

基于 MODIS 和 ERA - Interim 的安徽省地表蒸散发及其受植被覆盖度影响研究

许敏, 江鹏

(安徽大学 资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230601)

摘要: 本文旨在基于面尺度探究安徽省 2000 - 2014 年地表蒸散发 (evapotranspiration, ET) 的时空变化特征, 并定量分析气象因子、非气象因子对 ET 的贡献, 重点研究植被覆盖度变化对 ET 的影响。利用蒸散发产品 (MOD16A2)、植被指数产品 (MOD13A3)、气象资料, 采用像元二分模型、回归分析和相关分析等方法进行了研究。结果表明: 2000 - 2014 年安徽省年际地表 ET 呈减少趋势, 空间分布上表现为南高北低; 15 年间研究区内植被覆盖度整体呈增长趋势, 区域整体处于中高植被覆盖度等级, 多年来植被高覆盖度占比均大于 36%; 研究时序内安徽省 ET 变化受非气象因子影响更加显著, 贡献度为 68%, 植被覆盖度作为重要的非气象因子与 ET 逐月相关系数为 0.8567, 两者相关性具有区域差异, 须因地制宜地改善区域水文生态环境。

关键词: 地表蒸散发; 时空变化; 植被覆盖度; 相关性; MODIS; 安徽省

中图分类号: P426.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2020)02-0253-08

Study on the surface evapotranspiration and its responses to vegetation coverage of Anhui Province based on MODIS and ERA - Interim data

XU Min, JIANG Peng

(School of Resources and Environmental Engineering, Anhui University, Hefei 230601, China)

Abstract: We analyzed the spatial-temporal variations of the actual surface evapotranspiration (ET) of Anhui Province and explored its correlations with the meteorological factors and non-meteorological factors, especially the influence of vegetation coverage change on ET . We applied the sub-pixel model, regression analysis and correlation analysis methods with the MODIS gridded 1000 m monthly evapotranspiration product (MOD16A2), monthly vegetation index product (MOD13A3) and meteorological data during the period of 2000 - 2014. The results indicated that the annual evapotranspiration of Anhui Province showed a downward trend with an increase in space from north to south during 2000 - 2014. However, the vegetation coverage had an increasing trend in the study area during the 15 years. The whole area was at medium to high vegetation coverage level with more than 36% of high vegetation coverage level over the years. The changes of ET in Anhui Province were more significantly affected by non-meteorological factors with a relative contribution degree of 68% during the study time series. Moreover, the monthly correlation coefficient between vegetation coverage and ET was 0.8567, which varied with regional differences. In order to effectively improve the regional hydrological and ecological environment, we need to adapt to local conditions.

Key words: actual surface evapotranspiration; spatial-temporal variation; vegetation coverage; correlation; MODIS; Anhui Province

收稿日期: 2019-11-13; 修回日期: 2019-12-23

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41604028); 安徽省自然科学基金项目 (1708085QD83)

作者简介: 许敏 (1995-), 女, 安徽芜湖人, 硕士研究生, 主要研究方向为生态学以及遥感理论与应用。

通讯作者: 江鹏 (1988-), 男, 安徽安庆人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为水资源遥感理论与应用。

1 研究背景

蒸散发 (evapotranspiration, ET) 包括植物蒸腾和地表蒸发两部分,是水分平衡与地表能量平衡的重要组成部分^[1],区域 ET 的时空变化监测可为区域水资源合理利用提供依据,具有重要意义。随着一系列新卫星的升空和新传感器的开发,遥感数据产品日渐丰富,为 ET 研究提供更多信息来源,基于遥感的区域 ET 研究在方法和应用方面已取得不少成果^[3-5]。同时 ET 是一个复杂的过程,易受外界因素影响,对其影响因素探究也是学者们关注的热点^[6]。国内外学者针对气象因素与 ET 间关系已进行了大量研究,研究发现 ET 对气象因素的响应具有区域差异性。例如巴基斯坦区域 ET 在冬季时对水汽压更敏感,夏季对风速更为敏感^[7],而在中国黄河流域上游风速的显著性下降成为 ET 变化的主要因素^[8]。同时日照长度、降水量也会对 ET 产生影响,气候变化是造成区域 ET 变化的重要因素^[9]。植被覆盖度变化是典型的非气象因素,其空间分布特征与研究区域 ET 的高低分布具有显著相关性^[10],探索区域 ET 与植被之间的关系对于水资源和陆地资源的科学管理、区域生态环境改善等都具有重要的意义。区域内植被的水文响应是一个复杂的过程,相关研究一直存在争议^[11]。魏玲娜等^[12]分析表明人工桉树林的种植使流域内蒸散量减小了 18.1%。杜琦^[13]研究发现山西省汾河流域植被恢复后流域蒸散发量减少。然而部分学者研究得出的结论恰恰相反,有研究发现海河流域 ET 随着植被指数的增大而增多^[14]。贺亮亮等^[15]对泾河干流上游森林植被覆盖率的水文影响进行探究,发现随着森林植被的增加,区域 ET 增大。植被变化对水文产生的影响具有区域差异性,关于植被的增加能否有效改善区域的水文环境问题需开展进一步研究,区域治理时若一味扩大绿地面积将造成资源浪费,甚至给当地生态环境带来不良影响。

