

基于 MOD16A2 的毛乌素沙地实际蒸散量时空稳定性模拟

刘 静¹,刘铁军¹,杜晓峰¹,吴永胜¹,包玉龙²

(1.水利部牧区水利科学研究所,内蒙古 呼和浩特 010020;2.内蒙古师范大学,内蒙古 呼和浩特 010020)

摘 要:基于 MOD16A2 遥感数据产品,统计分析毛乌素沙地 2000—2014 年地表实际蒸散量(*ET*)多年年、月平
均值,探讨不同时空尺度下 *ET* 的分布特征及变化趋势。结果表明:毛乌素沙地 *ET* 年际月均的时空分布规律总体呈
现显著地带性和季节性。冬春季节,*ET* 呈下降趋势,下降速率 53.24%;夏秋季节,*ET* 先增后减。沙地 4 月份 *ET* 最
低最干旱,多年 *ET* 均值在 10 mm 以下,9 月和 12 月出现 2 次峰值,其 *ET* 量约为 20 mm 和 25 mm。多年 *ET* 年均值
呈现东南部高于西北部的趋势。主要蒸散范围在 17.5~22.5 mm 之间。15 a 间毛乌素沙地波动区间面积排序为:轻
度(33.67%)>中度(32.04%)>强烈(18.46%)>微弱(15.83%)。*ET* 总体表现为西南波动强烈,东北波动较缓,中部平
稳。15 a 间,毛乌素沙地 *ET* 增加趋势占 34.38%,减少和不变趋势基本一致,各占 28.49%和 28.13%。沙地总体增加
大于减少,说明沙地气候改善,干旱减轻。MOD16 产品反演结果与多年气象、文献等研究结果一致,能够满足毛乌素
沙地地表蒸散量时空变化分析的要求。

关键词:蒸散量;MOD16A2;时空分布特征;稳定性;毛乌素沙地

中图分类号:S161.4 **文献标志码:**A

Simulation on spatio-temporal stability of *ET* based on MOD16A2 in Mu Us sandy land

LIU Jing¹, LIU Tiejun¹, DU Xiaofeng¹, WU Yongsheng¹, BAO Yulong²

(1. Institute of Water Resources for Pastoral Area of the Ministry of Water Resources
of China, Hohhot, Inner Mongolia 010020, China;

2. Inner Mongolian Normal University, Hohhot, Inner Mongolia 010020, China)

Abstract: This paper used MOD16A2 remote sensing data to analyze the mean value of evapotranspiration (*ET*) at different years and months of 2000–2014 in the Mu Us sandy land, in order to discuss the distribution characteristics and variation tendency of *ET* in different time-space scales. The results showed that, the temporal distribution of *ET* in the Mu Us sandy land had significant zonality and seasonality variation characteristics. *ET* had a decreasing trend in winter and spring, which was dropping by the rate of 53.24% at first, on the contrary, *ET* increased first and then decreased in the summer and autumn. The lowest mean value of *ET* in April was less than 10 mm and the others peaks appeared in September and December that mean values were 20 mm and 25 mm. The annual average of *ET* in the southeast was higher than that in the northwest, which changed from 17.5 to 22.5 mm. For the past 15 years, the order of fluctuating area was: mild (33.67%) > morderate (32.04%) > severe (18.46%) > slight (15.83%). *ET* fluctuated strongly in the southwest, then slowly in the northeast and steadily in the middle of Mu Us sandy land. During the past 15 years, the *ET* increased by 34.38%, decreased by 28.49%, and remained unchanged by 28.13%. Mu Us sandy land showed that the increasing trend was rapider than the decreasing trend. Meanwhile, it indicated that the climate of this area improved and the drought was reduced. The results illustrated that MOD16A2 product was applicable for the analysis of Mu Us sandy land distribution characteristic of *ET*, which

were satisfied the requirement of spatial and temporal variation analysis.

Keyword: evapotranspiration; MOD16A2; spatial and temporal distribution characteristics; space-time stability; Mu Us sandy land

毛乌素沙地主要覆盖鄂尔多斯高原西部和陕北长城沿线区域,是以草原和农牧交错区为主的生态脆弱过渡带。毛乌素沙地在气候(蒙古-西伯利亚反气旋中心向东南季风区)、区域(干旱向半干旱区)、景观(沙漠向黄土高原)、土壤侵蚀类型(风蚀向水蚀)等自然特征方面均表现出了明显的过渡性^[1]。毛乌素沙地气候干燥、降水稀少、蒸发强烈、植被类型单一、生态环境脆弱,导致沙尘暴强度和频次不断增加,生态环境恶化。该区长期干旱少雨,降雨量远远小于地面渗透量,地表水系不发达,地下水也较贫乏,且分布不均,导致区内植被覆盖度较低。沙地内土地荒漠化发展迅速,对西部地区环境造成严重危害,因此一直以来毛乌素沙地都是中国荒漠化研究专家和学者关注并致力于长期研究的热点地区^[2]。

