

曲学斌,高绍鑫,窦华山,等.基于MOD16的呼伦贝尔蒸散量变化分析[J].沙漠与绿洲气象,2020,14(1):101-107.

doi: 10.12057/j.issn.1002-0799.2020.01.013

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



基于MOD16的呼伦贝尔蒸散量变化分析

曲学斌^{1,2},高绍鑫²,窦华山³,王彦平²,郑洪玉²,罗焕梅⁴

(1.中国气象局兰州干旱气象研究所,甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室,中国气象局干旱气候变化与减灾重点实验室,甘肃 兰州 730020;2.呼伦贝尔市气象局,内蒙古 呼伦贝尔 021008;3.内蒙古呼伦湖国家级自然保护区,内蒙古 呼伦贝尔 021008;4.朔城区气象局,山西 朔州 036002)

摘要:利用2001—2014年MOD16数据和气象站点资料,分析呼伦贝尔市 ET 、 PET 的时空变化特征。研究表明,呼伦贝尔市的年平均 ET 为310.0 mm,呈林区>农区>牧区分布,年平均倾向率为15.3 mm/10 a。年平均 PET 为1 096.0 mm,呈农区、牧区两侧向林区递减分布,年平均倾向率为-20.7 mm/10 a。牧区西部 ET 显著增加($P<0.05$)、 PET 显著减小($P<0.05$),其他地区 ET 、 PET 变化不显著。 ET 与 PET 之差在5—6月最高,该时段为呼伦贝尔市缺水最为严重的月份。结合气象因子分析,全年的 PET 均会受到气温的影响,而只有冬季的 ET 会受到气温影响,植被生长季里 ET 和 PET 都会受到相对湿度和降水的影响,生长季的日照长度也会对 PET 产生影响,但10 m风速与 ET 和 PET 的相关性较差。

关键词:蒸散量;潜在蒸散量;时空变化;呼伦贝尔

中图分类号:P426.2

文献标识码:A

文章编号:1002-0799(2020)01-0101-07

蒸散量(Evapotranspiration, ET)是植被及地面向大气输送的水汽总量,是土壤蒸发和植被蒸腾的水汽总量,全球约60%的降水通过蒸散的形式扩散到大气,是全球水循环中的重要环节^[1]。潜在蒸散(Potential Evapotranspiration, PET)是指在充分供水条件下的蒸散量,是管理地区水量平衡、评估气象干旱程度的重要参数^[2]。随着我国生态环境保护力度的加强,水资源的管理和可持续利用已受到全社会的高度关注, ET 和 PET 作为水资源研究的重要组成部分,越来越受到专家学者的重视^[3-4]。

传统估算或实测 ET 、 PET 的方法大都基于站点观测,受站点密度和下垫面复杂多变的限制,区域代表性较差。随着遥感技术的兴起,地表相关参数得以反演,使得大区域、长序列的 ET 、 PET 监测和研究成

为可能。 ET 、 PET 遥感估算模型可分为经验模型、遥感数值模型和能量余项模型^[5]。其中经验模型主要依靠地面观测数据与遥感数据的关系建立,Rivas, et al^[6]人建立的经验模型就属于此类,模型中的经验参数需要本地化,缺乏广泛的适用性。遥感数值模型是在陆面过程的基础上建立“物理—化学—生物”联合模型,物理意义非常明确,但陆面过程的参数众多且难以准确获取^[7]。能量余项模型是以能量平衡为基础,通过潜热通量、显热通量和土壤热通量反演 ET 、 PET ,苏忠波等^[8]建立的SEBS(The Surface Energy Balance System)模型、Bastiaanssen, et al^[9]建立的SEBAL(Surface Energy Balance Algorithm for Land)模型以及MOD16^[10]的算法均属于此类。

近些年来,MOD16产品以其较高的时空分辨率、便捷的获取方式和较为准确的反演结果得到了很多国内学者的认可^[11]。赵桑等^[12]利用MOD16分析了山东省 ET 、 PET 时空变化,表明地表植被对其变化趋势有重要影响。范建忠等^[13]基于MOD16分析了陕西省 ET 的时空变化特征。杨江州等^[14]利用

收稿日期:2019-05-06;修回日期:2019-07-02

基金项目:干旱气象科学研究基金(IAM201706);内蒙古气象局科技创新项目(nmqxkjcx201702)