安徽省是我国的农业大省,开展安徽省 ET 时空变化特征研究,有利于科学评价安徽省气候干湿状况,促进农业稳固发展。国内一些学者已对安徽省 ET 状况进行了研究,吴文玉等^[16]、曹雯等^[17]主要利用气象站点数据,对安徽省 ET 进行估算,研究的尺度局限于点,对安徽省 ET 的总体认识不够。利用 MOD16- ET 遥感产品探究区域 ET 时空分布特征,可以弥补研究中局限于站点的不足^[18]。 ET 受气象因素和非气象因素共同作用,这两大类因

素不属于同一量纲,两者对 ET 的影响程度较难区分,前人关于该区域植被覆盖度变化对 ET 影响的研究不充足。随着生态文明建设的推进,强调对自然生态系统和环境的保护,探究 ET 和植被间的内在规律,将是促进区域水文生态环境改善的必要举措。本研究选择安徽省为研究区,利用美国航天局 (NASA) 提供的月植被指数产品 (MOD17A3) 基于像元二分模型、最大值合成法计算获得区域年度最大植被覆盖状况,基于 ET 产品 (MOD16A2) 获得区域年度蒸散发状况,使用多元回归等方法定量分析气象因素和非气象因素对 ET 的影响程度,最后利用相关分析方法分析安徽省 2000-2014 年间植被覆盖度变化对 ET 的影响,为研究区可持续发展提供指导。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区域

安徽省作为中国重要文明发祥地,有着深厚的农耕文化底蕴,全省土地中耕地面积占比最大,农业生产在全国占有重要的地位。安徽省位于东经 $114^{\circ}54' \sim 119^{\circ}37'$ 、北纬 $29^{\circ}41' \sim 34^{\circ}38'$ 之间,下辖 16 个地级市,有长江、淮河、新安江流经,区域内有平原、丘陵、山地等多种地表类型,气候为暖温带与亚热带的过渡带,光照相对充足,降水具有季节性。

2.2 研究数据

研究中所使用的数据及其来源和特点如表 1 所示。为了保证各类数据空间分辨率的统一,以 MOD16A2 产品为标准,使用克里金插值的方式对气象资料进行整合和插值,然而这一过程必然会产生误差,但气象因素在一区域中的变化较平滑,插值所带来的误差较小,且将插值结果与安徽省台站的观测值进行对比发现具有较好的一致性,故可用于本文的研究。

2.3 研究方法

2.3.1 趋势分析 本文使用一元线性回归分析法对安徽省地表 ET 及相关气象因子进行趋势分析^[19],其计算公式为:

$$\beta = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(t_i - \bar{t})]}{\sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2} \quad (1)$$

式中: β 为线性倾向率; n 为实验数据的年数; x_i 为第 i 年的变量值; $\bar{x}$ 为变量年平均值; t_i 为第 i 年; $\bar{t}$ 为时序的平均值。若计算得到的结果为正表示该变量在研究时序上呈增大趋势,结果为负则表明有减小趋势,绝对值越大则表明所研究的变量变化趋势

越明显。

2.3.2 像元二分模型 像元二分模型的核心思想是假设一个像元由土壤和植被两部分组成,该混合像元的植被指数 $NDVI$ 值为土壤和植被两部分植被指数的加权平均和,权重为两者在像元中的面积比例^[20],表达式为:

$$NDVI = VC \cdot NDVI_{veg} + (1 - VC) \cdot NDVI_{soil} \quad (2)$$

式中: $NDVI$ 为混合像元的植被指数值; VC 为植被覆盖度; $NDVI_{veg}$ 为纯植被像元的植被指数值; $NDVI_{soil}$ 为纯土壤像元的植被指数值。

由公式(2) 可得植被覆盖度的计算公式:

$$VC = (NDVI - S_{min}) / (V_{max} - S_{min}) \quad (3)$$

式中: S_{min} 为纯土壤覆盖像元的最小值; V_{max} 为纯植被覆盖像元的最大值。地表湿度、粗糙度、土壤颜色等条件会对两个参数值产生影响^[22]。本文结合土地覆盖数据及 $NDVI$ 值得出累计概率分布情况,取 5% 和 95% 的 $NDVI$ 值分别作为 S_{min} 和 V_{max} 。

2.3.3 最大值合成法 最大值合成法(MVC, maximum value composite)的原理是将多幅栅格图像叠加,每个像元点取最大值合成一幅新影像^[22]。该方法被广泛应用于植被数据处理中,本文通过此方法获取安徽省年植被覆盖度情况。