蒸散发(Evapotranspiration, *ET*)是水量平衡、能量平衡、水循环的重要过程,主要包括土壤表面和植物冠层的蒸发、蒸腾。全球陆地降水约 60% 以蒸散形式返回大气,在降水较少的干旱地区达到 90%^[3],因此在毛乌素沙地 *ET* 是水分流失的主要途径。科学量化 *ET* 并清楚地认识 *ET* 的时空动态,对于合理利用毛乌素沙地稀有的水资源、促进沙区生态环境平衡意义重大。自从 1802 年 Dalton 提出蒸散发的计算公式后,世界各地专家学者开始对蒸散发进行广泛的研究^[4-8],随着研究的不断深入,蒸散发的计算方法也在不断增多,其中以经验法和物理模型法为主。其中最具影响力的是将表面抗阻概念融入计算非饱和下垫面蒸散发公式,形成了 Penman-Monteith 公式,该公式作为蒸散发计算的经典算法直到现在仍然被广泛应用。我国利用遥感影像估算区域蒸散发的研究基本开始于 20 世纪 80 年代,现今也取得了很多研究成果。如马宏伟等^[9]都分别利用不同尺度的遥感数据反演了生态需水。传统的蒸散发监测、计算无法准确地对土壤及植被的实际蒸散发进行监测,其监测尺度也只是局限于“点”的小尺度范围,而大尺度空间的研究能够更加宏观地反映出区域的一些变化特征及规律。大尺度界面的非均匀性,使得遥感这一先进的手段在观测或模拟的诸多方法中更具优势,同时也促进了区域 *ET* 的研究^[10-13]。近年来,随着遥感数据及技术的广泛应用,遥感反演 *ET* 已经成为生态、水文等相

关学科热点问题,其尺度也可以实现上推到“面”的大尺度范围。

本文运用 MOD16-ET 产品数据,空间分辨率 1 km,统计并分析毛乌素沙地 *ET* 时空变化特征及空间稳定性模拟(数据精度通过验证),结论为沙地生态修复及植被需水的高效利用提供参考依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区选取整个毛乌素沙地,其中包括毛乌素的内蒙古部分、陕西榆林地区的北部及宁夏回族自治区的一小部分,主要包括鄂托克旗东南部、鄂托克前旗、乌审旗以及伊金霍洛旗南部、陕西榆林地区的北部以及宁夏回族自治区盐池县的东北部。由于毛乌素沙地的北部边缘已经扩大到乌审旗北部和伊金霍洛旗西北部,并与库布齐沙漠连接,而且沙漠化面积在纬度上现已向北扩展到 39°30',所以研究区地理位置选择了 107°20'~111°30'E, 37°25'~39°30'N,其他界线用行政界线界定,研究区面积为 39 835 km²^[14]。

1.2 数据来源

蒸散产品(MOD16)从 <http://www.ntsg.umd.edu/project/mod16> 下载。蒸散数据采用 MOD16 蒸散产品数据。MOD16A2 数据分辨 1 km,扫描周期为 8 d,时间尺度为天、月、年,可下载分析全球植被覆盖区域的蒸散量、潜在蒸散量、潜热通量、潜在潜热通量数据。本次下载时间为 2000—2014 年,时间尺度为月,单位为每月 0.1 mm 的蒸散量(*ET*)数据。

1.3 数据处理

MOD16 产品是采用分级数据格式(HDF, Hierarchical Data Format)、正弦曲线投影存储的,因此首先需要利用 NASA 提供的 MODIS Reprojection Tool (MRT) 软件转换为 GeoTiff 格式文件,并进行投影转换、轨道镶嵌和重采样等操作。本次提取 *ET* 之后在 ERDAS IMAGINE 2013 中进行空间建模,计算多年 *ET* 年均值和月均值后生成图像;利用毛乌素沙地的矢量边界图,切割出本次研究区范围。在 ARC-GIS10 系统中,制作毛乌素沙地 2000—2014 年的年、月 *ET* 平均分布图。

利用线性倾向斜率法对毛乌素沙地 *ET* 时空变化趋势进行分析。分析估算包括波动度和趋势线斜

率值的计算。计算结果用相关系数的统计检验方法进行显著性趋势检验。计算依照公式(1)~(3):

$$\overline{ET}_{ij} = \sum_{t=1}^{15} ET_{ij}^t / 15 \quad (1)$$

式中, t 为年份序列; i, j 分别代表栅格图中的行与列; ET_{ij} 表示图像中第*i*行,第*j*列在所在像元的蒸散值。 $\overline{ET}_{ij}$ 表示15 a的平均蒸散。

$$T_{ij} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (ET_{ij}^t - \overline{ET}_{ij})^2} \quad (2)$$