作者简介:曲学斌(1988—),男,工程师,主要从事农牧用气象服务及研究。E-mail: qxbtd@qq.com

MOD16 分析了贵州省不同地貌类型区 PET 、 ET 的变化特征。呼伦贝尔市是我国东北最重要的生态屏障之一,境内同时拥有草原、森林、农田等不同生态区^[5],但目前针对呼伦贝尔市 ET 、 PET 的研究较少,不同生态区 ET 、 PET 的年、月的变化趋势尚不清楚。因此,开展呼伦贝尔市 ET 、 PET 时空变化研究,可以更好地揭示 ET 、 PET 变化规律,为当地水资源管理和有效利用提供科学依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

呼伦贝尔市地处内蒙古自治区东北部,平均海拔 659.2 m,面积为 $2.53 \times 10^5 \text{ km}^2$,其中森林 $1.26 \times 10^5 \text{ km}^2$ 、草原 $1.0 \times 10^5 \text{ km}^2$ 、500 多个湖泊、3000 多条河流,构成了目前中国规模最大、最为完整的生态系统。大兴安岭以东北—西南走向纵贯呼伦贝尔市,主要途经的 4 个旗(市、区)构成呼伦贝尔市的林区。岭西的 6 个旗(市、区)主要位于呼伦贝尔草原,是呼伦贝尔市的牧区。岭东为东北平原—松嫩平原边缘的 3 个旗(市、区)以农业生产为主,是内蒙古东北部最重要的粮食产区,即为呼伦贝尔市的农区(图 1)。呼伦贝尔市的年平均气温为 0.6°C ,自南向北依次递减,年平均降水量为 294.2 mm,自东向西依次递减,主要气候特点为:冬季寒冷漫长,夏季温凉短促,春季干燥风大,秋季降温迅速^[16]。

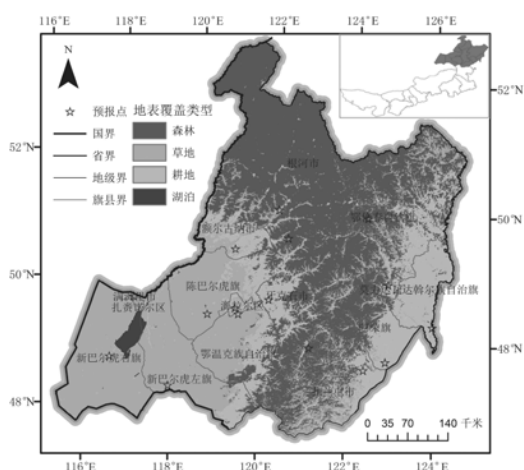


图 1 呼伦贝尔市地表覆盖类型及气象台站分布

1.2 数据源及预处理

ET 与 PET 数据采用蒙大拿大学地球动态数值模拟研究小组 (NTSG) 制作的 2001—2014 年 MOD16A2 和 MOD16A3 数据集 (<http://www.ntsg.umn.edu>),空间分辨率均为 1 km,时间分辨率分别为

月和年。其计算方式基于 Penman-Monteith 公式的改进,并结合卫星反照率、植被覆盖类型和其他气象数据获得, ET 和 PET 计算所使用的数据一致,仅陆面水环境参数不同^[17]。使用 MRT (MODIS Reprojection Tool) 对数据集进行投影、拼接和格式转化,并利用 ArcGIS 对影像进行裁剪和分析。MOD16 产品覆盖范围为植被覆盖区,不包含水体、城市等非植被覆盖区,因此将非植被覆盖区的 ET 和 PET 去除。气象数据源于中国气象数据网 (<http://data.cma.cn/>),包含呼伦贝尔市 16 个气象站点 2001—2014 年逐月和逐年的相对湿度、降水量、气温、日照时数和 10 m 风速等。在 ET 、 PET 月分布及变化、与气象要素相关性分析时,取站点周边 10 km 范围内植被覆盖区的均值,并按照站点所在地的农、牧、林区进行分区统计。

1.3 研究方法

利用相关系数法对 PET 数据进行验证,并分析 ET 、 PET 与气温、降水、相对湿度等气象要素的相关性。利用线性倾向率估计逐栅格 ET 、 PET 的时间变化趋势,其计算公式为^[18]:

$$a = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (i \times x_i) - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n x_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (1)$$