表 1 研究所使用的数据及其来源和特点

数据名称	下载地址	数据特点	用途
MOD16A2 产品	http://files.ntsg. umt. edu/ data/NTSG_Products/MOD16/	月产品,分辨率 1km	获得安徽省的地表实际 ET 情况
MOD13A3 产品	https://lpdaac. Usgs. gov /	月产品,分辨率 1km	获得安徽省归一化植被指数情况
欧洲中尺度数值天气再分析资料 ERA - Interim	https://lpdaac. Usgs. gov /	月数据,分辨率 $0.703^{\circ} \times 0.703^{\circ}$	获得安徽省降水、风速、温度情况
DEM	http://www. gsccloud. cn/		获得安徽省高程信息

2.3.4 多元回归 为了量化气象因子的贡献,进行了多元线性回归^[23]:

$$\Delta ET = a_{pre} \Delta Pre + a_{temp} \Delta Temp + a_{wind} \Delta Wind + int \quad (4)$$

式中: ΔET 为去趋势的 ET 值; a_{pre} 、 a_{temp} 、 a_{wind} 为预测因子的回归系数; ΔPre 、 $\Delta Temp$ 、 $\Delta Wind$ 分别为去趋势的降水、气温、风速值。

ET 对逐年气候变化的响应相似,使用公式(4)得到的回归系数以及气象因子变化趋势来量化气象因子对 ET 变化的贡献,计算公式如下^[23]:

$$Q_c = a_{pre} Q_{pre} + a_{temp} Q_{temp} + a_{wind} Q_{wind} \quad (5)$$

式中: Q_{pre} 、 Q_{temp} 、 Q_{wind} 分别为气象因子的变化率,可通过简单的线性回归模型计算得到; Q_c 为气象因子对 ET 变化的贡献度。

地表 ET 的变化主要受气象因子以及非气象因子(如人为引起的植被覆盖变化) 共同作用,因此非气象因子的对 ET 变化的贡献可以量化为^[23]:

$$Q_{nc} = Q - Q_c \quad (6)$$

另外,气象和非气象因子相对贡献计算如下:

$$RC_c = |Q_c| / (|Q_c| + |Q_{nc}|) \quad (7)$$

$$RC_{nc} = |Q_{nc}| / (|Q_c| + |Q_{nc}|) \quad (8)$$

式中: RC_c 和 RC_{nc} 分别为气象因子和非气象因子对

ET 变化的相对贡献。

2.3.5 Pearson 系数法 使用 Pearson 系数法逐像元分析两个变量之间的相关性,公式为^[24]:

$$R_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (9)$$

式中: R_{xy} 为变量间的相关系数; x_i 、 y_i 分别为两个变量第 i 年的值; $\bar{x}$ 、 $\bar{y}$ 分别为两个变量 x 、 y 的多年平均值; n 为实验数据的年数。变量系数值越大,则表明变量间相关性越显著。

3 结果与分析

3.1 安徽省 ET 时空分布特征

本文首先处理并得到了 ERA - Interim 再分析资料的年均 ET ,将其与预处理后的 MOD16A2 产品进行比较,如图 1 所示。由图 1 可见,MOD16A2 产品的年均 ET 值多年来普遍偏高,尤其是在 2002 和 2003 年更为明显,计算得到 2000 - 2014 年间 ERA - Interim 再分析资料的年均 ET 与 MOD16A2 产品均方根误差 $RMSE = 43.8 \text{ mm/a}$,与贺添等^[25] 对全国十大流域的验证结果($RMSE = 152 \text{ mm/a}$) 相比

更低,同时王芳等^[26]在其研究中使用安徽省站点实测数据与 MOD16-ET 数据集进行对比,两者同样呈现出较好的一致性,因此该数据产品可用于安徽省地表实际 ET 时空动态特征研究。

首先去除 MOD16A2 产品中的异常值,水体以及建筑地区的 ET 不计算(设为空值),然后进行拼接、裁剪、栅格计算获得安徽省 2000-2014 年逐年的 ET 分布状况,研究结果表明,安徽省内地表 ET 呈明显的时间和空间差异。

2000-2014 年安徽省年的地表 ET 和 VC 年均值变化情况如图 2 所示。分析图 2 可知,ET 变化区间为 651~732 mm,年均 ET 为 699 mm,年际变化呈减小趋势。