式中, T_{ij} 代表图像中第*i*行,第*j*列像元的标准差值; t 表示时间序列^[15-18]。利用上述公式计算出波动度,用来反映区域内各像元偏离均值的波动程度,其值越大表示波动越强烈,值越小则越稳定。

$$S_{ij} = \frac{n \sum_{t=1}^n t \overline{ET}_{ij}^t - \sum_{t=1}^n t \sum_{i=1}^n \overline{ET}_{ij}^t}{n \sum_{t=1}^n t^2 - \left[\sum_{t=1}^n t \right]^2} \quad (3)$$

式中, S 为线性趋势倾向程度, ET 为蒸散量, t 为监测时间段年限, $n = 15$ 。当 $S > 0$ 时,随时间 t 的增加, ET 呈上升趋势;当 $S < 0$ 时,随时间 t 的增加, ET 呈下降趋势。 S 斜率值大小反映了蒸散量上升或下降的速率,即表示上升或下降的倾向程度。 S_{ij} 是该像元在15 a的均值 ET 用一元线性回归模拟出的一个总的变化趋势,如果回归方程的相关系数通过信度为0.05或0.01的显著性水平($P < 0.05$ 、 $P < 0.01$),则蒸散减小或增加趋势分别达到显著和极显著水平^[19-24]。

线性倾向值用来分析毛乌素沙地 ET 随长时间序列整体发生变化情况。伴随长时间序列, ET 空间分布格局会整体呈现上升或下降趋势,特别应注意在某时刻转折、突变点的出现,这些特殊时刻数据,往往在结果分析中具有重要价值。

将最终计算的波动度、线性倾向斜率值采用“自然间断点”分类法对波动度模拟数据进行分类,其分类原理是能够在数据序列中差异相对较大的位置设定边界。该分类法优点是在较真实地保留原始数据性质的同时,对相似值进行了最恰当的分组,并实现了各类之间的差异最大化。

2 结果与分析

2.1 多年 ET 年际月均时空变化分析

图1为根据MOD16数据产品经过数据转换、镶嵌、裁剪后得到的毛乌素沙地 ET 多年月均分布情况。可以看出3月是全年 ET 量最低月份,该月在沙地的西部边缘最早出现0~10 mm以下 ET ,之后

低 ET 范围逐渐向东部延伸,直至沙地, ET 几乎全部下降至10 mm以下;之后东部开始零星出现 ET 上升区域。随着植被生长季节的到来,高 ET 由东部逐渐向沙地中部及南部扩展,尤其到了雨水充足植被生长旺盛的8月,东部大部分地区及沙地南缘等沙区治理好的地区,明显出现27.5 mm以上的 ET ,东部及南部边缘部分有地区 ET 达到30 mm以上。

从图2可以看出,毛乌素沙地冬春季节, ET 呈下降趋势。15 a间多年月均 ET 从1月份的22.5~25 mm开始以平均53.24%的速率逐月下降,4月份到达最低点,此时整个毛乌素沙地92.23% ET 量在10 mm以下。夏季沙地 ET 逐月上升,6月沙地植被开始返青, ET 量微量增加,但仍以20 mm以下为主。盛夏是沙地植被生长最旺盛的时期,此时期降水增多,日照充足,水汽充沛,有利于蒸散, ET 量迅速上升,20 mm以上 ET 量从32.38%上升到76.80%。入秋后,降水减少,植被凋落,外界条件不利于蒸散,沙地 ET 迅速下降。10月沙地已提前进入冬季,气温降低,降雪较早,故 ET 仍有小幅上升,但25 mm以上高 ET 全部消失,80.1%蒸散区间分布在15~20 mm之间。11—12月沙地 ET 量上升幅度较大,最高达27.5 mm,12月份沙地98.36%的 ET 在22.5~27.5 mm。

综上可知,毛乌素沙地由于其特殊的地理位置和气候条件, ET 多年月均空间分布差异明显,规律独特。多年月均呈现先增后减的双峰型分布曲线,两次峰值出现在9月和12月,最低值出现在3—4月。空间分布规律呈现东部高于西部,南部高于北部;随季节变换, ET 呈现自西向东逐渐减少,继而又由东部向西部及南部逐渐增加的趋势。整个沙地全年 ET 东南部显著高于其余地区。有研究者曾对2000—2013年毛乌素沙地年均气温做过相关研究,发现沙地多年四季气温均匀上升,而冬季升温速率最快。冬季气候变暖,水热循环、蒸腾作用加强,植被生长季延长、物候期推迟,地表蒸发量也随之增大^[25-27]。这也合理解释了沙地12月份 ET 出现峰值的原因。

2.2 多年 ET 年际时空变化特征分析

图3显示了毛乌素沙地2000—2014年 ET 逐年变化过程,从图中可以看出2000—2014年间毛乌素沙地地表蒸散量的主要蒸散范围在17.5~22.5 mm之间。沙地南部始终出现高蒸散范围大于27.5 mm区域,而西北低蒸散范围始终在12.5 mm以下。这就说明毛乌素沙地多年 ET 平均值具有较强的空间

