

基于 MOD16 的安徽省地表蒸散量时空变化特征^{*1}

王芳^{1, 2} 汪左^{1, 2*} 张运^{1, 2} 沈非^{1, 2}

(1. 安徽师范大学地理与旅游学院, 安徽芜湖 241003;

2. 资源环境与地理信息工程安徽省工程技术研究中心, 安徽芜湖 241003)

【摘要】安徽省是我国的农业大省, 其水资源的管理和利用直接影响到农业的可持续发展, 分析安徽省的蒸散量变化, 对水资源的科学配置和合理利用有着重要的意义。基于 MOD16 蒸散量产品, 利用均值、标准差、偏差法、趋势分析法以及空间变异等方法, 分析安徽省近 15a 地表蒸散量年际、年内时空变化特征, 和不同土地利用类型下蒸散量的差异性变化特征。研究表明: (1) 2000~2014 年间安徽省多年平均蒸散量为 694.9mm, 波动范围为 647.5~730.5mm, 年际变化呈现下降趋势; 并具有较强的空间分异性规律, 整体上呈现南高北低趋势, 各市多年蒸散量均值差异显著, 其中黄山的蒸散量最高(844.1mm), 宿州最低(603.7mm)。(2) 安徽省年内各月间的蒸散量呈现先增加后减少的“单峰型”趋势, 具有明显的季节差异, 表现为夏季(304.17mm) > 春季(167.56mm) > 秋季(150.41mm) > 冬季(73.92mm); 但各市的年内蒸散量变化趋势表现不同, 淮河以南整体呈现“单峰型”趋势, 淮河以北则呈现典型的“双峰型”趋势。(3) 安徽省不同土地利用类型的蒸散量差异明显, 其年均蒸散量按照“林地 > 草地 > 未利用地 > 耕地 > 城镇用地”的顺序递减。

【关键词】: MOD16; 安徽省; 蒸散量; 时空分布; 土地利用

【中图分类号】: P333.1 **【文献标识码】**: A **【文章编号】**: 1004-8227(2018)03-0523-12

DOI: 10.11870/cjlyzyyhj201803008

地表蒸散(Evapotranspiration, ET)是指土壤蒸发和植被蒸腾的总和, 包括陆地土壤水分的蒸发和植物体内水分的蒸腾; 在地下水循环中, 蒸散起着非常重要的作用, 70%的地表降水可通过土壤的蒸发与植被的蒸腾作用回到大气, 干旱区可高达 90%^[1], 地表蒸散量的大小与变化直接关系区域的干湿状况和水资源的科学利用。因此, 准确估算区域的地表蒸散量, 分析其时空分布特征, 对于区域的地理、气象、水文研究以及农业生产有着重要的意义^[2]。

传统的蒸散观测方法主要有蒸发皿、波文比法、涡度相关法和土壤水平衡法等, 适用于“点”尺度或景观尺度的蒸散研究; 由于陆地表面的非均质性及水热传输过程的动态性, 这些仪器或方法很难用于较大区域的蒸散量观测和计算^[3]。遥感技术为大尺度非均匀陆面蒸散量的研究提供了新的方法^[4-6], 利用遥感技术估算区域蒸散的方法主要有经验统计模型、遥感模型和能量平衡模型^[7-9], 陆面过程与数据同化模型等^[10]。2011 年美国 NASA 团队基于 Penman-Monteith 遥感模型和 MODIS 数据研发

¹ 收稿日期: 2017-05-05; 修回日期: 2017-08-24

基金项目: 国家自然科学基金(41501379); 安徽省哲学社会科学规划项目(AHSKY2015D72); 安徽师范大学博士科研启动金项目(2016XJJ100); 安徽师范大学科研培育基金(2015rcpy29)

作者简介: 王芳(1993~), 女, 硕士研究生, 主要从事资源环境遥感研究。E-mail: wangfang_GIS@163.com

***通讯作者** E-mail: wzgis2004@163.com

布了全球陆地蒸散数据集产(MOD16), 提供了地表蒸散量的各种特征参数, 并由全球通量塔台数据验证, 模拟精度达到 86%^[11~15], 在全球范围内得到广泛应用。

安徽省是我国的农业大省, 作为农业生产的命脉, 水资源的科学配置和合理利用直接影响到农业的可持续发展。作物需水量和灌溉额度的确定是提高农业水分利用率、保证农作物高产稳产的关键, 作物旱涝评估和预测是农业防灾减灾的重要基础, 因此, 开展安徽省的蒸散量时空变化特征研究, 可为科学评价安徽省气候干湿状况, 合理调配水资源提供科学依据。近年来, 国内一些学者也相继对安徽省蒸散量的时空变化特征进行研究, 吴文玉等采用 Penman-Monteith 遥感模型, 并利用安徽省 79 个站点气象观测资料估算安徽省近 40a 的参考作物蒸散量以及参考蒸散量对气象因子的敏感系数, 并分析参考蒸散量的时空分布以及气象因子敏感系数的时空变化特征^[16, 17]; 此外还采用 MODIS 卫星数据并基于 SEBAL 模型, 估算了安徽省的日蒸散量, 并对不同土地覆盖类型的日蒸散量进行统计分析^[2]。曹雯等基于 Penman-Monteith 遥感模型和气象观测资料估算了安徽省的参考作物蒸散量, 并定量探讨影响参考作物蒸散量变化的主导因素^[18]; 但这些对蒸散量的研究方法要么是基于“点”尺度上的研究, 要么缺少在大范围内长期连续的观测结果, 因而缺乏对整个安徽省地表蒸散量的总体认识^[19]。国内研究人员基于 MOD16 产品对鄱阳湖流域^[19]、陕西省^[20, 21]、中国^[22]、渭河流域^[4]、淮河流域^[23]、三江平原^[24]、关中地区^[25, 26]、锡林郭勒平原^[27, 28]、海南岛^[29]和汉江流域^[30]等区域蒸散发时空分布特征进行评估, 取得不错的成果。目前还未利用 MOD16 产品对安徽省蒸散发进行研究。因此, 本文采用 2000~2014 年 Geo Tiff 格式的 MOD16A2 月尺度产品和 MOD16A3 年尺度产品, 分析安徽省蒸散发的时空变化特征, 为安徽省干旱成因分析、水资源管理等提供科学依据。

1 研究区概况

安徽省位于中国东部, 地理范围介于 114° 54' ~119° 27' E 与 29° 41' ~34° 38' N 之间(图 1), 全省地势西南高、东北低, 长江和淮河自西向东横贯全境, 将全省划分为淮北平原、江淮丘陵、沿江地区、大别山区和皖南山区五大自然区域。安徽处于东亚季风区、亚热带与暖温带的过渡带, 气候温暖湿润, 四季分明, 但气候分布差异明显, 天气多变, 降水年际变化大, 全省年平均气温为 14~16℃, 年平均降水量为 800~1600mm, 年平均日照 1800~2500h, 年平均无霜期 200~250d, 年平均蒸散量为 647.5~730.5mm, 蒸散量受海拔、降雨、温度、空气湿度、太阳辐射等多种因素的综合影响, 其中温度对其影响较大, 当年平均温度升高 1℃时, 安徽省各地农田蒸散量将增加 3.9%~4.2%, 气温升高, 使安徽省各地的农田蒸散量增大, 从而加重干旱对农业生产的影响^[31]。安徽省其独特的地理位置和气候特征一方面造就了突出的农业区域性特点, 淮南北作物类型和复种指数等明显不同, 安徽是我国重要的农业生产基地之一, 主要农产品水稻、小麦、玉米等在全国占有重要地位; 另一方面, 过渡带上温度波动大, 旱涝灾害交替发生, 农业产量极不稳定^[32]。