2000-2014 年安徽省年均 ET 值空间分布及其一元线性回归趋势分析见图 3。从图 3 中空间上分析,全省地表 ET 分布呈现由北至南增多的特征(图

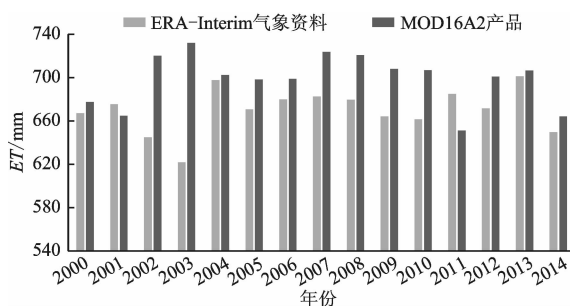


图 1 安徽省 2000-2014 年 MOD16A2 产品与 ERA-Interim 气象资料 ET 的对比

3(a)),植物蒸腾作为 ET 的重要组分,对 ET 高低有着重要影响,安徽省北部主要是暖温带落叶阔叶林,植被存在较明显的季节变化,中部江淮丘陵、沿江和大别山区北部为亚热带落叶与常绿阔叶混交林,再往南以常绿阔叶林为主,植被覆盖度整体上由南向北减少,植被的蒸腾作用相应减少,同时夏季风由南进入,水汽受山地阻挡不能长驱直入,越向北水汽越少,ET 减少^[27]。低于 600 mm 的低 ET 值主要分布在安徽北部地区,高于 700 mm 的高 ET 值主要分布在植被覆盖度较高的山地、丘陵地区,在山地地区海拔升高,植物叶面较窄,此时植被蒸腾作用减弱,ET 减少。采用一元线性回归的方法逐像元计算 2000-2014 年的全省地表实际 ET 年际变化率,得到 ET 变化趋势状况(图 3(b)),研究区域内皖南及大别山大部分区域 ET 呈增加趋势,中部地区多呈减少态势,北部地区 ET 增长和减少趋势地区交错分布。

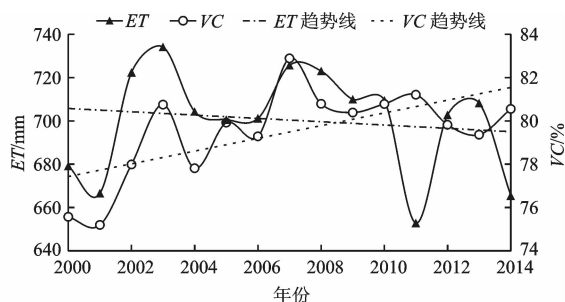


图 2 2000-2014 年安徽省蒸散发(ET)及植被覆盖度(VC)的年际变化

3.2 安徽省植被覆盖度时空分布特征

基于 MOD13A3 植被指数月产品,运用像元二分模型,计算得到安徽省 2000-2014 年间逐月的植被覆盖度情况,然后通过最大合成法获取逐年的每年最大植被覆盖度情况,水体以及建筑地区的 ET 不计算(设为空值),为了统一研究区范围,在植被覆盖度计算时也不考虑水体及建筑地区。2000-2014 年安徽省植被覆盖度均值变化情况如图 2 所示,由图 2 可看出,15 年间研究区内植被覆盖度整体上呈增加趋势,变化区间为 75.19%~82.89%,2001 年植被覆盖度最低。

本文依据水利部颁布的《土壤侵蚀分类分级标准》中的植被覆盖度分级标准及前人的相关研究^[28],将植被覆盖度分成 5 个等级:低覆盖度(<35%)、中低覆盖度(35%~50%)、中覆盖度(50%~65%)、中高覆盖度(65%~80%)、高覆盖度(>80%)。2000-2014 年安徽省年际各等级植被覆盖

度占比变化如图 4 所示,由图 4 可看出,研究区低植被、中低植被覆盖度所占比例相对较小,除 2000 年以外高植被覆盖度占比始终最大(>39%),研究区整体处于中高植被覆盖度。2008 年之前各等级植被覆盖度占比波动较大,2008 年以后各等级占比趋于稳定变化较小。

2000-2014 年安徽省最大植被覆盖度空间分布及其一元线性回归趋势见图 5。由图 5(a)可知,皖西丘陵山地地区以及皖南丘陵山地地区常绿植被较多,植被覆盖度最高,其次是淮北平原区,低植被覆盖区占比最少,主要分布在各城市周边、河湖沿岸地区;由图 5(b)可知,安徽省大部分区域植被覆盖度呈改善趋势(变化斜率大于 0),而城市边缘、沿江地区的植被覆盖度呈减少趋势(变化斜率小于 0),这主要是受城市化扩张的影响,还有些植被覆盖退化区域分布于丘陵山地地区,该区域受旅游开发影响较大。