式中: a 为线性倾向率, n 为研究期长度, i 为年份, x_i 为 i 年对应 ET 或 PET 的值。当 $a > 0$ 时说明研究期内该地区的 ET 或 PET 有增加趋势,反之则为减少趋势。

1.4 数据验证

因此利用站点的气象观测数据和 FAO Penman-Monteith (P-M) 计算逐年的潜在蒸散量, P-M 的计算参照《气象干旱等级》(GB/T 20481-2017) 标准为:

$$Pe = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + r \frac{900}{T_{\text{mean}} + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + r (1 + 0.34 u_2)} \quad (2)$$

式中: Pe 为逐日的潜在蒸散量; R_n 为地表净辐射; G 为土壤热通量,本次研究在日时间尺度上参照草地土壤热容量做忽略不计处理; T_{mean} 为日平均气温; e_a 为实际水汽压; e_s 为饱和水汽压; u_2 为 2 m 高处风速,用台站测量的 10 m 风速带入国标中的订正方程获得; Δ 为饱和水汽压曲线斜率, r 为干湿表常数,均可根据各气象站实测资料和所在地理信息数据求解。求出逐日潜在蒸散量后再按所需时间尺度进行

统计。

P-M 的计算结果与站点周边 10 km 缓冲区内逐年的平均 *PET* 进行对比验证(图 2)^[19]。P-M 计算所得的 *PET* 以作物冠层为假想参照,因此普遍比 MOD16 的 *PET* 偏低 400~500 mm,但两者的相关性可达到极显著相关($P<0.01$),说明 MOD16 可以满足分析呼伦贝尔市蒸散发的要求。

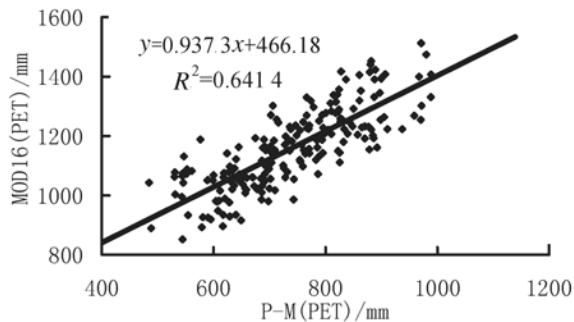


图 2 MOD16(*PET*)与 P-M(*PET*)的对比

2 结果与分析

2.1 年平均 *ET*、*PET* 的空间分布及变化

呼伦贝尔市 2001—2014 年的年平均 *ET*、*PET* 分布及变化如图 3。全市年平均 *ET* 为 310.0 mm,其中林区年平均 *ET* 为 401.5 mm,农区年平均 *ET* 为 334.0 mm,牧区年平均 *ET* 为 232.6 mm,整体呈林区>农区>牧区分布。大兴安岭南两麓林地由于植被覆盖度高、温度和降水条件在林区中相对较好,年平均 *ET* 为全市最高(>500 mm)。牧区西南部由于草地植被覆盖度偏低,降水偏少,年平均 *ET*<200 mm,为全市最低。全市 *ET* 的年变化倾向率平均为 15.3 mm/10 a,其中林区为 -18 mm/10 a,农区为 -3.7 mm/10 a,牧区为 64 mm/10 a,但仅牧区西南部通过了 0.05 的显著性水平检验。

全市年平均 *PET* 为 1 157.6 mm,其中林区年平均 *PET* 为 1 096.0 mm,农区年平均 *PET* 为 1 225.8 mm,牧区年平均 *PET* 为 1 242.0 mm。总体呈牧区、农区向中北部林区递减分布,与年平均气温的空间分布十分相似。林区北部年平均 *PET* 最低(≤ 1000 mm),牧区西南部和农区东南部的年平均 *PET* 最高(>1300 mm)。全市 *PET* 的年变化倾向率平均为 -20.7 mm/10 a,林区为 4.1 mm/10 a,农区为 6.3 mm/10 a,牧区为 -63.2 mm/10 a,通过 0.05 显著性检验的区域与 *ET* 基本一致,但范围略小。