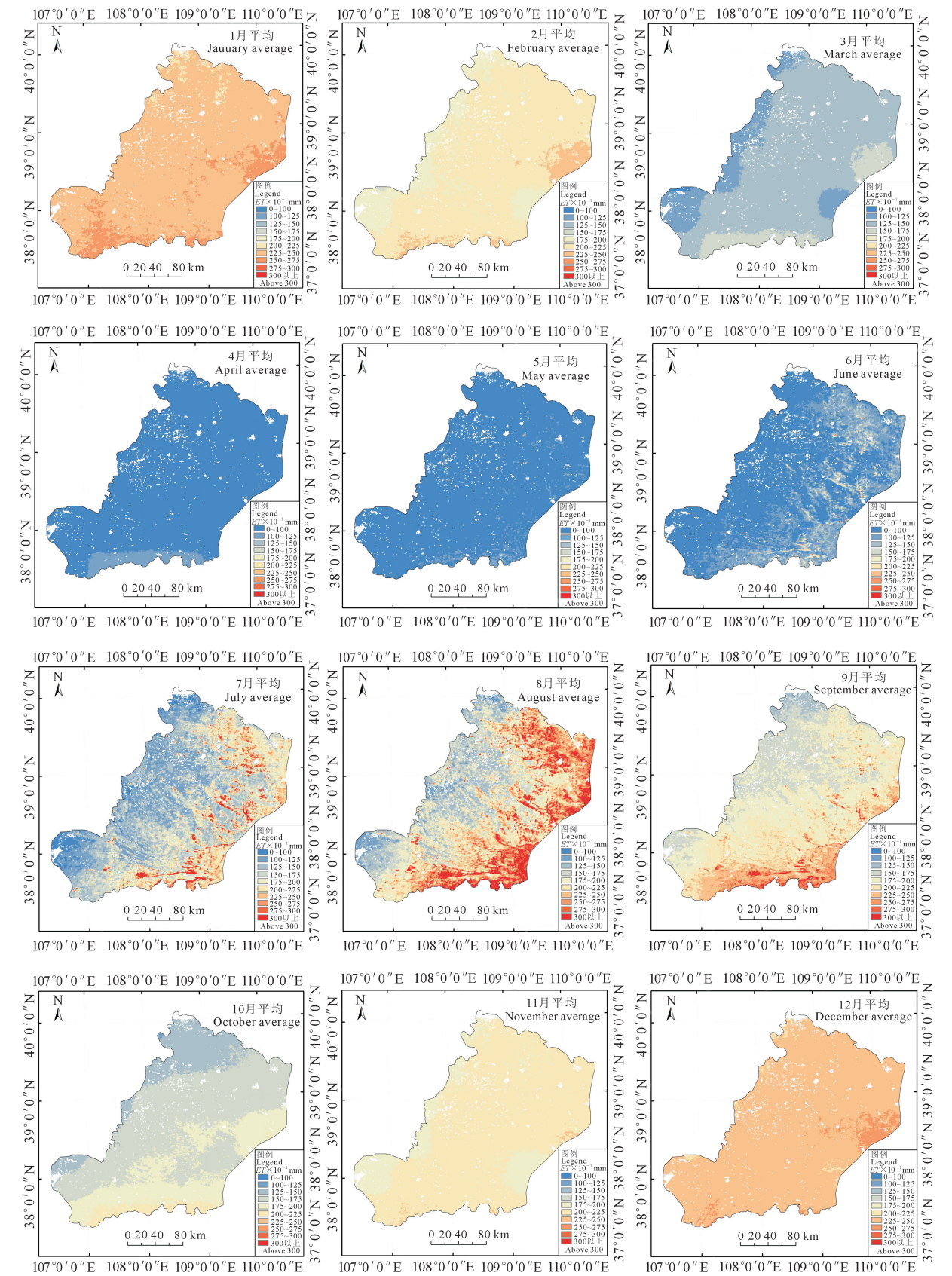


图 1 毛乌素沙地多年月平均蒸散反演

Fig.1 Retrieval of monthly average *ET* in Mu Us sandy land

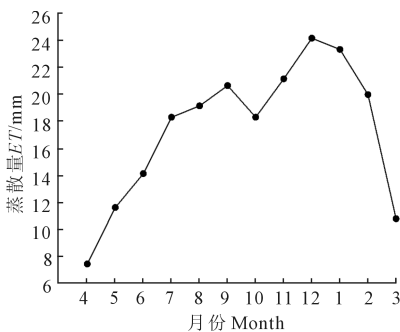


图 2 毛乌素沙地多年蒸散量月变化

Fig.2 Monthly variation of annual ET in Mu Us sandy land

分异性,呈现东部高于西部,南部高于北部,不同空间位置 ET 差异较大,层次分明,这一特征与沙地地表植被覆盖的地带性变化大体一致,蒸散量高的地方植被覆盖度也相对较高。分析具体原因可能是由于沙地东部和南部治理时间较长、措施完善,植被恢复情况良好,植被覆盖度高,多年平均蒸散量也最高,均在 20 mm 以上,零星有 30 mm 以上区域呈条状分布出现,应该为人工植被区。