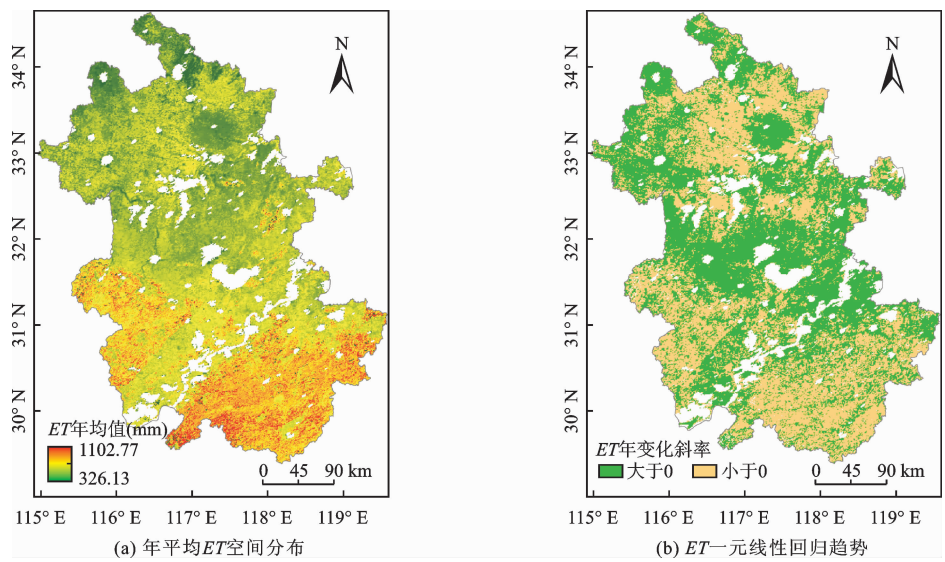


图 3 2000 - 2014 年安徽省年均 ET 值空间分布及其一元线性回归趋势

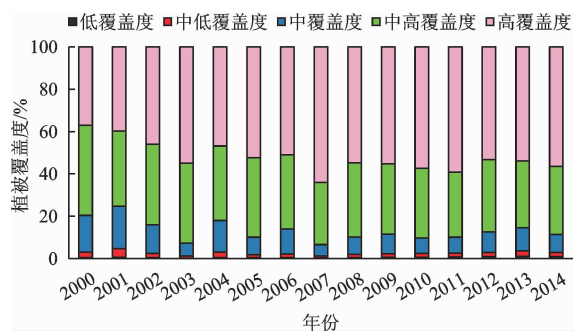


图 4 2000 - 2014 年安徽省年际各等级植被覆盖度占比变化

3.3 气象因子与非气象因子对安徽省 ET 变化的贡献

使用克里金插值的方式对 ERA - Interim 气象资料进行整合和插值,获得 2000 - 2014 年安徽省逐

月降水、温度、风速情况,进一步计算获得安徽省研究时序内逐年的气象因子变化情况。由公式(4) ~ (8) 计算得到 2000 - 2014 年安徽省每个像元中气象因子和非气象因子对 ET 变化的相对贡献度,结果如图 6 所示。由图 6 可看出,全省大部分区域非气象因子对 ET 变化贡献度更高,尤其在江淮平原地区。为进一步判断各区域气象因子和非气象因子对安徽省 ET 变化的贡献,利用行政区划图统计研究区内 16 个市区的两类因子贡献度情况,结果如表 2 所示。表 2 中的数据也表明,各市区非气象因子对 ET 变化的贡献度更高,其中阜阳市非气象因子对 ET 变化贡献度最低,为 54.82%,马鞍市最高,为 81.83%。

