

# 城市蒸发散量与相关生态要素的定量关系

王琳<sup>1,2,3</sup>, 徐涵秋<sup>1,2,3</sup>

(1. 福州大学 环境与资源学院, 福建 福州 350116; 2. 福州大学 遥感信息工程研究所, 福建 福州 350116;  
3. 福建省水土流失遥感监测评估与灾害防治重点实验室, 福建 福州 350116)

**摘要:** 以福州城区为例, 使用 2003, 2013 年的 Landsat 卫星影像获得了研究区蒸发散量、建筑用地和植被信息, 查明了研究区蒸发散量的时空变化特征, 并对上述参数之间的相关关系进行了定量分析. 研究结果表明, 福州研究区 2013 年的区域蒸发散量比 2003 年有较大幅度的降低, 其降幅达 30.62%. 回归分析表明, 蒸发散量与建筑用地呈很强的线性负相关关系, 而与植被则呈明显的线性正相关关系. 显然福州城市的扩展、建筑用地的增加和植被的减少是导致研究区 ET 降低的最重要原因.

**关键词:** 遥感; 蒸发散量; 基于指数的建筑用地指数(ABI)

**中图分类号:** X87; TP79; Q988

**文献标志码:** A

## Spatiotemporal Variations of Evapotranspiration and Its Quantitative Relationship with Other Ecosystem Components in Urban Areas

WANG Lin<sup>1,2,3</sup>, XU Hanchun<sup>1,2,3</sup>

(1. College of Environment and Resources, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China; 2. Institute of Remote Sensing Information Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China; 3. Fujian Provincial Key Laboratory of Remote Sensing of Soil Erosion and Disaster Protection, Fuzhou 350116, China)

**Abstract:** This paper, taking Fuzhou urban area as an example studied the urban ET variations and its relationship with urban build-up land and vegetation using two Landsat images of 2003 and 2013. The result reveals that the ET has been sharply decreased by 30.62% in urban areas. The regression analysis shows that ET has a strong negative linear correlation with urban build-up land and an obvious positive linear correlation with vegetation. Apparently, urban expansion, build-up land increase and vegetation reduction are the key factors contributing to the decreasing of ET in urban areas.

**Key words:** remote sensing; evapotranspiration; index-based build-up index(ABI)

进入 21 世纪以来, 宜居环境和生态保护已经成为全球瞩目的焦点. 2014 年 4 月国务院明确提出要把福建省建成全国首个“生态文明先行示范区”, 并深入实施“生态省”战略, 而福州市作为福建省省会, 海西区龙头城市之一, 打造良好生态环境的重要性不言而喻. 近年来快速的城市化进程给福州带来了繁荣和发展, 却也造成了植被、湿地的大量减少和建筑用地的不断催生, 给生态环境和城市宜居程度造成了损害. 根据 2013 年 7 月国家气候中心的研究报告, 福州一跃成为新“三大火炉”之首, 其负面影响可见一斑. 而地表蒸发散对缓解城市热岛效应, 改善城市生态环境有积极而显著的作用, 其过程能有效地将地表水分带到低层大气, 同时还能消耗大量的地表能量, 从而改变低层大气的湿度和温度状况. 因此了解城市区域蒸发散量的时空分异特征及其与建筑用地、植被等城市地表要素之间的相关关系对城市的健康发展和生态系统的修复具有重要的指导意义.

从国内外研究情况来看, 人居生态环境的研究已经由过去的定性分析逐步发展到现在的定量评价, 城市热岛、城市建筑用地信息和植被信息的获取和监测方法也由传统的现场调查发展为以空间遥感技术为主的高科技手段调查. 同时, 利用遥感手段反演和监测蒸发散量因其覆盖面广、分辨率高、结果准确等特点, 被各国科学家所利用, 尤其在区域蒸发散的监测和计算方面具有明显的优越性. Brown 和 Rosenberg 根据能量平衡-作物阻抗原理提出的作物阻抗-蒸散模型成为蒸发散模型的热红外遥感应用的理论基础<sup>[1]</sup>; Li 等利用 MODIS(中分辨率成像光

收稿日期: 2015-04-16

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划(2013BAC08B01-05); 福建省自然科学基金(2012J01169); 福建省教育厅科技 A 类项目(JA13030); 福州大学科技发展基金(2012-XY-9)