时间分布上,毛乌素沙地 15 a 的蒸散分布呈逐年线性增大的趋势并不明显,有 3 个蒸散量明显超出多年平均值的年份(2002、2003、2012 年);有 4 个明显低于多年平均值的年份(2000、2005、2006、2014 年),其余年份的蒸散量几乎相当。ET 年际空间分布特征表明:近 15 a 毛乌素沙地 ET 的主要蒸散范围在 17.5~22.5 mm 之间。年均蒸散量波动范围为 448.0~533.3 mm,多年平均蒸散量为年均 493.3 mm。年蒸散量明显超出多年平均值的年份包括 2002、2003、2012 年,明显低于多年平均值的年份包括 2000、2005、2006、2014 年,其余年份的蒸散量几乎相当。有研究者就 2000—2013 年毛乌素沙地年均降水量进行分析后得出结论,沙地 14 a 的年均降水呈波动性增加趋势;2000—2013 年毛乌素沙地的年均降水量为 359.59 mm,其中 8 a(2001 年、2002 年、2003 年、2007 年、2008 年、2011 年、2012 年和 2013 年)超过平均水平,尤其在 2012 年出现降水峰值,年均降水量达到 473.19 mm;而 6 a(2000 年、2004 年、2005 年、2006 年、2009 年和 2010 年)均低于平均水平,且 2000 年出现降水低谷值,仅为 212.44 mm^[18]。这个降水规律正好验证了本文的 ET 结论。

2.3 多年 ET 空间动态变化特征模拟分析

2.3.1 多年 ET 空间稳定性模拟及分析 图 4 和表 1 是经过波动值栅格计算、剔除极值、自然断点分区、标准差法分析得出的毛乌素沙地 2000—2014 年 ET 的稳定性模拟结果。将整个沙地的 ET 波动值

分成 4 个 ET 波动区间(用 T 表示),即微弱波动区域($-0.02 < T < -0.03$)、轻度波动区域($-0.03 < T < 0.02$)、中度波动区域($0.02 < T < 0.07$)、强烈波动区域($0.07 < T < 0.2$)。由图 4 和表 1 可知,毛乌素沙地 ET 整体呈现西南部波动强烈而东北波动较缓、中部较为稳定的经向分布规律。各波动区间蒸散量的分布中,轻、中度波动居多,微弱波动和高波动次之,呈现稳定性地域差异大的特征。波动区间面积排序为:轻度波动>中度波动>强烈波动>微弱波动。其中 ET 呈现极低波动区域面积占毛乌素沙地整个面积的 15.83%,主要集中在西部和北部;轻度波动区域面积占 33.67%,主要分布在沙地的中西部;中度波动区域面积最多占 32.04%,遍布除西北以外的整个毛乌素沙地;强烈波动区域面积占 18.46%,主要分布在沙地南缘和中东部,呈大斑块和粗条带状分布,应多为人工植被和造林区域。

2.3.2 多年 ET 空间线性变化趋势分析 图 5 和表 2 是采用线性趋势计算法,去除极值,等间隔划分区间后得到的毛乌素沙地近 15 a 的 ET 变化趋势结果。本次将变化趋势 Slope 值(以下用 S 表示)定义为严重减少($-33 < S < -11$)、轻微减少($-11 < S < -2$)、基本不变($-2 < S < 5$)、轻微增加($5 < S < 13$)、显著增加($13 < S < 47$)5 个等级。结果表明:研究期整个毛乌素沙地蒸散增加面积大于减少面积,其中增加区域占 34.38%,轻微($P < 0.05$)、显著($P < 0.01$)增加面积各占 18.46%和 15.92%,这些区域主要位于沙地东南部的陕西境内,尤其在沙地东缘和南缘已经形成斑块区域,这与陕西省近年实施了大面积的生态治理工程,植被覆盖及气候条件明显改善有关。蒸散减少面积占 28.49%,轻微减少($P < 0.05$)是严重($P < 0.01$)减少的 2 倍,减少区域主要位于毛乌素沙地内蒙部分的乌审旗和鄂托克旗境内,这两个旗县土壤、气候等自然条件较差,长期生态治理工程效果不明显,虽已有所改善,仍有待进一步加强。沙地 28.13%变化趋势不明显,主要分布在沙地北部、中东部和西部,且形成连续大斑块,说明该地区近 15 a 来气候稳定,植被生长变化不大。

3 讨论与结论

本文采用 MOD16 蒸散产品数据,运用遥感图像处理系统和地理信息系统,对毛乌素沙地 2000—2014 年 15 a 间 ET 时空分布特征、波动度及变化趋势进行了模拟。主要结论如下:

