Yuan W H, Zhang Y J, Sun M P, et al. 2010. Impact of annual precipitation and rainy days with different grades variation on drought disaster in Shandong Province[J]. *Journal of Arid Meteorology*, 28(1): 35-40.]
- 张静, 任志远. 2017. 基于MOD16的汉江流域地表蒸散发时空特征[J]. *地理科学*, 37(2): 274-282. [Zhang J, Ren Z Y. Spatio-temporal characteristics of evapotranspiration based on MOD16 in the Hanjiang River Basin[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 37(2): 274-282.]
- 张晓琳, 熊立华, 林琳, 等. 2012. 五种潜在蒸散发公式在汉江流域的应用[J]. *干旱区地理*, 35(2): 229-237. [Zhang X L, Xiong L H, Lin L, et al. 2012. Application of five potential evapotranspiration equations in Hanjiang Basin[J]. *Arid Land Geography*, 35(2): 229-237.]
- 左德鹏, 徐宗学, 程磊, 等. 2011. 基于辐射的潜在蒸散量估算方法适用性分析[J]. *干旱区地理*, 34(4): 565-574. [Zuo D P, Xu Z X, Cheng L, et al. 2011. Assessment on radiation-based methods to estimate potential evapotranspiration[J]. *Arid Land Geography*, 34(4): 565-574.]
- Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. 1998. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements [R]. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Rome Italy: FAO.
- Bastiaanssen W G M, Menenti M, Feddes R A, et al. 1998. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation[J]. *Journal of Hydrology*, 212-213: 198-212.
- Mu Q Z, Heinsch F A, Zhao M S, et al. 2007. Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data[J]. *Remote sensing of Environment*, 111(4): 519-536.

Mu Q Z, Zhao M S, Running S W, et al. 2011. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm [J]. *Remote Sensing of Environment*, 115(8): 1781-1800.

Su Z. 2002. The surface energy balance system (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 6(1): 85-100.

Spatiotemporal variations of evapotranspiration and potential evapotranspiration in Shandong Province based on station observations and MOD16

ZHAO Shen^{1,2}, CHEN Shaohui^{1*}

(1. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Spatiotemporal pattern analysis of evapotranspiration plays an important role in understanding the interaction between climate change and water resources. Based on the Penman-Monteith formula, this study analyzed the temporal and spatial characteristics of land surface evapotranspiration and its correlation with meteorological factors in Shandong Province from 2000-2014 with the MODIS ET product (MOD16) and the observation data of evaporation dishes at meteorological stations. We first examined the accuracy of MOD16 for Shandong Province and selected 13 weather stations within the province with daily values of atmospheric pressure, temperature, precipitation, evaporation, relative humidity, wind direction, wind speed, sunshine hours, and 0 cm land surface temperature from 2000-2014. Through the analysis of the spatiotemporal correlation between MOD16 potential evapotranspiration (PET) and the observation data of evaporation dishes at the meteorological stations, the effectiveness of the MOD16 PET in the area was verified. Then we used the MRT tool provided by MODLAND to splice MOD16 and convert the projection into longitude and latitude by taking WGS-84 as the reference surface. Finally, based on MOD16 and the meteorological data, the spatiotemporal distribution characteristics of ET and PET from 2000-2014 were analyzed. The main conclusions are as follows. (1) There was plentiful water in the eastern part of Shandong Province while the western part was short of water, which resulted in a clear difference of ET over different areas in the province. (2) The annual fluctuations of ET and PET from 2000-2014 were relatively small. The average value of ET was 1529 mm while that of PET was 2178 mm, which indicates that Shandong Province is a relatively dry area. (3) The correlation analysis between evapotranspiration and meteorological factors indicates that the spatiotemporal variation of evapotranspiration was closely related to many climatic factors, especially the water and heat conditions.

Key words: MOD16; evapotranspiration; potential evapotranspiration; meteorological factor; spatiotemporal variation; Shandong Province