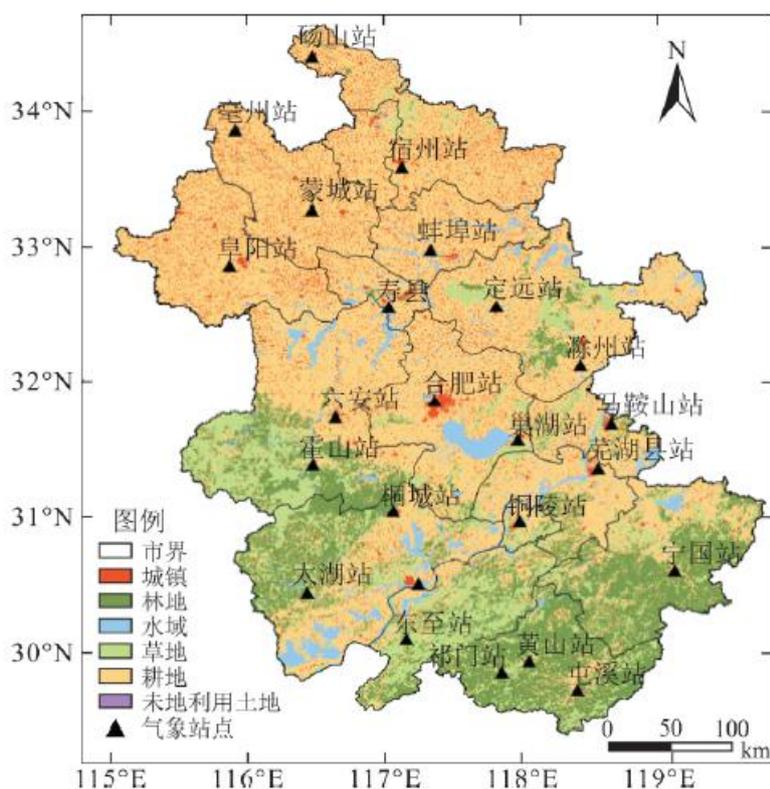


图 1 安徽省土地利用类型图和气象站点分布

Fig. 1 Land use type and distribution of meteorological stations in Anhui Province

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

本文采用蒸散数据(MOD16)开展安徽省蒸散量的时空变化特征研究。该蒸散算法基于 Penman-Monteith 遥感模型 [11~15], MOD16 数据集产品包括地表蒸散发(ET)、潜在蒸散发(PET)、潜热通量(LE)、潜在潜热通量(PLE), 空间分辨率有 1km、0.05° 和 30arcsec, 时间分辨率为 8d 合成、月合成和年合成。该数据具备较高的时空分辨率及免费可获取性等特点。本文采用 2000~2014 年 GeoTiff 格式的逐月数据 MOD16A2 和逐年数据 MOD16A3, 空间分辨率分别为 0.05° 和 30arcsec, 下载地址为 [http://www. nts.g. umt. edu/project/mod16](http://www.nts.g. umt. edu/project/mod16)。

气象数据包括 2000~2014 年安徽省 24 个气象站点实测的蒸发皿数据, 来源于中国地面气候资料日值数据集, 由中国气象局气象数据中心(<http://data. cma. cn/data/>)提供, 气象站点分布情况如图 1 所示。为了与蒸散数据进行对比分析, 将日值数据处理为年值数据。

土地利用数据为 2005 年安徽省 1:10 万的土地覆盖数据, 来源于地球系统科学数据共享平台(<http://www. geodata. cn>) (图 1), 依据安徽省土地利用方式和分析精度要求, 将研究区域土地利用类型归并为 6 个一级地类, 包括耕地、林地、草地、城镇、水体和未利用土地^[33]。

2.2 研究方法

采用均值、偏差法、标准差及趋势分析法反映安徽省各栅格单元 2000~2014 年蒸散量的波动水平、离散程度和变化率，计算公式如下：

$$\overline{ET}_{ij} = \sum_{n=2000}^{2014} ET_{ij}^n / 15 \quad (1)$$

$$D_{ij}^{ET} = ET_{ij}^n - \overline{ET}_{ij} \quad (2)$$

$$SD_{ij} = \sqrt{\frac{1}{15} \sum_{n=2000}^{2014} (ET_{ij}^n - \overline{ET}_{ij})^2} \quad (3)$$

$$B_{slope} = \frac{n \sum_{i=1}^n (t_i \times ET_i) - \sum_{i=1}^n t_i \sum_{i=1}^n ET_i}{n \times \sum_{i=1}^n t_i^2 - (\sum_{i=1}^n t_i)^2} \quad (4)$$

式中： n 为年份 (2000, ..., 2014)； \overline{ET}_{ij} 为第 i 行、 j 列的像素的年均值； ET_{ij}^n 为第 n 年第 i 行、 j 列的蒸散量值； D_{ij}^{ET} 表示 i 行 j 列的 ET 偏差值； SD_{ij} 为第 i 行、 j 列的标准差值； B_{slope} 为线性倾向值， ET_i 为第 i 年的蒸散量， t_i 为第 i 年，当 $B_{slope} > 0$ 时，随着时间 t 增加，ET 呈上升趋势，反之，则 ET 呈下降趋势， B_{slope} 值的大小反映上升或下降的速率，即表示上升或下降的倾向程度。

采用变异系数 (Coefficient of Variation, CV) 反映各年蒸散的变异程度，计算公式如下所示，为了直观地揭示安徽省 ET 的变化，将 CV 值分为非常稳定 ($CV \leq 0.1$)、稳定 ($0.1 < CV \leq 0.2$)、不稳定 ($0.2 < CV \leq 0.3$)、很不稳定 ($CV > 0.3$) 4 个等级^[28, 34]。

式中： ET_{ij} 为第 i 行、 j 列的像素的年均值； SD_{ij} 为第 i 行、 j 列的标准差值。

3 结果与分析

3.1 MOD16_ET 数据的精度评价

为了保证 MOD16 数据在安徽省监测蒸散量时空变化的准确性，本文采用安徽省 24 个气象站点的实测蒸发皿数据对 MOD16_ET 数据进行精度验证。利用 2000~2014 年站点实测蒸发皿的日值数据剔除异常值后汇总处理得到多年各站点的年均蒸发量，因蒸发皿的蒸发条件与天然水体不同，根据各站点的实际地理环境，分别设置不同的折算系数对蒸发皿数据进行校正^[25]。通过剔除位于城市范围内的无效站点后提取各气象站点的 MOD16_ET 数据并求其年均值，再与气象站点的校正蒸发皿数据进行分析，结果如图 2 所示。

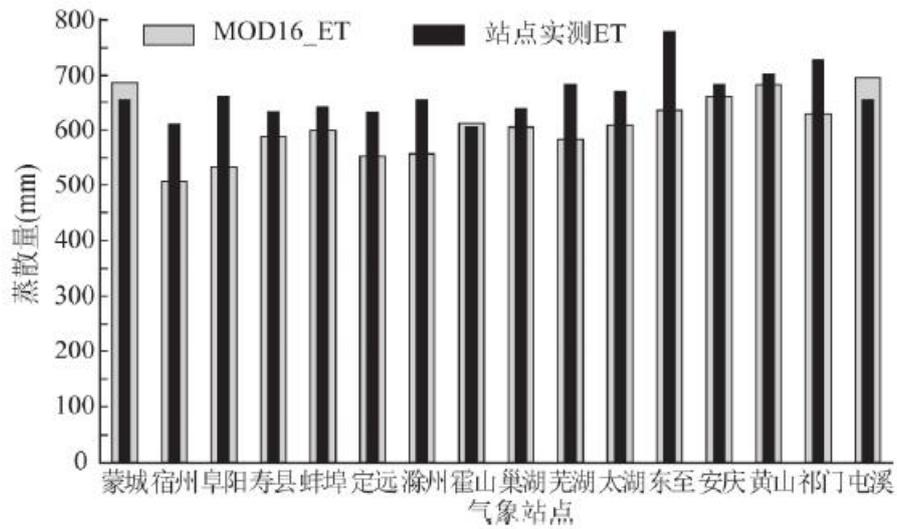


图 2 2000~2014 年 MOD16_ET 与站点实测 ET 的对比

Fig. 2 Comparison between MOD16_ET and the measured ET of the site during 2000–2014