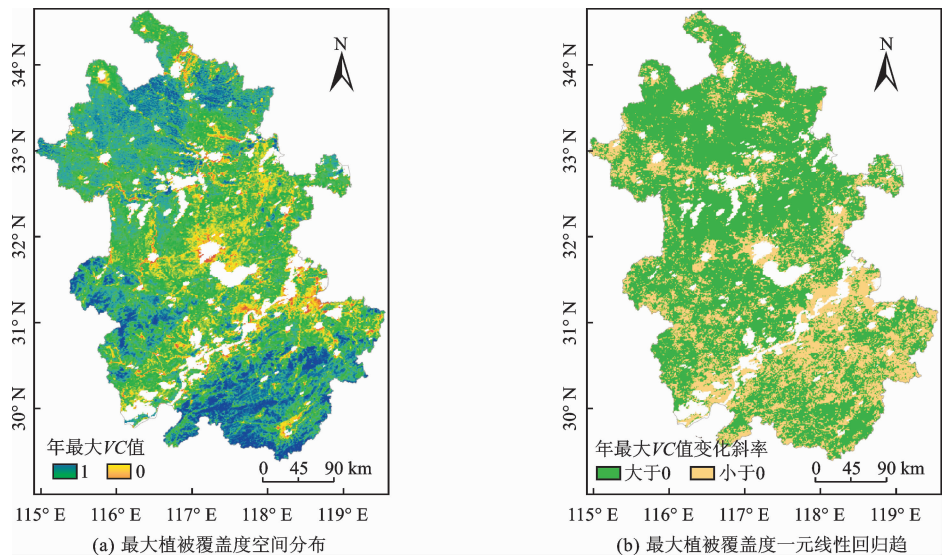


图 5 2000 - 2014 年安徽省最大植被覆盖度 VC 值空间分布及其一元线性回归趋势

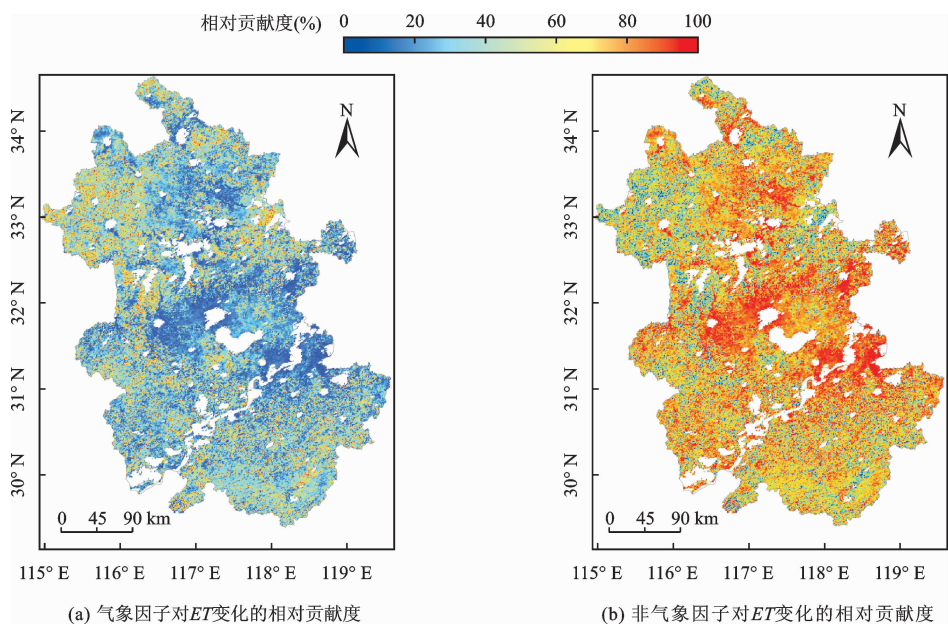


图6 2000 - 2014 年安徽省气候因子和非气候因子对 ET 变化的相对贡献度

表2 安徽省各市气象因子和非气候因子对 ET 变化的相对贡献度 (RC_c 、 RC_{nc}) %

城市	RC_c	RC_{nc}	城市	RC_c	RC_{nc}
安庆市	31.69	68.31	淮南市	29.76	70.24
蚌埠市	27.11	72.89	黄山市	36.26	63.74
亳州市	34.93	65.07	六安市	32.30	67.70
池州市	34.91	65.09	马鞍山市	18.17	81.83
滁州市	31.20	68.80	铜陵市	28.16	71.84
阜阳市	45.18	54.82	芜湖市	20.33	79.67
合肥市	24.29	75.71	宿州市	34.54	65.46
淮北市	29.79	70.21	宣城市	33.26	66.74

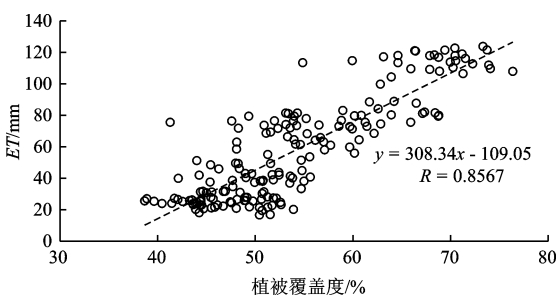


图7 安徽省2000 - 2014 年 ET 与植被覆盖度逐月相关关系

图8 为2000 - 2014 年安徽省 ET 与植被覆盖度年际相关关系空间分布。

3.4 安徽省植被覆盖度变化对 ET 的影响

上述研究表明,2000 - 2014 年间非气象因子在调节安徽省 ET 中发挥了重要作用。植被覆盖度变化是典型的非气象因子,本部分将重点分析植被覆盖度变化对 ET 的影响。使用 Pearson 系数法对2000 - 2014 年安徽省逐月 ET 与同期逐月植被覆盖度进行相关性分析,结果如图7 所示。图7 表明,两者之间存在正相关,相关系数为0.8567。对比分析安徽省 ET 与植被覆盖度的时空分布特征(图3 和5),发现安徽省 ET 和植被覆盖度在时空分布上均呈现由北向南递增的趋势,区域内 ET 的高、低值区与植被覆盖度的高、低值区分布空间特征基本保持一致,植被覆盖度对蒸散分布有一定影响,植被覆盖度越高的区域则蒸散越高。