呼伦贝尔市的年平均 *ET* 和 *PET* 存在相反的空间分布和变化特点。从气象与植被的关系来看,林区气温低,导致大气的饱和水汽压较低、相对湿度较

高,加之植被覆盖度较高,蒸腾作用较强,所以其 *ET* 较高而 *PET* 较低。牧区的气温较高,但降水不足,相对湿度偏低,植被又以牧草为主,蒸腾作用较差,造成其 *ET* 较低而 *PET* 较高。牧区西南部 *ET* 和 *PET* 间的差距有显著减小趋势,对该地区改善生态环境和减低干旱风险较为有利。

2.2 各月 *ET* 与 *PET* 的分布及变化

呼伦贝尔市 2001—2014 年各月的平均 *ET*、*PET* 如图 4。全市各月的平均 *ET* 呈双峰型分布,其中 *ET* 的最高峰值出现在 7 月(64.5 mm),次峰值为 3 月(25.3 mm),最低值出现在 1 月(7.3 mm)。农区和牧区也呈现双峰型分布,主峰出现在 7 月,*ET* 分别为 72.6 mm 和 38.1 mm;次峰出现在 3 月,*ET* 分别为 26.8 mm 和 26.2 mm。这主要是由于冬季呼伦贝尔市全境均有积雪覆盖,3 月农区、牧区气温回升,地表融化的积雪为 *ET* 提供了较充分的水源,因此 3 月出现了峰值,而林区地理位置偏北且海拔偏高,3 月气温回升较慢,峰值并不明显,因此林区呈单峰型分布。由于呼伦贝尔市冬季气温极低,植被的蒸腾作用弱,11 月—次年 3 月的 *ET* 主要是来自地面积雪,而分布也与气温分布相似,*ET* 呈现出农区>牧区>林区的分布方式。4 月气温回升,林区树木逐渐恢复生长,牧区牧草也开始逐渐返青,而农区作物出苗一般在 5 月初,因此 *ET* 呈现出林区>牧区>农区的分布方式。5—7 月和 9 月 *ET* 均为林区>农区>牧区,8 月由于正值农区大豆、玉米等主要作物生长最旺盛的阶段,*ET* 呈现出农区>林区>牧区的分布,10 月农作物完成收获,*ET* 呈林区>牧区>农区分布。

全市各月平均的 *PET* 呈单峰型分布,其中最高值出现在 6 月(198.7 mm),最低值出现在 1 月(7.8 mm),与月平均气温的变化相似。10 月—次年 4 月呈现农区>牧区>林区的分布,而 5—9 月呈现牧区>农区>林区的分布。*PET* 与 *ET* 的差值也呈现出单峰型分布,5 月 *PET* 与 *ET* 的差值最大(162.1 mm),其次为 6 月(158.4 mm),1 月差值最小(0.5 mm),不同月份各区域的分布方式和 *PET* 相同。可见呼伦贝尔市 5—6 月缺水最为严重。对于各区域来说,牧区缺水较农牧和林区更为严重。

全市各月 *ET*、*PET* 的月倾向率和显著性检验见表 1。全市及各区域的 *ET* 在 2、3、4、10 月呈减少趋势,在 1、5、6、7、11、12 月呈增加趋势,8、9 月增加与减少趋势并存,但仅牧区 4 月、各区域及全市 6 月份、牧区和全市 7 月的 *ET* 倾向率达显著($P<0.05$),3