从站点数据对比关系中可以看出(图 2), 校正蒸发皿数据除蒙城站、霍山站、屯溪站外均比 MOD16_ET 数据值大, MOD16_ET 的多年平均值总体偏小, 可能与局部地区的异常气候条件有关, 而且站点蒸发皿的蒸发量受水热条件制约, 从而导致与 MOD16_ET 数据存在较大差异, 整体上站点实测 ET 和 MOD16_ET 呈现出较好的一致性, 同时对两者的相关关系进行分析(图 3), 其平均绝对误差 MAE 为 65.82mm/a, 平均相对误差 MRE 为 9.85%, 相关系数 r 为 0.43, 均方根误差 RMSE 为 76.98mm/a, 小于贺添等^[22]在全国十大流域的验证结果(RMSE=152mm/a)以及 Vinukollu RaghuvierK^[35]在全球 26 个流域的验证结果(RMSE=194mm/a), 由此可见, MOD16_ET 数据在安徽省的精度总体上符合要求, 可用于地表蒸散发的时空分析研究。

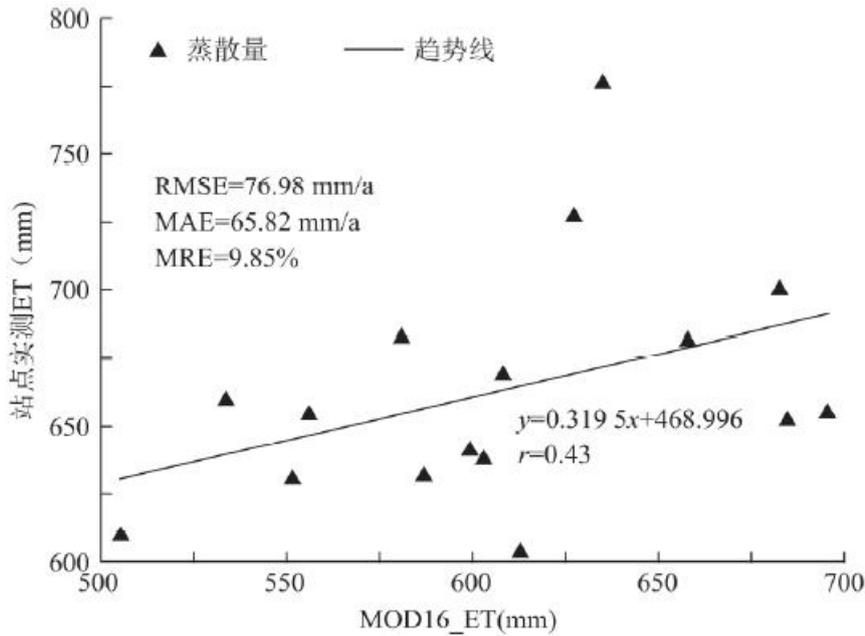


图3 MOD16_ET与站点实测ET的关系

Fig. 3 Relation between MOD16_ET and the measured ET of the site

3.2 安徽省 2000~2014 年 ET 的年际时空分布特征

对 MOD16A3 年蒸散量数据, 经过去除无效值、裁剪等数据处理, 得到安徽省 2000~2014 年地表年 ET 值。如图 4 所示, 2000~2014 年安徽省地表蒸散量年均值的波动范围为 647.5~730.5mm, 多年平均蒸散量为 694.9mm, 且年际变化整体上呈下降趋势, 变化率为 -0.832mm/a; 采用偏差法分析 2000~2014 年各年 ET 偏离多年平均水平的程度(图 4), ET 的偏差值呈现先增大后减少的趋势, 其中 2003 年和 2011 年的偏差值较大, 说明偏离平均水平程度较严重, 从 2002 年开始, 除 2005 年、2011 和 2014 年以外均高于平均水平, 其中 2003 年和 2007 年的 ET 值较高, 分别为 730.5 和 720.5mm, 高于多年平均的 5.1% 和 3.7%; 2011 年和 2014 年的 ET 值较低, 分别为 647.5 和 660.1mm, 低于多年平均的 6.8% 和 5%, 其他年份的 ET 值位于平均值上下 2% 范围内。安徽省各市多年蒸散量均值差异显著(表 1 所示), 由大到小依次为黄山(844.1mm) > 池州(821.5mm) > 宣城(795.5mm) > 安庆(739.7mm) > 铜陵(727.1mm) > 芜湖(707.9mm) > 六安(701.2mm) > 马鞍山(669.6mm) > 合肥(651.3mm) > 滁州(637.1mm) > 淮南(627.2mm) > 阜阳(624.9mm) > 亳州(616.6mm) > 淮北(615.5mm) > 蚌埠(608.8mm) > 宿州(603.7mm), 宿州、蚌埠、亳州、淮南、淮北、滁州、合肥、马鞍山的蒸散量比较低, 介于 600~670mm 之间, 其中宿州和蚌埠的蒸散量低值尤其明显, 六安、芜湖、铜陵和安庆处于中间的过渡带, 其中, 安庆和六安地处于大别山地带, 属于典型的山地气候特征, 雨量较充沛加之气温较高, 其丰富的水热条件使得蒸散量较大, 宣城、池州和黄山其年平均值在 800mm 以上, 主要原因是植被覆盖度较高, 降雨充沛。

表 1 安徽省 2000~2014 年各市的蒸散量(mm)

城市	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	均值
安庆	724.3	726.8	746.1	767.9	749.3	728.7	733.2	743.9	756.1	741.8	737.2	693.6	755.0	772.1	719.1	739.7

蚌埠	581.1	565.7	650.0	625.8	622.6	579.8	616.0	653.1	648.9	617.0	629.7	567.8	600.3	605.6	569.1	608.8
亳州	593.8	557.3	625.4	649.0	615.0	606.2	620.5	674.8	678.0	635.9	637.2	544.2	603.2	615.8	592.1	616.6
池州	803.7	815.3	824.2	850.2	823.2	810.5	817.1	843.7	832.4	818.2	797.8	796.8	833.2	857.6	797.9	821.5
滁州	611.0	590.4	689.2	677.2	627.2	608.9	644.8	662.1	662.7	656.5	681.7	590.7	627.8	625.2	600.5	637.1
阜阳	633.4	571.5	659.1	667.1	632.8	627.8	617.8	655.5	672.9	641.4	637.8	547.2	599.4	604.9	604.4	624.9
合肥	623.2	612.2	708.9	705.1	658.0	636.2	657.8	659.1	667.9	672.0	689.1	600.1	646.3	642.2	591.5	651.3
淮北	578.5	568.5	628.1	647.6	607.7	613.2	612.5	690.9	680.4	619.2	625.0	560.8	590.0	628.2	582.7	615.5
淮南	624.0	573.9	684.6	655.2	630.2	609.0	619.6	651.5	659.5	649.9	654.0	570.9	611.6	629.5	584.5	627.2
黄山	819.3	823.5	833.2	874.2	849.7	846.0	839.5	873.1	838.2	841.8	819.9	828.4	859.5	880.9	833.6	844.1
六安	676.8	662.0	735.5	742.2	717.0	686.4	702.2	705.9	709.9	731.5	719.0	647.0	710.4	713.2	657.8	701.2
马鞍山	652.2	651.1	730.7	730.6	666.8	653.5	688.1	682.3	690.1	666.9	701.7	616.4	665.9	654.4	592.5	669.6
宿州	574.5	569.6	603.1	624.5	623.2	596.2	615.3	667.6	656.2	607.2	594.3	551.8	591.9	604.9	575.5	603.7
铜陵	715.3	728.3	753.8	768.4	728.7	721.4	734.6	742.9	742.2	715.3	727.1	683.5	731.9	730.2	680.3	727.1
芜湖	697.6	698.6	746.0	752.0	713.2	703.0	719.5	723.1	717.1	702.9	723.0	655.5	714.0	708.5	644.9	707.9
宣城	783.0	778.5	805.7	828.4	782.6	780.8	794.1	823.0	805.6	795.2	792.5	770.9	820.9	811.3	759.6	795.5