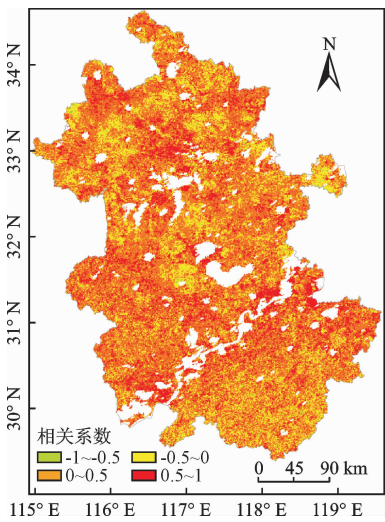


图8 2000 - 2014 年安徽省 ET 与植被覆盖度年际相关关系

从图8 中空间分布上来分析逐像元计算的最大植被覆盖度与年均 ET 之间的相关性,结果显示:

(1)研究区内21.27%区域相关系数为负,表示 ET 随植被覆盖度增加而减小,植被的增加将引起植被叶面积的扩大,但带来的是土壤表面的太阳辐射可能减少,导致土壤蒸发量减少,进而使得区域 ET 减少,同时新增加的植物其蒸腾作用低于成熟植物,尽管叶面积增大了却没有增强区域的蒸腾作用。安徽省北部区域降水量少于南部,造林增加的截留可能导致径流的增大,而不是 ET 的增大,即单纯的植被扩增并不一定能带来区域 ET 的增加,这可为区域的生态建设提供参考;(2)研究区内78.73%区域相关系数为正,表示 ET 随植被覆盖度增加而增大,在城市周边及植被覆盖度较低的区域两者呈正相关且相关性较强。林地区域的相关系数尽管有正负区别但绝对值均较小,这主要是由于森林生态系统植被冠层封闭, ET 变化稳定。

4 结论

基于MOD16A2产品、MOD13A3产品及ERA-Interim气象资料,对2000-2014年安徽省实际 ET 时空变化以及植被覆盖度对 ET 的影响进行研究,结论如下:

(1)经验证,MOD16A2产品适用于安徽省 ET 变化研究,2000-2014年安徽省年际地表实际 ET 呈下降趋势,变化区间为651~732 mm,空间分布上呈南高北低的特征,区域内蒸散发年际变化不显著。

(2)基于像元二分模型计算得到安徽省2000-2014年植被覆盖度情况,15年间研究区内植被覆盖度整体上呈改善趋势,变化区间为75.19%~82.89%,区域整体属于中高植被覆盖度。

(3)经计算获得气象因子及非气象因子对 ET 变化的贡献度,发现非气象因子对 ET 变化作用更加显著,贡献度为68%,植被覆盖度作为重要的非气象因子与 ET 之间存在相关性,逐月相关系数为0.8567,两者相关性具有区域差异,区域内正负相关交错分布,21.27%区域相关系数为负值,78.73%区域相关系数为正值。

本研究分析了安徽省地表 ET 的时空变化情况,并探究其与气象因子、非气象因子间的相关关系,重点研究植被覆盖度变化对 ET 的影响。2000-2014年间植被覆盖度在调节安徽省 ET 中发挥了重要作用,其调节作用具有区域差异,因此区域水文的改善,需要因地制宜,避免资源浪费。本研究仍存在一些不足,研究使用的MODIS产品的时间范围较为有限,且该数据集的反演模型在全球通用,但在研

究区的适用性有待提高。

参考文献:

- [1] SUN Miao, DONG Qinge, JIAO Mengyan, et al. Estimation of actual evapotranspiration in a semiarid region based on GRACE gravity satellite data - A case study in Loess Plateau[J]. Remote Sensing, 2018, 10(12):2032.
- [2] 尹剑, 欧照凡, 付强, 等. 区域尺度蒸散发遥感估算——反演与数据同化研究进展[J]. 地理科学, 2018, 38(3):448-456.
- [3] 邓兴耀, 刘洋, 刘志辉, 等. 中国西北干旱区蒸散发时空动态特征[J]. 生态学报, 2017, 37(9):2994-3008.
- [4] 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.
- [5] 代鹏超, 牛苏娟, 毋兆鹏, 等. 新疆精河流域实际蒸散发时空变化特征[J]. 生态与农村环境学报, 2017, 33(7):600-606.
- [6] LI Meng, CHU Ronghao, SHEN Shuanghe, et al. Quantifying climatic impact on reference evapotranspiration trends in the Huai River Basin of Eastern China[J]. Water, 2018, 10(2):144.
- [7] ADNAN S, ULLAH K, AHMED R. Variability in meteorological parameters and their impact on evapotranspiration in a humid zone of Pakistan[J]. Meteorological Applications, 2020, 27(1):e1859.
- [8] XU Shiqin, YU Zhongbo, YANG Chuanguo, et al. Trends in evapotranspiration and their responses to climate change and vegetation greening over the upper reaches of the Yellow River Basin[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2018, 263:118-129.
- [9] 曹文旭, 张志强, 查同刚, 等. 基于Budyko假设的潮河流域气候和植被变化对实际蒸散发的影响研究[J]. 生态学报, 2018, 38(16):5750-5758.
- [10] 王娟, 何慧娟, 卓静, 等. 基于MODIS数据的陕西省植被净初级生产力与实际蒸散的变化关系分析[J]. 水土保持通报, 2017, 37(3):264-269.
- [11] 张愈, 尹倬. 森林植被变化的水文生态效应研究[J]. 江西农业, 2018(8):87.
- [12] 魏玲娜, 陈喜, 王文, 等. 基于水文模型与遥感信息的植被变化水文响应分析[J]. 水利水电技术, 2019, 50(6):18-28.
- [13] 杜琦. 山西省汾河流域植被恢复对蒸散发的影响[J]. 人民珠江, 2018, 39(1):10-12+39.
- [14] ZHAO Jing, CHEN Xuelong, ZHANG Jing, et al. Higher temporal evapotranspiration estimation with improved SEBS model from geostationary meteorological satellite data[J]. Scientific Reports, 2019, 9(1):1-15.