第一作者: 王琳(1981—), 男, 讲师, 工学博士, 主要研究方向为环境与资源遥感. E-mail: wanglin@fzu.edu.cn

通讯作者: 徐涵秋(1955—), 男, 教授, 工学博士, 主要研究方向为环境与资源遥感. E-mail: hxu@fzu.edu.cn

谱仪)卫星影像配合地面验证获取并比较了2008年南亚部分地区的蒸发散量,认为季风气候对蒸发散量的时空变化有着很大的影响<sup>[2]</sup>;Wang等在加拿大对比了6种主流的测量蒸发散量的方法,发现利用遥感手段通过MODIS卫星反演蒸发散量的结果在寒冷季节和植被稀疏区域有较大的不确定性<sup>[3]</sup>;矫京均等以环境一号卫星(HJ-1)数据为主要数据源,研究和分析了地表能量平衡遥感估算方法,重点研究了地表显热和潜热通量(蒸散)的估算方法<sup>[4]</sup>;王鹏涛等根据华北平原1960~2012年逐日气象数据和Penman-Monteith模型计算了各站及区域整体参考作物蒸散量(ET<sub>0</sub>),再对华北平原ET<sub>0</sub>的时空变化及其影响因素进行了分析<sup>[5]</sup>;Xiong等以MODIS影像为数据源,结合相关气象数据,采用SEBS模型监测和评价了我国北部地区的蒸发散量<sup>[6]</sup>;Raghuveer等利用3种基于过程的蒸发散模型测算了全球不同地区的蒸发散量,并对这3种方法的效果做出了评价<sup>[7]</sup>;French等利用机载传感器和Landsat卫星影像,分别比较了TSEB(two-source energy balance)和METRIC两种模型在反演棉花地地的蒸发散量中的精度,认为两种模型表现相差不大<sup>[8]</sup>.徐涵秋对福州市1976~2006年间的的变化及其对城市热环境的影响进行研究,查明了福州城市主要地表参数在这30年里发生的变化及其对城市热环境的影响<sup>[9]</sup>;Kleerekope等提出了运用城市规划的方法,分别从植被、水体、建筑形式和材质等方面论述了缓解热岛效应的实施策略<sup>[10]</sup>;Coseo等利用遥感数据和城市气象数据探讨了土地利用覆盖,建筑配置和临近热源对美国芝加哥市城市热岛效应的影响<sup>[11]</sup>.

总体看来,区域蒸发散量的研究在大面积流域、平原和三角洲地区的农业及水资源评价中都取得了长足的发展,但在城市范围中的应用却不多见;另外,城市区域空间变化及其对生态环境的影响也主要集中于热环境影响方面,而对蒸发散量的研究也同样鲜有提及.有鉴于此,本文拟以卫星遥感对地观测技术,反演和提取福州地区的蒸发散量、建筑用地信息、植被信息等各相关城市地表要素,查明近10年来福州蒸发散量的时空分异特征,掌握各要素之间的相关关系和规律,并在此基础上分析它们对城市生态环境的影响.

## 1 数据源及影像预处理

福州地处中国东南沿海,与台湾隔海相望.境内

地势由西北向东南倾斜,属典型的河口盆地,城区位于盆地中央,四周被海拔在600~1 000 m的群山环抱,闽江由西横贯市区,往东汇入东海.福州属亚热带海洋性季风气候,夏季以偏南风为主,气温较高.福州市辖5个行政区,常住人口292万.本次研究区范围(图1中浅色轮廓覆盖区域)以福州盆地为主,覆盖了福州市区及其毗邻地区,面积521.3 km<sup>2</sup>.

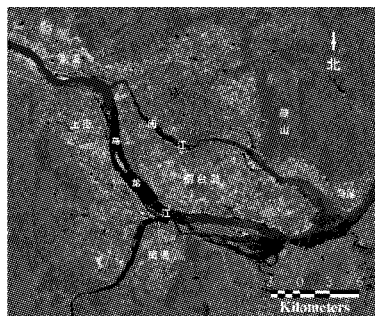


图1 福州盆地及研究区域示意图

Fig.1 Landsat image showing Fuzhou Basin and the area under study

本次研究选用的数据源为覆盖福州地区2个时相的Landsat 7,8号卫星影像,成像时间分别是2003-05-29和2013-08-04(后者为美国地质调查局(USGS)于2014-02-17重新定标处理的数据).为了描述简练,下文所指的2003年和2013年均指这两个日期.研究所需的气象数据来自于福州乌山国家基准气候站(26°4'39"北,119°17'24"东),大气水汽含量来自于美国宇航局提供的全球大气参数库(NCEP)<sup>[12]</sup>.

影像的辐射校正采用Chander等的参数模型<sup>[13]</sup>和Chavez的COST(cosine of the solar zenith angle)大气校正模型<sup>[14]</sup>,将原始影像的象元灰度值(DN)转换成传感器处反射率(at-sensor reflectance),以减少不同时相影像在地形、光照和大气等方面的差异.影像之间采用二次多项式和最邻近象元法进行几何校正,并使RMSE(均方根误差)小于0.5,以确保配准精度.