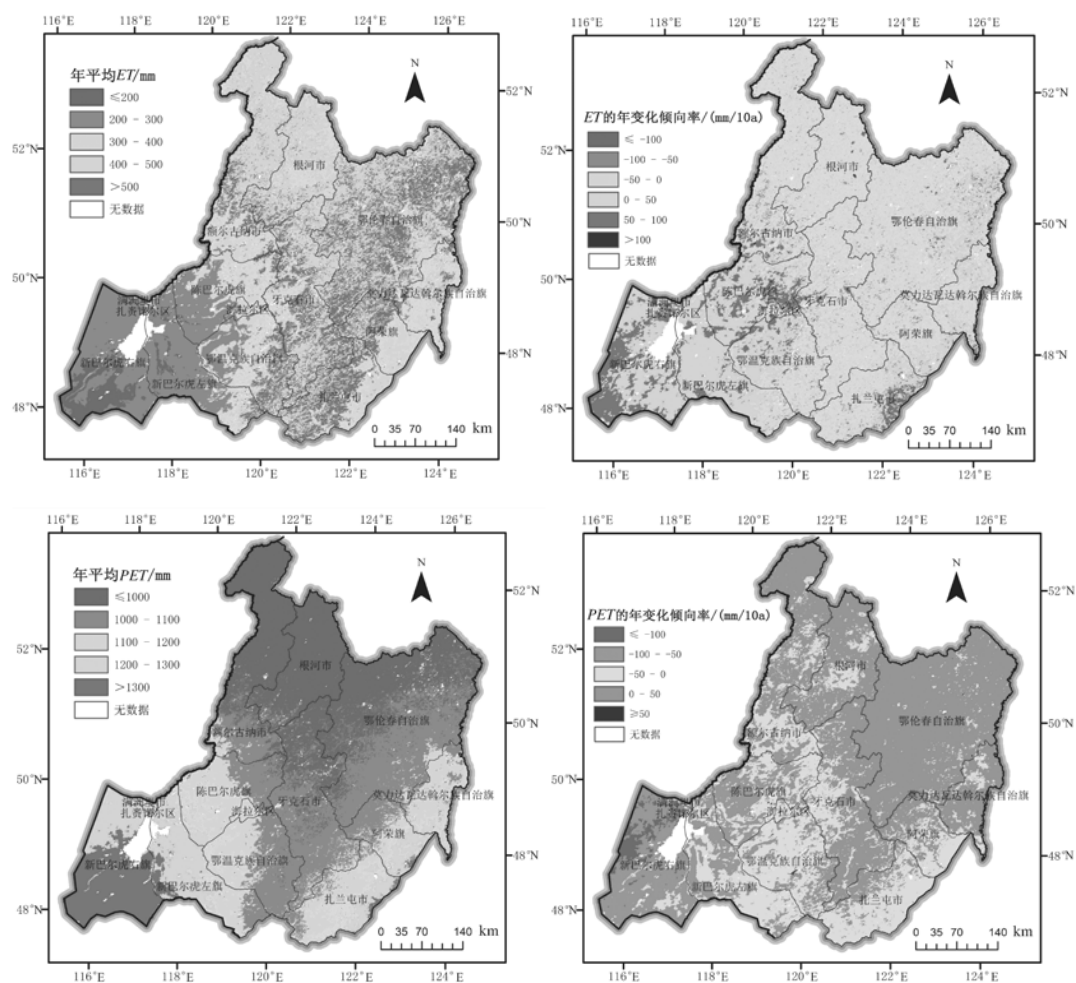


图3 2001—2014年呼伦贝尔市年平均ET、PET分布及变化

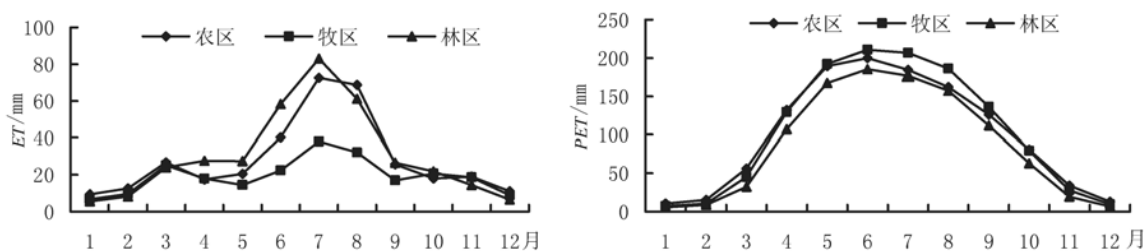


图4 2001—2014年呼伦贝尔市ET、PET平均月分布

月牧区的ET变化可能与地表积雪覆盖有关,6—7月则可能与植被覆盖度增加有关,这与之前2001—2016年呼伦贝尔草原NDVI整体呈上升趋势^[20]的研究结论基本一致。全市及各区域的PET在2、3、6、9月呈减少趋势,1、4、10、11、12月呈增加趋势,5、7、8月增加与减少趋势并存,但PET的倾向率均未通过显著性检验,变化趋势不显著。