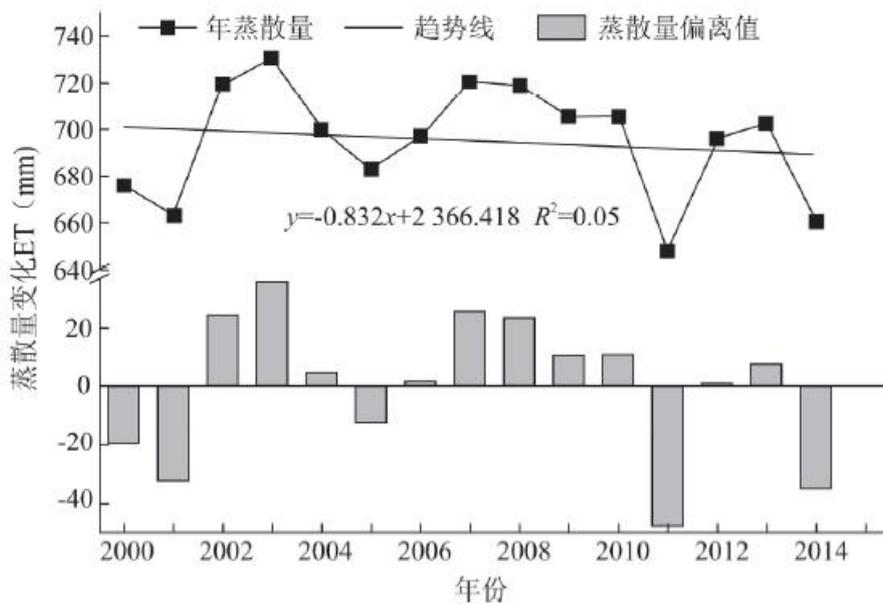


图4 安徽省2000~2014年ET年际变化和偏离分析
 Fig. 4 Annual variations and deviation analysis of evapotranspiration in Anhui Province during 2000–2014

根据安徽省15aET的空间分布(图5,图6)可知,安徽省年ET具有较强的空间分异性规律,整体上呈现南高北低趋势,其多年平均蒸散量的变化范围在345~1284mm之间,蒸散量高值区主要分布在大别山区和皖南山区,达到800mm以上,沿江区域和江淮之间地区的蒸散量在600~800mm之间,淮北以北地区蒸散量较低,在600mm以下。近15a安徽省蒸散量发生显著增加或减少的区域空间分布情况如图7,安徽省大部分地区蒸散量的下降速率大于0mm/a,江淮之间地区和淮北平原地区呈现下降趋势,下降速率<5mm/a;大别山区如安庆北部和六安南部,皖南山区呈现增加趋势,增加速率>0mm/a;此外,亳州、蚌埠和淮南相邻地区呈现增加速率大于5mm/a的增加趋势。根据安徽省蒸散量的CV空间分布(图8),其平均CV值为0.059,说明整个安徽省的蒸散量变异程度非常稳定,安徽省大部分的CV值小于0.1,说明其变异程度比较稳定,而在皖北地区,其中阜阳、亳州和淮北变异程度比较明显,其CV值在0.1~0.2之间,而水体周围的变异程度也较为明显。



图5 2000~2014年安徽省逐年蒸散量空间分布图

Fig. 5 Spatial distributions of yearly evapotranspiration in Anhui Province from 2000 to 2014

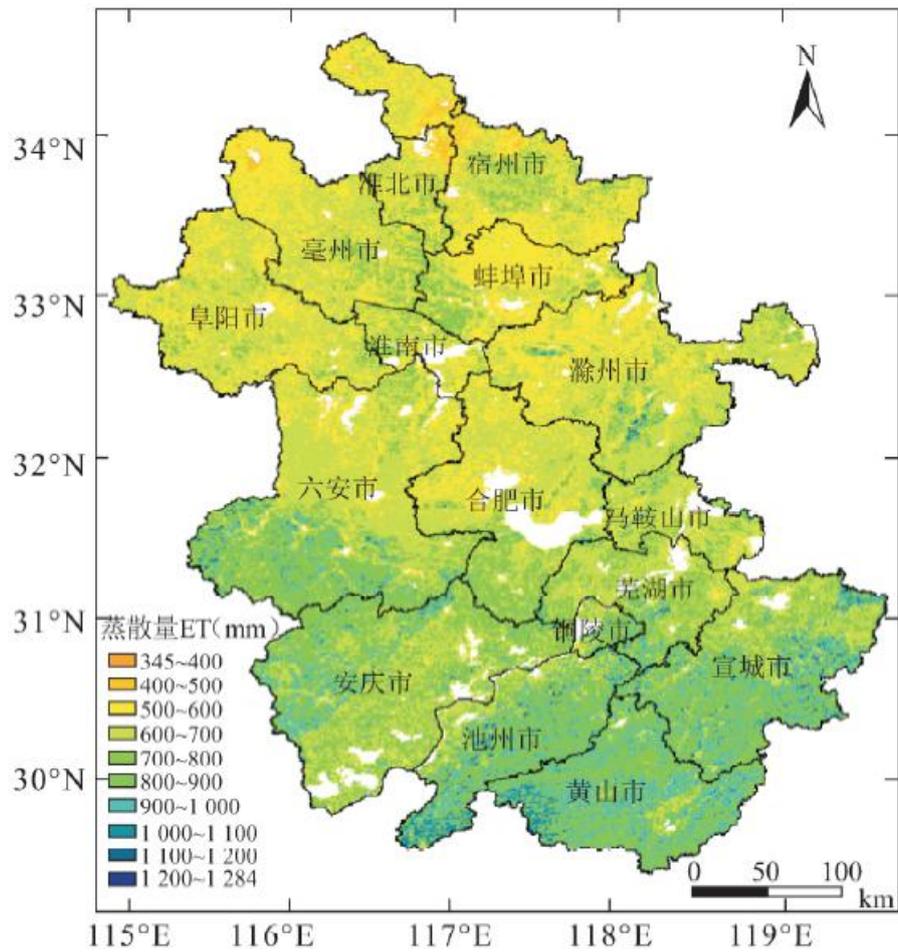


图6 安徽省多年平均ET分布

Fig. 6 Spatial distributions of ET in Anhui Province

3.3 安徽省 2000~2014 年 ET 的年内时空分布特征

根据 MOD16A2 月蒸散量数据, 分析 2000~2014 年安徽省年内蒸散变化(图 9), 总体上, 安徽省年内蒸散量呈现“单峰型”趋势, 具有明显的季节差异; 由图 9 可知, 蒸散量主要集中在 5~9 月份, 12 月份的蒸散量最小, 平均值仅为 21mm 左右, 在 5 月份达到一个小高峰, 其值为 71.21mm, 6 月份的蒸散量略低, 8 月份的蒸散量最大, 其平均值为 114.75mm, 从 9 月份开始, 蒸散量快速下降, 究其原因, 2 月份和 3 月份植被开始生长, 其蒸腾作用比较小; 4 月份, 植被逐渐复苏, 降水也较丰沛; 5 月份, 植被处于生长发育时期, 月蒸散量逐渐增加; 6 月、7 月和 8 月份是植被生长旺盛时期, 植被的蒸腾以及土壤的蒸发作用较强, 使得蒸散量迅速增加, 因此, 这 3 个月的蒸散量较大; 9 月份, 植被开始衰落; 10 月和 11 月份是植被生长结束时期, 蒸散量逐渐下降。