(1)2000—2014 年毛乌素沙地 ET 时空分布规律具有显著的季节分异特征,冬春季节,ET 呈下降趋

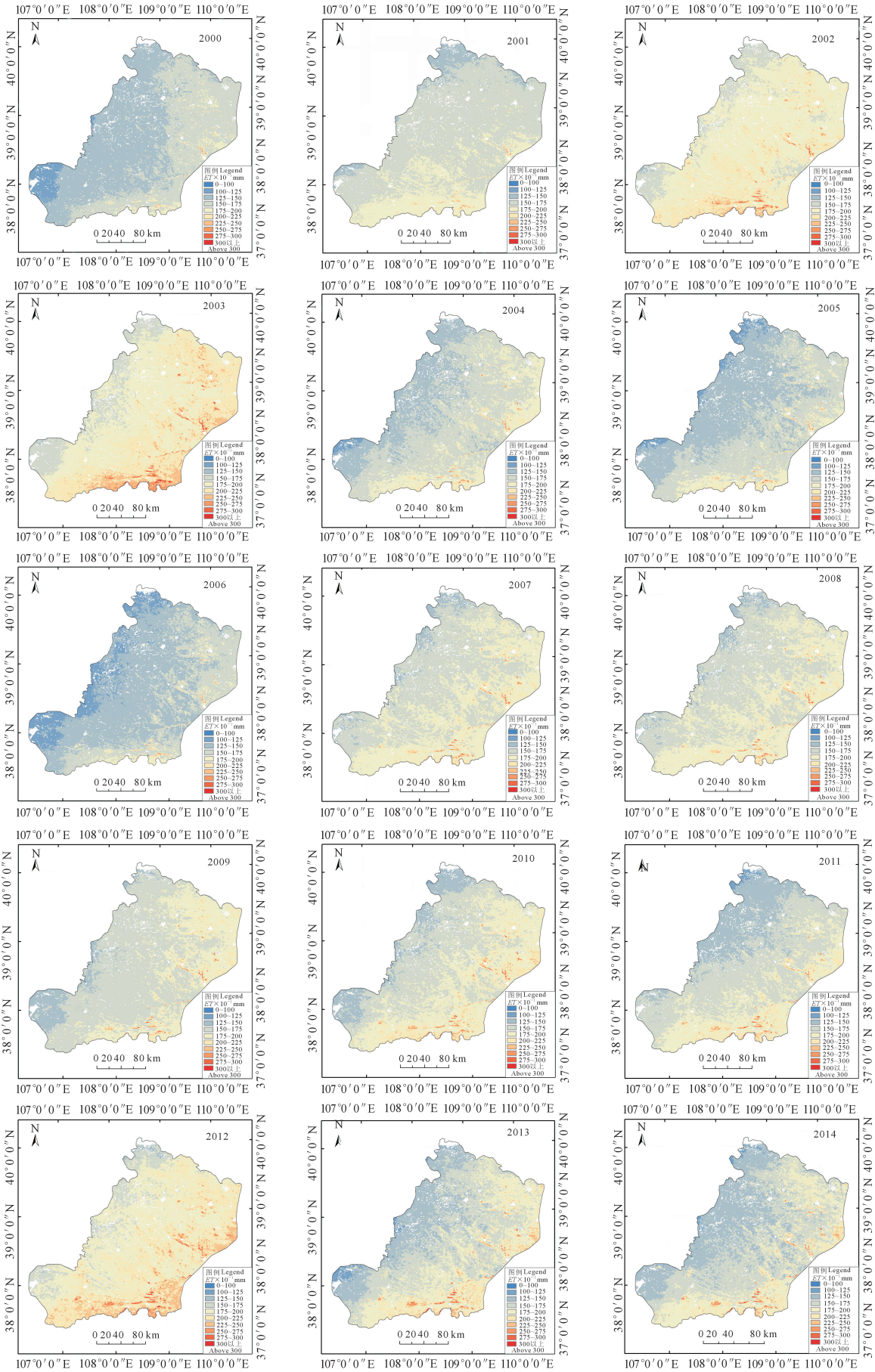


图3 毛乌素沙地 2000—2014 年多年蒸散年际变化
Fig.3 Annual variation of ET in Mu Us sandy land during 2000-2014

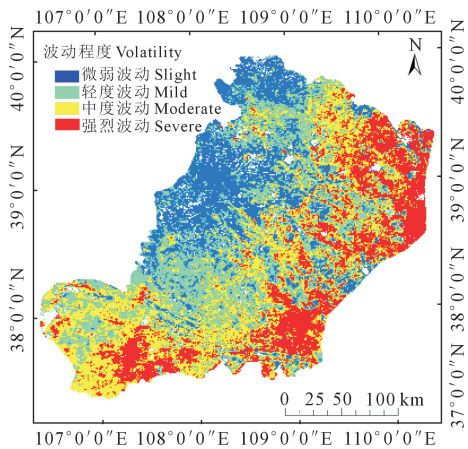


图 4 毛乌素沙地 2000—2014 年 *ET* 年际波动程度
Fig.4 The fluctuation degree of *ET* during 2000—2014 in Mu Us sandy land