2.3 ET、PET与气象要素的关系

分别统计每个月各站点ET、PET与气象要素的相关系数,取平均后如表2所示。在植被生长季,相

对湿度的增加可以抑制植物的蒸腾作用,且春季干旱是呼伦贝尔市的主要气象灾害,4—6月降水较多可以降低春季干旱的发生几率,有利于牧草返青和农作物出苗,较多的降水也会间接造成相对湿度偏高,因此形成了ET与4—10月的相对湿度、4—6月降水的显著正相关($P<0.05$)。冬季呼伦贝尔市地表有积雪覆盖,地表可用来蒸散的供水条件较好,气温成为影响ET的主要因素,因此ET与11月—次年2月的气温呈极显著正相关($P<0.05$)。ET与4月的气温呈显著负相关($P<0.05$),可能是因为4月气温

表 1 2001—2014 年呼伦贝尔市 *ET*、*PET*月倾向率

	<i>ET</i> /(mm/10 a)				<i>PET</i> /(mm/10 a)			
	农区	牧区	林区	全市	农区	牧区	林区	全市
1 月	0.9	0.6	0.1	0.4	1.4	0.8	0.1	0.6
2 月	-1.3	-0.1	-0.4	-0.5	-1.1	-0.1	-0.2	-0.3
3 月	-2.5	-4.8*	-4.1	-4.1	-4.5	-0.7	-0.4	-1.3
4 月	-5.6	-2.6	-6.2	-4.8	16.2	10.4	11.6	12.0
5 月	3.2	1.5	0.5	1.4	-3.7	1.2	-3.1	-1.6
6 月	11.3**	14.8**	9.1*	12.4*	-11.0	-20.8	-14.4	-16.2
7 月	7.6	16.2*	8.2	11.6*	4.0	-9.7	-3.8	-4.5
8 月	-7.4	-0.3	0.5	-1.3	4.7	-10.1	-10.0	-7.3
9 月	-1.1	-0.4	1.1	0.2	-1.3	-3.6	-2.2	-2.5
10 月	-1.0	-1.1	-1.3	-1.2	1.6	5.1	3.6	3.8
11 月	0.6	0.7	1.0	0.8	0.8	1.0	1.8	1.3
12 月	0.6	0.6	0.3	0.5	0.6	0.5	0.2	0.4

注:** 为通过 0.01 水平显著性检验,* 为通过 0.05 水平显著性检验

较高会造成积雪快速融化,地表供水条件转差而造成的,具体原因仍需进一步研究。*ET* 与 1、3、4、11 月的 10 m 风速呈正相关,其他月份呈负相关,但相关性均未达显著水平。

全年各月的 *PET* 与相对湿度和降水均呈负相关,且分别在 3—11 月和 4—11 月达到显著 ($P<0.05$),降水充足可以增加土壤含水量从而降低土壤热通量,较高的相对湿度可以抑制土壤和作物蒸散,且相对湿度本身也受降水影响,因此降水条件的改

善可以有效降低春、夏、秋季的 *PET*。全年各月的 *PET* 与气温均呈显著正相关($P<0.05$),可见气温的增加可直接造成 *PET* 的增加。日照时数在 6—8 月、10 月与 *PET* 呈显著正相关($P<0.05$),主要是由于日照时数增加可以带来更多的太阳辐射为地表增温,从而提高了 *PET* 的值。*PET* 与 10 m 风速的相关性均未达显著,虽然风速是影响蒸散发的主要因素之一,但在研究区内,10 m 风速的变化对 *ET* 和 *PET* 的影响并不显著。

3 结论与讨论

(1)MOD16 数据集中的 *PET* 与基于站点气象要素计算的 *PET* 达到极显著相关 ($P<0.01$),且 MOD16 数据集中的 *PET* 与 *ET* 算法所使用的基础数据一致,说明 MOD16 数据集可以满足呼伦贝尔市 *ET*、*PET* 时空变化分析的需要。

(2)呼伦贝尔市的年平均 *ET* 为 310.0 mm,呈林区>农区>牧区分布,年平均倾向率为 15.3 mm/10 a,仅牧区西部呈显著增加趋势($P<0.05$)。年平均 *PET* 为 1096.0 mm,呈农区、牧区两侧向林区递减分布,年平均倾向率为-20.7 mm/10 a,显著减小($P<0.05$)的区域与 *ET* 相同且范围略小。牧区 *ET* 显著增加、*PET* 显著减小与呼伦贝尔草原区生态环境的改善有一定关系。