- [15] 贺亮亮, 张淑兰, 李振华, 等. 泾河干流上游森林覆盖率水文影响的年份和月份差异[J]. 中国水土保持科学, 2018, 16(1):56-64.
- [16] 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.
- [17] 曹雯, 段春峰, 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.
- [18] 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.
- [19] LIU Xiaomang, ZHANG Dan. Trend analysis of reference evapotranspiration in Northwest China: The roles of changing wind speed and surface air temperature [J]. Hydrological Processes, 2013, 27(26):3941-3948.
- [20] 祝聪, 彭文甫, 张丽芳, 等. 2006-2016 年岷江上游植被覆盖度时空变化及驱动力[J]. 生态学报, 2019, 39(5):1583-1594.
- [21] 刘珍, 文彦君, 张翀. 2003-2014 年关中地区季节植被覆盖度时空变化分析[J]. 地理空间信息, 2018, 16(5):67-71+74+9.
- [22] 张学玲, 张莹, 牛德奎, 等. 基于 TM NDVI 的武功山山地草甸植被覆盖度时空变化研究[J]. 生态学报, 2018, 38(7):2414-2424.
- [23] WANG Ying, LIU Yuanbo, JIN Jiaxin. Contrast effects of vegetation cover change on evapotranspiration during a revegetation period in the Poyang Lake Basin, China [J]. Forests, 2018, 9(4):217.
- [24] 刘欣婷. 植被覆盖时空变化及其驱动因子研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 2016.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 邓凯, 黄长江, 袁慧慧, 等. 基于 MODIS 的 2007-2017 安徽省植被指数时空变化特征研究[J]. 黑龙江工程学院学报, 2018, 32(6):24-27.
- [28] 张宇欣, 杨存建, 谭琪铃, 等. 1988-2009 年安县山区植被覆盖度变化动态分析[J]. 安徽农业大学学报, 2016, 43(3):494-498.

(上接第 252 页)

- [31] 朱智, 师春香, 张涛, 等. 四套再分析土壤湿度资料在中国区域的适用性分析[J]. 高原气象, 2018, 37(1):240-252.
- [32] ALBERGEL C, RÜDIGER C, PELLARIN T, et al. From near-surface to root-zone soil moisture using an exponential filter: an assessment of the method based on in-situ observations and model simulations[J]. Hydrology & Earth System Sciences Discussions, 2008, 5(3):1323-1337.
- [33] DORIGO W, LIU Yi, PARINUSSA R, et al. Merging multi-mission microwave soil moisture observations to obtain long-term time series in support of climate change studies[J]. EGU General Assembly, 2010, 12:12221.
- [34] STOFFELEN A. Toward the true near-surface wind speed: Error modeling and calibration using triple collocation[J]. Journal of Geophysical Research, 1998, 103(C4):7755-7766.
- [35] DORIGO W A, SCIPAL K, PARINUSSA R M, et al. Error characterisation of global active and passive microwave soil moisture datasets[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2010, 14(12):2605-2616.
- [36] GRUBER A, SU C H, ZWIEBACK S, et al. Recent advances in (soil moisture) triple collocation analysis[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2016, 45:200-211.
- [37] DRAPER C, REICHLER R, DE JEU R, et al. Estimating root mean square errors in remotely sensed soil moisture over continental scale domains[J]. Remote Sensing of Environment, 2013, 137(251):288-298.
- [38] 郭德亮, 樊军, 米美霞. 黑河中游绿洲区不同土地利用类型表层土壤水分空间变异的尺度效应[J]. 应用生态学报, 2013, 24(5):1199-1208.
- [39] LIU Suxia, MO Xingguo, LI Haibin, et al. Spatial variation of soil moisture in China: Geostatistical characterization[J]. Journal of The Meteorological Society of Japan, 2001, 79(1B):555-574.