表 1 毛乌素沙地 2000—2014 年 *ET* 波动程度分类
Table 1 Classification of the fluctuation degree of *ET* during 2000—2014 in Mu Us sandy land

波动程度 Volatility	波动度 (<i>T</i>) 取值范围 Value range of fluctuation (<i>T</i>)	像元数 Count	面积比例/% Area ratio
微弱波动 Slight	$-0.02 < T < -0.03$	6307	15.83
轻度波动 Mild	$-0.03 < T < 0.02$	13413	33.67
中度波动 Moderate	$0.02 < T < 0.07$	12762	32.04
强烈波动 Severe	$0.07 < T < 0.2$	7352	18.46
合计 Total		39835	100.00

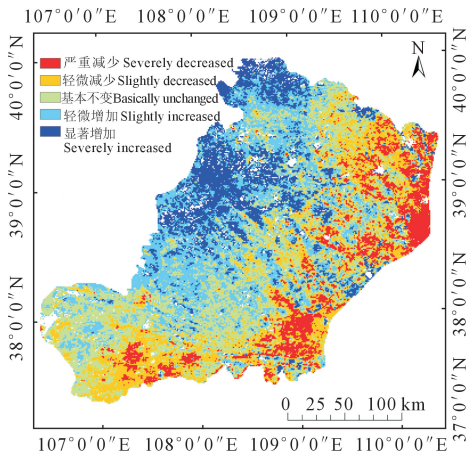


图 5 毛乌素沙地 2000—2014 年 *ET* 年际变化趋势
Fig.5 The change trend of *ET* during 2000—2014 in Mu Us sandy land

表 2 毛乌素沙地 2000—2014 年 *ET* 变化趋势分类
Table 2 Classification of the variation trend degree of *ET* during 2000—2014 in Mu Us sand land

趋势类型 Tendency	趋势值(<i>S</i>) 取值范围 Value range of trend (<i>S</i>)	像元数 Count	面积比例 Area ratio/%
严重减少 Severely decreased	$-33 < S < -11$	3949	9.91
轻微减少 Slightly decreased	$-11 < S < -2$	7403	18.58
基本不变 Basically unchanged	$-2 < S < 5$	10937	28.13
轻微增加 Slightly increased	$5 < S < 13$	11205	18.46
显著增加 Severely increased	$13 < S < 47$	6341	15.92
合计 Total		39835	100.00

势;夏秋季 *ET* 变化截然相反,出现先上升后下降的变化特征。15 a 间,沙地 4 月份 *ET* 最低最干旱,总面积的 92.23% 在 10 mm 以下。9 月和 12 月出现 *ET* 的两次峰值,整个沙地平均蒸散范围在 22.5 ~ 27.5 mm 之间。这与毛乌素沙地春季气温偏低,回暖较晚,而冬季气候变暖,植被生长季延长、物候期推迟的气候特点一致。

(2)2000—2014 年毛乌素沙地 *ET* 的年际波动变化不大,呈现西南部波动强烈而东北部波动较缓,中部波动较为稳定的经向分布规律。主要年波动范围在 448.0~533.3 mm 之间,多年平均 *ET* 为年 493.3 mm。*ET* 明显超出多年平均值的年份有 2002、2003、2012 年,明显低于多年平均值的年份有 2000、2005、2006、2014 年,其余年份 *ET* 几乎相当。这与研究区多年的降雨资料一致。说明 MOD16A2 数据可以用于研究区地表 *ET* 时空分布特征。

(3)2000—2014 年毛乌素沙地整体 *ET* 增加趋势比例最大,约占 34.38%;减少和不变趋势基本一致,各占 28.49% 和 28.13%。增加趋势位于生态治理措施较好的陕西府谷县、神木县和内蒙的准格尔旗境内,这些旗县的沙漠治理经验丰富,治理效果优异,多数是水土保持治理的示范旗县;各县生态、气候条件优良,栽培植被广布。不变趋势在乌审旗境内,且有大片斑块形成,说明经过多年生态治理,区内植被生长和气候都比较稳定。减少趋势位于自然气候条件相对恶劣的鄂托克前旗、鄂托克旗和杭锦旗境内,以荒漠草原和大片沙漠为主,主要植被类型是蒿属类,乔、灌木仅零星分布,生态治理难度较大。总之,沙地 15 a 间整体的气候改善,干旱程度减轻。

毛乌素沙地由于候条件恶劣多变、监测条件较差,以往对 *ET* 的研究多基于气象观测资料和试验研究,这些研究虽有重要价值,但在研究范围上也仅是基于“点”尺度^[28-29]。若将这些研究结果进行空间尺度扩展用于整个沙地 *ET* 计算,会引起较大误差。本文利用高分辨率 MOD16 蒸散产品,分析整个毛乌素沙地多年 *ET* 时空分布规律及变化趋势,可以弥补以往研究的不足。研究结果与毛乌素沙地多年气象资料、生态治理范围和区域治理效果相吻合,说明将 MOD16 蒸散产品用于研究区是可行的。但地表 *ET* 变化过程十分复杂,受地理、环境、气候、人为等因素影响较大。因此,在今后的研究中,本结论可作为基

础资料,结合研究区的实际情况,深入分析探讨其他因素对 *ET* 的影响,为今后提出更适宜毛乌素沙地生态恢复的治理措施提供依据。

参 考 文 献:

[1] 赵媛媛,丁国栋,高广磊.等.毛乌素沙区沙漠化土地防治区划[J].中国沙漠,2017,34(4):633-642.