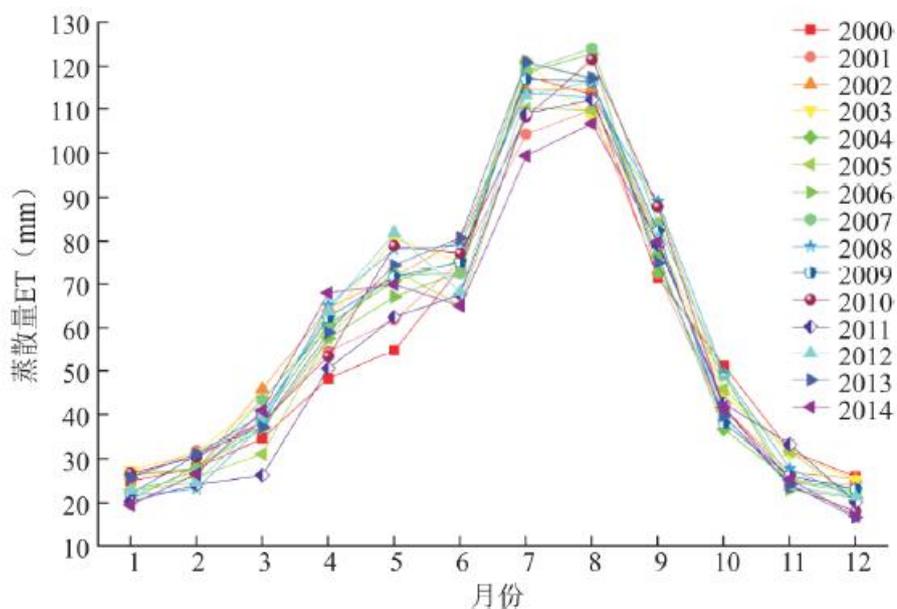


图 9 安徽省 2000~2014 年蒸散量年内变化

Fig. 9 Monthly variations of evapotranspiration in Anhui Province during 2000-2014

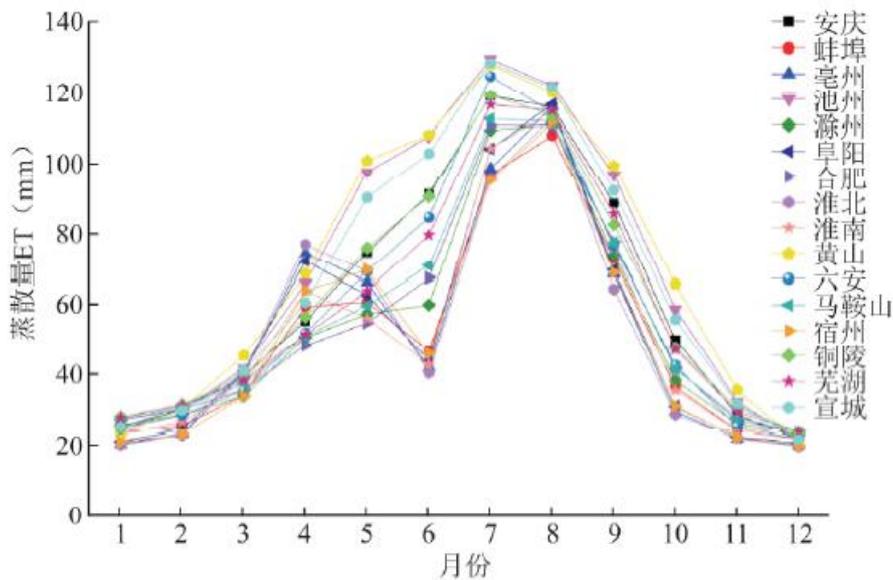


图 10 安徽省各市蒸散量年内变化

Fig. 10 Monthly variations of evapotranspiration of cities in Anhui Province

安徽省各市年内蒸散量整体上呈现先增加后减小的“单峰型”趋势(图 10)，在淮河以北地区呈现“双峰型”趋势，宿州、蚌埠、亳州、阜阳、淮南、淮北在 1 月~4 月迅速增加，并在 4 月份达到一个峰值，在 4 月~6 月份迅速下降，在 6 月份出现低谷，6 月~8 月份呈现迅速增加的趋势，8 月份达到年内最大值，9 月~12 月份迅速下降，与淮河以南各市的变化趋势略有不同，淮河以南地区呈现“单峰型”趋势，并在 7 月份达到年内最大值，主要原因是：

(1) 淮河以北主要是平原地区，多为双季种植，其种植作物主要以冬小麦和夏玉米为主，春季(3~5 月)温度开始回升、降水增加，冬小麦开始返青生长；冬小麦在 4 月份达到生长顶峰，此时是小麦的抽穗期，生长所需要的水分达到最大，蒸散量也是最大，在 4 月份达到第一个峰值；

(2) 5、6 月份小麦逐渐成熟收割，植被蒸腾逐渐减弱，因此，6 月份的蒸散量略有降低；

(3) 7 月份，小麦收割之后开始播种夏玉米，7 月份是玉米的开花期，植被生长茂盛，其蒸腾作用逐渐增强，并且在 8 月份蒸散量达到全年的最大值；

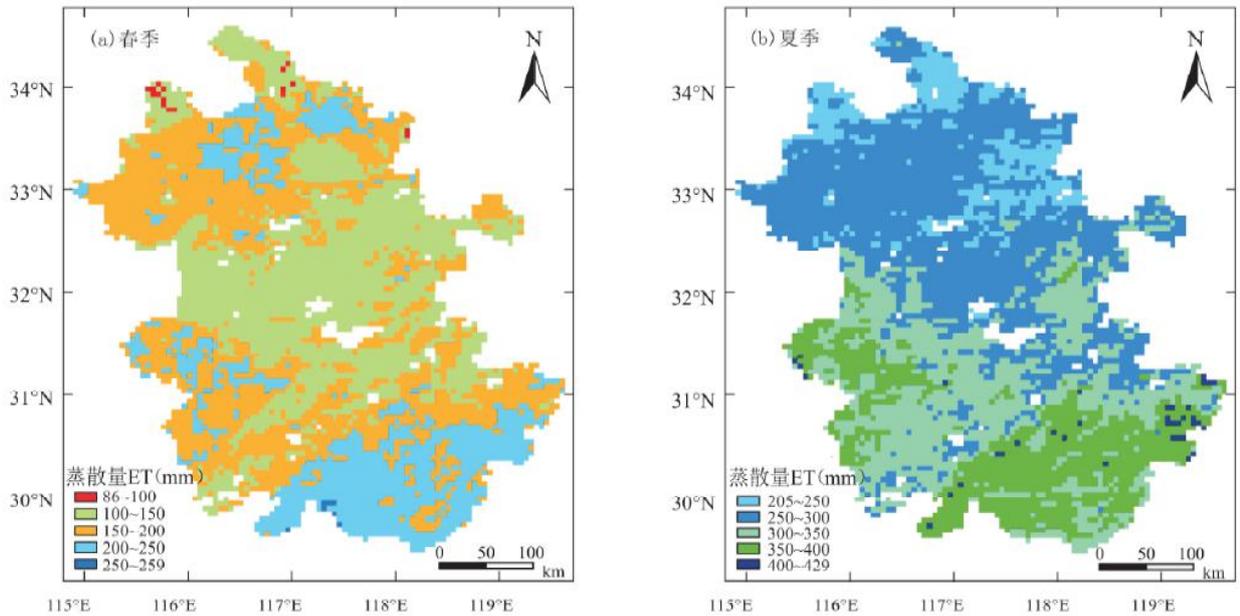
(4) 秋季植被处于非生长阶段开始衰落，并且温度逐渐降低，导致蒸散量急剧减少；

(5) 冬季植被的数量减少，气温较低，降水较少，所以在 12 月至次年 2 月的蒸散量变化比较平缓；

(6) 淮河以南地区种植作物主要是油菜和水稻，其生长周期不同，因此，在变化趋势上表现出差异。

由于受到太阳辐射、气温、降雨、海拔、空气湿度以及风速等因素的影响，安徽省不同季节蒸散量的空间分布差异明显(图 11)，其蒸散量在春季(3~5 月)增长较快，夏季(6~8 月)迅速地增长，秋季(9~11 月)急剧减小，冬季(12~次年 2 月)基本保持