(3)农区和牧区的 *ET* 月变化呈双峰型(3 月、7 月为峰值)分布,林区呈单峰型(7 月为峰值)分布。各区域的 *PET* 月变化均呈单峰型分布,6 月最高而

表 2 2001—2014 年呼伦贝尔市各月 *ET*、*PET* 与气象要素的关系

	<i>ET</i>					<i>PET</i>				
	相对湿度	气温	降水	10 m 风速	日照时数	相对湿度	气温	降水	10 m 风速	日照时数
1 月	-0.16	0.66**	0.05	0.16	-0.01	-0.18	0.63*	-0.01	0.17	0
2 月	-0.08	0.66**	-0.4	-0.15	0.04	-0.13	0.62*	-0.39	-0.13	0.06
3 月	-0.09	0.33	-0.1	0.12	-0.24	-0.53*	0.86**	-0.35	-0.26	-0.07
4 月	0.87**	-0.73**	0.65**	0.29	-0.36	-0.89**	0.87**	-0.64**	-0.31	0.43
5 月	0.81**	-0.29	0.64**	-0.21	-0.11	-0.81**	0.60*	-0.64**	0.27	0.26
6 月	0.65**	-0.36	0.51*	-0.24	-0.32	-0.87**	0.85**	-0.74**	0.15	0.69**
7 月	0.57*	-0.32	0.44	-0.32	-0.32	-0.75**	0.53*	-0.56*	0.2	0.67**
8 月	0.58*	-0.32	0.17	-0.21	-0.19	-0.83**	0.74**	-0.57*	0.11	0.59*
9 月	0.66**	-0.35	0.42	-0.01	-0.37	-0.77**	0.62*	-0.55*	-0.04	0.47
10 月	0.56*	-0.17	0.32	-0.08	-0.3	-0.72**	0.57*	-0.49	0.15	0.56*
11 月	-0.48	0.67**	-0.5	0.27	0.39	-0.62*	0.57*	-0.54*	0.25	0.3
12 月	-0.16	0.64**	-0.39	-0.09	-0.02	-0.17	0.63*	-0.38	-0.09	-0.02
年	0.01	-0.09	0.5	-0.14	0	-0.64**	0.58*	-0.53*	0.08	0.09

注:** 为通过 0.01 水平显著性检验,* 为通过 0.05 水平显著性检验

1月最低。 ET 与 PET 之差在5—6月最高,可见5—6月为呼伦贝尔市缺水最为严重的月份。

(4)全年的 PET 均与气温呈显著相关,而只有冬季的 ET 与气温呈显著相关,主要是由于高温会加速地表水分蒸发,又会抑制植被蒸腾,因此夏季气温对 ET 的影响不明显。植被生长季里 ET 和 PET 都与相对湿度和降水有一定的相关性,这是由于降水增多时土壤含水量增加,可为 ET 提供更多水分,但也会间接增加相对湿度,对 PET 产生抑制。生长季的日照长度会增加地表的辐射增温效果,也会对 PET 产生影响。

从分析结果可以看出,MOD16可以反映出比台站监测更加细致的 ET 与 PET 变化,对区域水循环、水资源管理和生态环境保护等工作具有重要参考价值。干旱是呼伦贝尔市的主要气象灾害之一,但目前依赖站点计算的干旱指数已难以满足精细化监测的要求,如果能将格点化、高分辨率的降水、蒸散发模式产品引入干旱指数的计算中,将有利于进一步提升气象部门的干旱监测能力,提高气象防灾减灾的精细化水平。

参考文献:

- [1] 王芳,汪左,张运,等.基于MOD16的安徽省地表蒸散量时空变化特征[J].长江流域资源与环境,2018,27(3):523-534.
- [2] WANG K, Dickinson R E. A review of global terrestrial evapotranspiration: observation, modeling, climatology, and climatic variability [J]. Reviews of Geophysics, 2012, 50 (RG2005): 1-54.
- [3] 赵亚迪,刘永和,李建林,等.1960—2013年中国地表潜在蒸散发时空变化及其对气象因子的敏感性[J].沙漠与绿洲气象,2018,12(3):1-9.
- [4] 邱美娟,刘布春,刘园,等.吉林省参考作物蒸散量的时空变化特征及影响因素[J].干旱气象,2019,37(1):119-126.
- [5] 王军,李和平,鹿海员.基于遥感技术的区域蒸散发计算方法综述[J].节水灌溉,2016(8):195-199.
- [6] Rivas Rual, Caselles Vicente. A simplified equation to estimate spatial reference evaporation from remote sensing-

based surface temperature and local meteorological data[J]. Remote Sensing of Environment, 2003,54:161-167.