[2] 董光荣,高尚玉,金焱.等.毛乌素沙漠的形成演变和成因问题.中国科学(B辑),1988,(6):633-642.

[3] 张巧凤,刘桂香,于红博,等.锡林郭勒草原蒸散发月季动态及相关因子分析[J].水土保持研究,2017,24(3):164-169.

[4] Su Z, Schmugge T, Kustas W P, et al. An evaluation of two models for estimation of the roughness height for heat transfer between the land surface and atmosphere [J]. Journal of Applied Meteorology, 2001, 40 (11):1933-1951.

[5] Stow D, Daeschner S, Hope A, et al. Variability of the seasonally integrated normalized difference vegetation index across the north slope of Alaska in the 1990s [J]. International Journal of Remote Sensing, 2003, 24(5):1111-1117.

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

[7] Chen Y, Xia J Z, Liang S L, et al. Comparison of satellite based evapotranspiration models over terrestrial ecosystems in China [J]. Remote Sensing of Environment, 2014, 140:279-293.

[8] Wang L C, Kisi O, Zounemat-Kermani M, et al. Pan evaporation modeling using six different heuristic computing methods in different climates China [J]. Journal of Hydrology, 2017, 544:407-427.

[9] 马宏伟.石羊河流域蒸散发遥感反演及生态需水研究[D].兰州:兰州大学,2011.

[10] Li Z L, Tang R L, Wan Z M, et al. A review of current methodologies for regional evapotranspiration estimation from remotely sensed data [J]. Sensors, 2009, 9(5):3801-3853

[11] Allen R G, Pereira L S, Howell T A, et al. Evapotranspiration information reporting: II. Recommended documentation [J].Agricultural Water Management, 2011, 98(6):921-929.

[12] Bastiaanssen W G M, Menenti M, Feddes R A, et al. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1.

Formulation [J]. Journal of Hydrology, 1998,212-213;198-212.

[13] 高彦春,龙笛.遥感蒸散发模型研究进展[J].遥感学报,2008,12(3):515-528.

[14] 刘静.毛乌素沙地植被覆盖度动态变化的遥感监测[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2009.

[15] 李登科,范建忠,权文婷.陕西省植被退化及其驱动因素分析[J].生态学杂志,2015,12(3):515-528.

[16] 王文玉,杨沈斌,张强,等.近50年环青海湖高寒地区和环鄱阳湖湿润地区潜在蒸散变化比较分析[J].中国沙漠,2013,33(3):866-873.

[17] 廖杰,王涛,薛娴,等.黑河调水以来额济纳盆地湖泊蒸发量[J].中国沙漠,2015,35(1):228-232.

[18] 李玉霖,崔建垣,张铜会.参考作物蒸散量计算方法的比较研究[J].中国沙漠,2002,22(4):372-376.

[19] 吴桂平,刘元波,赵晓松,等.基于MOD16产品的鄱阳湖流域地表蒸散量时空分布特征[J].地理研究,2013,4(32):617-627.

[20] 于红博,杨劼,宋炳煜.皇甫川流域蒸散量遥感估算及动态变化研究[J].水土保持研究,2013,20(1):107-111.

[21] 郭辉,黄粤,李向义,等.基于多尺度遥感数据的塔里木河干流地区植被覆盖动态[J].中国沙漠,2016,36(5):1472-1479.

[22] 郭玉川,何英,李夏.基于MODIS的干旱区植被覆盖度反演及植被指数优选[J].国土资源遥感,2011,(2):115-118.

[23] 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):1-4.

[24] 陆增祥,孟好军,阎春鸣.基于MODIS遥感资料估算高原地表潜热通量[J].水土保持研究,2017,24(3):119-124.

[25] 王素萍,张存杰,韩永翔.甘肃省不同气候区蒸发量变化特征及其影响因子研究[J].中国沙漠,2010,30(3):675-680.

[26] 刘静,银山,张国盛,等.毛乌素沙地17年间植被覆盖度变化的遥感监测[J].干旱区资源与环境2009,23(7):162-167.

[27] 冯颖.毛乌素沙地植被覆盖度变化及其对气候变化的响应[D].北京:北京林业大学,2015.

[28] 刘闻,曹明明,邱海军,等.渭河流域关中段潜在蒸发量时空变化特征[J].地理学报,2014,34(9):1145-1152.

[29] 王素萍.近40a江河源区潜在蒸散量变化特征及影响因子分析[J].中国沙漠,2009,29(5):960-965.