不变并且为全年最低。春季地表蒸散量为 86~259mm，随气温逐渐回升，地表蒸散量增长较快，春季植被开始返青生长，所需水分增加，在空间上具有较强的差异性，整体上呈现南高北低趋势，皖南山区的蒸散量在 200~259mm 之间，大别山区处于 150~250mm 之间，而江淮之间地区的蒸散量主要在 100~150mm 之间，淮北平原地区的蒸散量比较低；夏季，安徽省内气温较高，光照充足，太阳辐射较大，降雨量大，有利于地表蒸散，由于受到不同植被以及不同地形地貌的影响，其蒸散量差异较大，呈现南高北低趋势，与年地表蒸散的空间分布基本一致，蒸散量在 205~409mm 之间；秋季，气温降低，雨量减少，受到植被覆盖类型、风速等因素的影响，地表蒸散量也随之降低，此季 ET 空间差值比较小，约 140mm；冬季蒸散量在 59~92mm 之间，各地 ET 值均偏小，说明不同季节地表蒸散量的空间分布情况与该地区的太阳辐射、海拔高度、气温、降水以及植被覆盖类型等因素的季节性变化密切相关。安徽省季节蒸散量大小关系为：夏季(304.17mm) > 春季(167.56mm) > 秋季(150.41mm) > 冬季(73.92mm)。



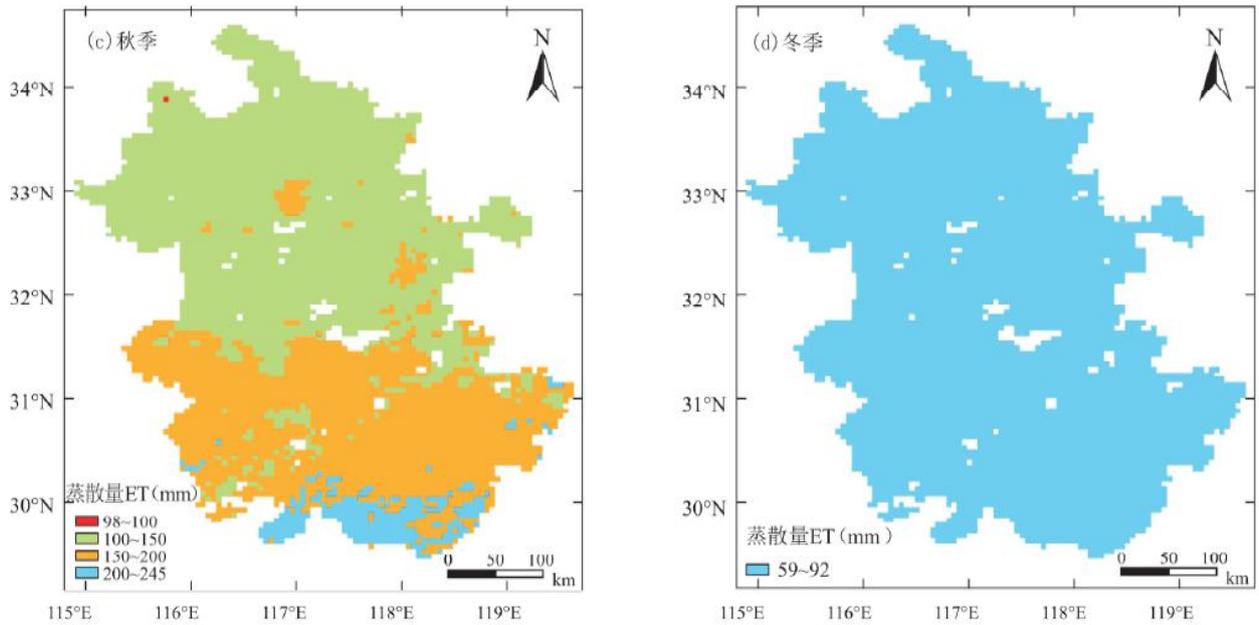


图 11 安徽省各季节的蒸散量空间分布图

Fig. 11 Spatial distributions of ET in Anhui Province during 2000–2014

(a) spring, (b) summer, (c) autumn, (d) winter

3.4 安徽省 2000~2014 年不同土地利用类型的蒸散量分布特征

为了进一步分析安徽省不同土地利用类型的蒸散量特征，分别提取安徽省各土地利用类型的年均以及月均蒸散量，由于受到地形地貌、海拔高度以及所处区域降水量差异等影响，不同土地利用类型的年均 ET 表现出显著性差异(图 12)，森林年均蒸散量最高，为 810.9mm，其值远远超过其他土地利用类型的年均蒸散量，主要原因是森林水分供应充沛，为蒸散提供有利的条件，因此，其值相对较高；而城镇用地的年均 ET 最低，仅为 626.1mm。除水体外，各土地利用类型的年均蒸散量按照“林地>草地>未利用地>耕地>城镇用地”的顺序递减。