- [7] 辛晓洲,田国良,柳钦火.地表蒸散定量遥感的研究进展[J].遥感学报,2003,5(3):233-240.
- [8] SU Z. The surface energy balance system (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2002,6(1):85-99.
- [9] Bastiaanssen W G M, Pelgrum H, WANG J, et al. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) 2. validation [J]. Journal of Hydrology, 1998:212-229.
- [10] 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.
- [11] 张猛,曾永年,齐玥.基于MOD16的洞庭湖流域2000—2014年地表蒸散时空变化分析[J].农业工程学报,2018,34(20):160-168.
- [12] 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,2016,38(8):1040-1047.
- [13] 范建忠,李登科,高茂盛.基于MOD16的陕西省蒸散量时空分布特征[J].生态环境学报,2014,23(9):1536-1543.
- [14] 杨江州,周旭,程东亚,等.贵州省不同地貌类型区的MOD16蒸散发变化特征[J].水土保持研究,2019,26(2):216-222.
- [15] 王颖,黄文震.呼伦贝尔市大气能见度影响因子及一次低能见度个例分析[J].沙漠与绿洲气象,2017,11(6):61-68.
- [16] 王希平,赵慧颖.内蒙古呼伦贝尔市林牧农业气候资源与区划[M].北京:气象出版社,2006:3-12.
- [17] 曲学斌,张照明,孙卓.大兴安岭植被NDVI变化及其对气候的响应[J].气象与环境学报,2019,35(2):77-83.
- [18] 黄秉光,杨静,黄玫.近55a新疆植被净初级生产力的时空变化[J].沙漠与绿洲气象,2018,12(4):90-94.
- [19] 刘倩,张方敏,李威鹏,等.基于温度的参考作物蒸散量计算方法的适用性评价[J].气象与环境科学,2019,42(2):19-26.
- [20] 曲学斌,孙小龙,冯建英,等.呼伦贝尔草原NDVI时空变化及其对气候变化的响应[J].干旱气象,2018,36(1):97-103.

Analysis of Evapotranspiration and Potential Evapotranspiration of Hulun Buir Based on MOD16

QU Xuebin^{1,2}, GAO Shaoxin², DOU Huashan³, WANG Yanping², ZHENG Hongyu², LUO Huanmei⁴

(1. Institute of Arid Meteorology, Key Laboratory of Arid Climate Change and Disaster Reduction in Gansu, Key Laboratory of Arid Climate Change and Disaster Reduction of China Meteorological Administration, Lanzhou 730000, China;

2. Hulun Buir Meteorological Bureau, Hulun Buir 021008, China;

3. Inner Mongolia Hulun Lake National Nature Reserve, Hulun Buir 021008, China;

4. Shuocheng Meteorological Bureau, Shuozhou 036002, China)

Abstract The spatial and temporal variation characteristics of *ET* and *PET* in Hulun Buir were analyzed on the basis of the MOD16 data and meteorological data from 2001 to 2014. The results showed that the annual average *ET* in Hulun Buir is 310.0 mm, distributing in forest area > agricultural area > pastoral area, which tendency rate is 15.3 mm/10 a. The annual average *PET* is 1 096.0 mm, and the distribution is decreasing from both sides of the agricultural and pastoral areas to forest areas, with an annual average tendency rate of -20.7 mm/10 a. The *ET* in the western part of pastoral areas increases significantly ($P < 0.05$), while *PET* reduces significantly. But there was no significant change of *ET* and *PET* in other areas. The difference between *ET* and *PET* is the highest from May to June, when the water shortage in Hulun Buir is the most serious. Combined with the analysis of meteorological factors, the temperature could affect *PET* during the whole year, but just affect *ET* in winter. What's more, *ET* and *PET* could be affected by relative humidity and precipitation in vegetation growing seasons, and the sunlight length in the growing seasons also affects *PET*. However, 10 m wind speed has poor relationship with *ET* and *PET*.

Key words evapotranspiration; potential evapotranspiration; spatial and temporal variation; Hulun Buir