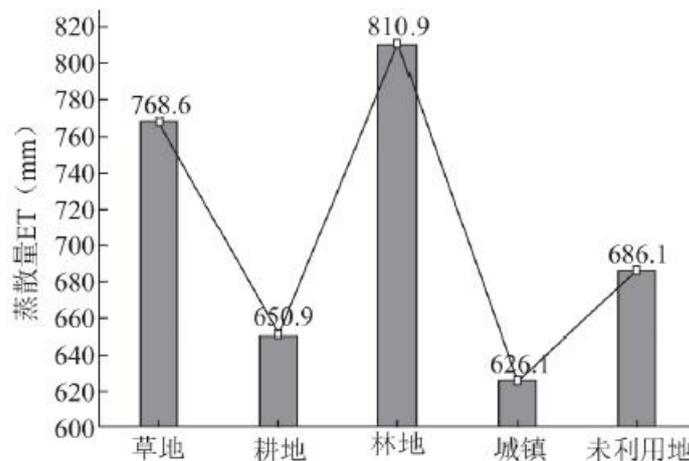


图 12 不同土地利用类型多年平均 ET 差异

Fig. 12 Annual variations of ET on different land use types

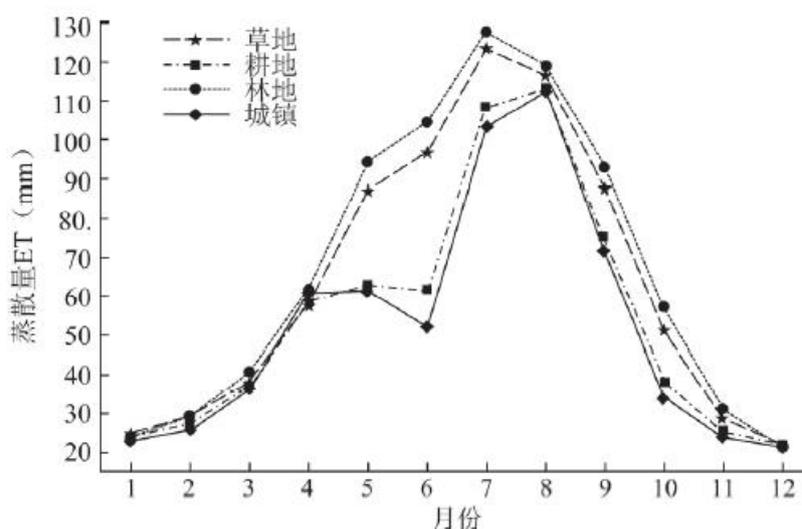


图 13 不同土地利用类型 ET 年内变化

Fig. 13 Monthly variations of ET on different land use types

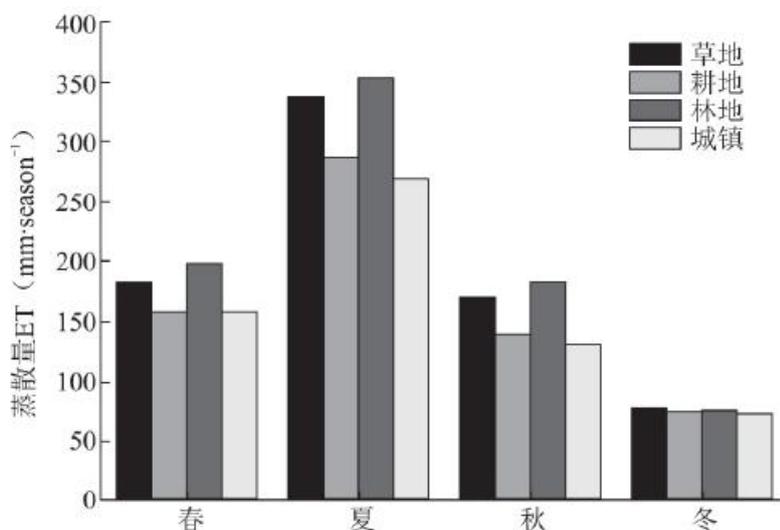


图 14 不同土地利用类型 ET 各季节变化

Fig. 14 Seasonal variations of ET on different land use types

根据 MOD16A2 数据和安徽省土地利用类型，可以计算不同土地覆盖类型的年内蒸散量。安徽省 2000~2014 年林地、草地、耕地、城镇年内蒸散量变化如图 13 所示，其大小关系为林地 (66.9mm) > 草地 (63.5mm) > 耕地 (54.4mm) > 城镇 (52.1mm)。总体上，不同土地利用类型的月均 ET 的大小顺序与年均 ET 比较一致，但是具体到不同土地利用类型上，其年内蒸散量的变化特征也是有差异，其中林地、草地的年内蒸散量变化呈现“单峰型”趋势，而耕地的年内蒸散量则呈现“双峰型”趋势，林地、草地最大月均蒸散量出现在 7 月份，而耕地则为 8 月份，主要是因为耕地种植区多为人工植被，并且安徽省耕地作物多为双季种植^[36]，

而林地、草地的植被主要是自然植被，一般呈现“单峰型”的变化趋势，在7月生长达到峰值。图14为不同土地利用类型ET在各季节变化情况，由图可知，春季和秋季的分布情况基本一致，林地和草地、耕地和城镇用地的分布情况基本一致；夏季，不同土地利用类型的月均蒸散量差异显著，林地(353.2mm) > 草地(338.6mm) > 耕地(285.7mm) > 城镇用地(270.1mm)；冬季，不同土地利用类型的月均ET均偏小，其值相差不大，主要在70~76mm之间。

4 结论与讨论

4.1 结论

基于MOD16蒸散量产品，分析2000~2014年安徽省年际和年内地表蒸散的时空分布特征，结论如下：

(1) 2000~2014年间安徽省地表蒸散量年际变化整体上呈下降趋势，波动范围为647.5~730.5mm，多年平均蒸散量为694.9mm，并且具有较强的空间分异性规律，整体上呈现南高北低趋势，各市多年蒸散量均值差异显著，而且各市的蒸散量在2000~2014年间的变异程度非常稳定。

(2) 安徽省的年内蒸散量的变化呈现先增加后减少的“单峰型”趋势，具有明显的季节差异，蒸散量主要集中在5月~9月份，12月份的蒸散量最小，平均值仅为21mm左右，8月份的蒸散量最大，达到114.75mm。安徽省各市的年内蒸散量变化，在淮河以南地区呈现“单峰型”趋势，但是在淮河以北地区呈现“双峰型”趋势。安徽省不同季节的蒸散量大小关系为：夏季(304.17mm) > 春季(167.56mm) > 秋季(150.41mm) > 冬季(73.92mm)。

(3) 安徽省不同土地利用类型的多年平均蒸散量差异明显，森林的年均蒸散量最高，为810.9mm，而城镇用地的年均ET最低，仅为626.1mm；不同土地利用类型的年内蒸散量的变化趋势也有差异，其中林地、草地的年内蒸散量变化呈现“单峰型”趋势(最大月均蒸散量均为7月份)，耕地的年内蒸散量变化则呈现“双峰型”趋势(最大月均蒸散量为8月份)。不同土地利用类型ET在各季节变化情况与安徽省的季节变化情况一致。

4.2 讨论

安徽省是我国的农业大省，作为农业生产的命脉，水资源的科学配置和合理利用直接影响到农业的可持续发展。加强地表蒸散发监测，对作物需水量和灌溉额度的确定、水资源利用、监测旱涝灾害等具有重要意义。通过以上分析，安徽省的蒸散量具有较强的空间分异性，而且变化规律与其耕种作物密切相关。MODIS数据精度高，监测范围广，可获得性强，具有一定的优势，但是时间尺度较短；此外，还需进一步研究气象因子与蒸散量之间的关系，探讨影响蒸散量的主导因子，以便为安徽省干旱成因分析、水资源管理和利用等提供科学依据。

参考文献：

[1] ROSENBERG N J, BLAD B L, VERMA S B. Microclimate—the biological environment of plants [A]. New York: John Wiley & Sons, 1983.

[2] 吴文玉, 孔芹芹, 马晓群, 等. 基于MODIS数据的安徽区域日蒸散量估算与分析[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(6): 854—861.

WU W Y, KONG Q Q, MA X Q, et al. Estimation and analysis of evapotranspiration in Anhui Province with MODIS data [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2014, 23(6): 854—861.

[3] 张淑兰, 于澎涛, 王彦辉, 等. 泾河上游流域实际蒸散量及其各组分的估算 [J]. 地理学报, 2011, 66 (3) : 385—395.

ZHANG S L, YU P T, WANG Y H, et al. Estimation of Actual Evapotranspiration and Its Component in the Upstream of Jinghe Basin [J]. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(3) : 385—395.

[4] 位贺杰, 张艳芳, 朱妮, 等. 基于 MOD16 数据的渭河流域地表实际蒸散发时空特征 [J]. 中国沙漠, 2015, 35(2) : 414—422.

WEI H J, ZHANG Y F, ZHU N, et al. Spatial and Temporal Characteristic of ET in the Weihe River Basin Based on Mod16 data [J]. Journal of Desert Research, 2015, 35(2) : 414—422.

[5] 曾丽红, 宋开山, 张柏, 等. 2000 年至 2008 年松嫩平原生长季蒸散量时空格局及影响因素分析 [J]. 资源科学, 2010, 32(12) : 2305—2315

ZENG L H, SONG K S, ZHANG B, et al. Analysis of Spatiotemporal Variations in Evapotranspiration and Its Influencing Factors over the Songnen Plain in the Growing Season during the Period 2000 — 2008 [J]. Resources Science, 2010, 32(12) : 2305—2315.

[6] 张堂堂, 文军, 李振朝, 等. 基于微波遥感参数估算区域蒸散发的方法研究 [J]. 高原气象, 2013, 32(6) : 1651—1657.

ZHANG T T, WEN J, LI Z C, et al. A Method for Determining Regional Evapotranspiration Based on Microwave Sensing Technique [J]. Plateau Meteorology, 2013, 32(6) : 1651—1657.

[7] BASTIAANSEN W G M, MENENTIA M, FEDDES R A, et al. A remote sensing surface energy balance algorithm for land [J]. Journal of Hydrology, 1998, 212(1—4) : 198—212.

[8] 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.

[9] KUSTAS W P, NORMAN J M. Evaluation of soil and vegetation heat flux predictions using a simple two-source model with radiometric temperature for partial canopy cover [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1999, 94(1) : 13—29.

[10] 张荣华, 杜君平, 孙睿. 区域蒸散发遥感估算方法及验证综述 [J]. 地球科学进展, 2012, 27(12) : 1295—1307.

ZHANG R H, DU J P, SUN R. Review of estimation and validation of regional evapotranspiration based on Remote Sensing [J]. Advances in Earth Science, 2012, 27(12) : 1295—1307.

[11] MU Q Z, HEINSCH F A, ZHAO M S, 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.

[12] MU Q Z, ZHAO M S, HEINSCH F A, et al. Evaluating water stress controls on primary production in biogeochemical and remote sensing based models [J]. Journal of Geophysical Research, 2007, 112(G1) : G01012.

[13] 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.

[14] CLEUGH H A, LEUNING R, MU Q Z, et al. Regional evaporation estimates from flux tower and MODIS satellite data [J]. Remote Sensing of Environment, 2007, 106(3) : 285–304.

[15] MYNENI R B, HOFFMAN S, KNYAZIKHIN Y, et al. Global products of vegetation leaf area and fraction absorbed PAR from year one of MODIS data [J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 83(1–2) : 214–231.

[16] 吴文玉, 马晓群, 陈晓艺, 等. GIS 支持下安徽省近 35a 参考作物蒸散量的时空变化 [J]. 农业工程学报, 2010, 26(2) : 251–256

WU W Y, MA X Q, CHEN X Y, et al. Temporal-spatial variations of reference crop evapotranspiration in Anhui Province in recent 35 years supported by GIS [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26 (2) :251–256.

[17] 吴文玉, 孔芹芹, 王晓东, 等. 安徽省近 40 年参考作物蒸散量的敏感性分析[J]. 生态环境学报, 2013, 22 (7) :1160–1166

WU W Y, KONG Q Q, CHEN X D, et al. Sensitivity analysis of reference crop evapotranspiration in Anhui province in the recent 40 years [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2013, 22(7) : 1160–1166.

[18] 曹雯, 段春锋, 姚筠, 等. 1961–2010 年安徽省参考作物蒸散时空变化特征及成因 [J]. 应用生态学报, 2014, 25(12) : 3619–3626.

CAO W, DUAN C F, YAO Y, et al. Temporal-spatial variations of reference evapotranspiration in Anhui Province and the quantification of the causes [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(12) : 3619–3626.

[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, 32(4) : 617–627.

WU G P, LIU Y B, ZHAO X S, et al. Spatio-temporal variations of evapotranspiration in Poyang Lake Basin using MOD16 products [J]. Geographical Research, 2013, 32 (4) : 617 –627.

[20] 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.

FAN J Z, LI D K, GAO M S. Spatio-temporal variations of evapotranspiration in shaanxi province using MOD16 products [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, 23 (9) :1536–1543.

-
- [21] 何慧娟, 卓静, 董金芳, 等. 基于 MOD16 监测陕西省地表蒸散变化 [J]. 干旱区地理, 2015, 38(5) : 960—967.
- HE H J, ZHUO J, DONG J F, et al. Surveying variations of evapotranspiration in Shaanxi Province Using MOD16 products [J]. Arid Land Geography, 2015, 38(5) : 960—967.
- [22] 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.
- HE T, SHAO Q Q, Spatial-temporal Variation of Terrestrial Evapotranspiration in China from 2001 to 2010 Using MOD16 Products [J]. Journal of Geo-information Science, 2014, 16(6) : 979—988.
- [23] 杨秀芹, 王磊, 王凯. 基于 MOD16 产品的淮河流域实际蒸散发时空分布 [J]. 冰川冻土, 2015, 37(5) : 1343 — 1352.
- YANG X Q, WANG L, WANG K. Spatio-temporal distribution of terrestrial evapotranspiration in Huaihe River basin based on MOD16 ET data [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015, 37(5) : 1343—1352.
- [24] 冯飞, 姚云军, 张彦彬, 等. 基于 MOD16 产品的三江平原蒸散量时空分布特征分析 [J]. 生态环境学报, 2015, 24(11) : 1858—1864.
- FENG F, YAO Y J, ZHANG Y B, et al. Spatio-temporal variations of evapotranspiration in Sanjiang Plain Using MOD16 Products [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2015, 24(11) : 1858—1864.
- [25] 喻元, 白建军, 王建博, 等. 基于 MOD16 的关中地区实际蒸散发时空特征分析 [J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(3) : 245—253.
- YU Y, BAI J J, WANG J B, et al. Analysis on spatio-temporal characteristics of ET based on MOD16 in Guanzhong Region [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2015, 33(3) : 245—253.
- [26] 何慧娟, 卓静, 李红梅, 等. 基于 MOD16 产品的陕西关中地区干旱时空分布特征 [J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(1) : 236—241.
- HE H J, ZHUO J, LI H M, et al. Spatial-temporal distribution characteristics of drought in Guanzhong region of Shaanxi Province based on MOD16 products [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2016, 34(1) : 236—241.
- [27] 佟斯琴, 张继权, 哈斯, 等. 基于 MOD16 的锡林郭勒草原 14 年蒸散发时空分布特征 [J]. 中国草地学报, 2016, 38(4) : 83—91.
- TONG S Q, ZHANG J Q, HASI, et al. 14 Years Spatial-temporal distribution characteristics of evapotranspiration in Xilingol Grassland Based on MOD16 [J]. Chinese Journal of Grassland, 2016, 38(4) : 83—91.

[28] 张巧凤, 刘桂香, 于红博, 等. 基于 MOD16A2 的锡林郭勒草原近 14 年的蒸散发时空动态 [J]. 草地学报, 2016, 24(2) : 286—293.

ZHANG Q F, LIU G X, YU H B, et al. Temporal and spatial dynamic of ET based on MOD16A2 in Recent Fourteen Years in Xilingol Steppe [J]. Acta Agrestia Sinica, 2016, 24(2) : 286—293.

[29] 李伟光, 易雪, 蔡大鑫, 等. 基于 MOD16 蒸散量的海南岛干旱特征分析 [J]. 自然灾害学报, 2016, 25(5) : 176—183.

LI W G, YI X, CAI D X, et al. Analysis of drought characteristics in Hainan Island based on MOD16 evapotranspiration data [J]. Journal of Natural Disasters, 2016, 25(5) : 176—183.

[30] 张静, 任志远. 基于 MOD16 的汉江流域地表蒸散发时空特征 [J]. 地理科学, 2017, 37(2) : 274—282.

ZHANG J, REN Z Y. Spatiotemporal characteristics of evapotranspiration based on MOD16 in the Hanjiang River Basin [J]. Scientia Geographica Sinica, 2017, 37(2) : 274—282.

[31] 王效瑞, 田红. 安徽气候变化对农业影响的量化研究 [J]. 安徽农业大学学报, 1999, 26(4) : 493—498

WANG X R, TIAN H. Quantitative research on effects of climatic Change on Agriculture in Anhui [J]. Journal of Anhui Agricultural University, 1999, 26(4) : 493—498.

[32] 何冬燕, 邓汗青, 田红, 等. 安徽省气候及气候带的主要变化特征 [A]. 中国气象学会. 第 33 届中国气象学会年会 S5 应对气候变化、低碳发展与生态文明建设 [C]. 中国气象学会: 2016: 3.

HE D Y, DENG H Q, TIAN H, et al. The main change characteristics of climate and climate zone in Anhui Province [A]. China meteorological society. The thirty-third Chinese Meteorological Society annual meeting S5 climate change, low carbon development and ecological civilization construction [C]. China Meteorological Society: 2016: 3.

[33] 刘纪远, 张增祥, 徐新良, 等. 21 世纪初中国土地利用变化的空间格局与驱动力分析 [J]. 地理学报, 2009, 64(12) : 1411—1420.

LIU J Y, ZHANG Z X, XU X L, et al. Spatial pattern and driving forces of land use change in China in the Early 21st Century [J]. Acta Geographica Sinica, 2009, 64(12) : 1411—1420.

[34] 张圣微, 赵鸿彬, 张发, 等. 基于 MODIS NDVI 的锡林郭勒草原近 10 年的时空动态 [J]. 草业科学, 2014, 31(8) : 1416—1423.

ZHANG S W, ZHAO H B, ZHANG F, et al. Temporal and spatial dynamic of Xilingol steppe based on MODIS NDVI in recent ten years [J]. Pratacultural Science, 2014, 31(8) : 1416—1423.

[35] VINUKOLLU R K, WOOD E F, FERGUSON C R, et al. Global estimates of evapotranspiration for climate studies

using multi-sensor remote sensing data: Evaluation of three processbased approaches [J] . Remote Sensing of Environment, 2011, 115(3) : 801—823.

[36] 冯妍, 何彬方, 唐怀瓿, 等. 安徽省 2000— 2009 年不同类型植被的变化及其与气温、降水的关系 [J] . 生态学杂志, 2012, 31(11) : 2926—2934.

FENG Y, HE B F, TANG H O, et al. Variation patterns of different types of vegetation in Anhui Province of East China in 2000—2009 in relation to air temperature and precipitation [J] . Chinese Journal of Ecology, 2012, 31(11) : 2926—2934.