## 2 主要的算法及模型

### 2.1 地表蒸发散量的反演

蒸发散量(evapotranspiration, ET)是水文循环和地表热量平衡的一个重要组成部分.考虑到本次研究所用的数据源和获得的相关气象资料数据,决定采用理论相对成熟、更适用于遥感手段实现的陆面能量平衡模型SEBAL(surface energy balance

algorithm for land)<sup>[15-16]</sup>进行地表蒸发散量的反演。SEBAL模型对地表各通量的计算是基于单个象元的,因此计算结果能以影像的形式可视化显示。

利用SEBAL模型反演地表蒸发散量的思路,主要是从地表各能量间的相互关系入手,利用地表反射的太阳辐射或本身发射的远红外等波段的信息及变化规律推算出来的。公式具体表达如下<sup>[15]</sup>:

$$\lambda_{ET} = R_n - G - H \quad (1)$$

式中: $\lambda_{ET}$ 为潜热通量(用于蒸散), $W \cdot m^{-2}$ ;  $R_n$ 为地表净辐射通量, $W \cdot m^{-2}$ ;  $G$ 为土壤热通量, $W \cdot m^{-2}$ ;  $H$ 为显热通量, $W \cdot m^{-2}$ 。

地表净辐射通量  $R_n$  可由以下方程求得<sup>[15]</sup>:

$$R_n = (1 - \alpha) R_{s\downarrow} + \epsilon_a \sigma T_a^4 - \epsilon_s \sigma T_s^4 \quad (2)$$

式中: $\alpha$ 为宽波段地表反照率; $R_{s\downarrow}$ 为入射到地表的太阳短波辐射,即太阳总辐射, $W \cdot m^{-2}$ ;  $\sigma$ 为 Stefan-Boltzmann 常数,取  $5.6697 \times 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$ ;  $\epsilon_a$ 为大气比辐射率; $\epsilon_s$ 为地表比辐射率; $T_a$ 为参考高度的空气温度,K; $T_s$ 为地表温度,K。

土壤热通量可以由以下方程求得<sup>[15]</sup>:

$$G = \Gamma \cdot R_n \quad (3)$$

Bastiaanssen 认为比例函数  $\Gamma$  值近似地由  $T_s$ ,  $\alpha$  和量纲一化差值植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)值决定<sup>[15]</sup>,即

$$\Gamma = \frac{T_s}{\alpha} (0.0038\alpha + 0.0074\alpha^2) (1 - 0.98I_{NDVI}^4) \quad (4)$$

式中, $I_{NDVI}$ 为 NDVI 指数值。

显热通量  $H$  可由下式得到<sup>[15]</sup>:

$$H = \rho \cdot c_p \frac{dT}{r_{ah}} \quad (5)$$

式中: $\rho$ 为空气密度, $kg \cdot m^{-3}$ ;  $c_p$ 为空气比热,值为  $1.004 kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ;  $dT$ 是零平面位移以上高度为  $z_1$  和  $z_2$  处的温差,K; $r_{ah}$ 为空气动力学阻抗, $s \cdot m^{-1}$ 。

求取瞬时蒸发散的公式如下<sup>[15]</sup>:

$$E_{inst} = 3600 \frac{\lambda_{ET}}{\lambda} \quad (6)$$

式中: $E_{inst}$ 为瞬时蒸发散量,mm; $\lambda$ 为蒸发潜热,取  $2.49 \times 10^6 W \cdot m^{-2} \cdot mm^{-1}$ 。

根据 Jackson 等的研究<sup>[17]</sup>,在晴天天气条件下,日蒸发散量与任一时刻的瞬时蒸发散量存在正弦关系,即

$$\frac{E_d}{E_{inst}} = \frac{2N_E}{\pi \cdot \sin(\pi t / N_E)} \quad (7)$$

式中: $E_d$ 为日蒸发散量,mm; $E_{inst}$ 为时刻  $t$  的瞬时蒸

发散量,mm; $N_E$ 为日蒸发散时数,即清晨蒸发散开始时刻到傍晚蒸发散减弱到接近于0时的时间长度,一般在日出后1h时和日落前1h左右蒸发散接近于0,因此  $N_E$  取比日照时数少2h,即  $N_E = N - 2$ ;  $t$ 为清晨蒸发散开始时刻到上面计算蒸发散量的间隔时间。

综上所述,蒸发散量的大小受到地表净辐射通量、土壤热通量和显热通量等多因素的影响,只要分别求出以上几个量,便可以计算出用于蒸散的潜热通量  $\lambda_{ET}$ ,从而进一步计算出遥感影像对应的瞬时蒸发散量  $E_{inst}$  和日蒸发散量  $E_d$ 。

## 2.2 地表植被信息的反演

城市地表植被信息可以利用植被指数在遥感影像中进行提取,本文采用被广泛使用的 NDVI 指数来获取植被信息,其公式为

$$I_{NDVI} = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{red}}{\rho_{NIR} + \rho_{red}} \quad (8)$$

式中: $\rho_{NIR}$ 代表近红外波段的反射率; $\rho_{red}$ 代表红光波段的反射率。

## 2.3 地表建筑用地信息的反演

城市建筑用地信息是研究城市生态环境中最重要的地表参数之一,它代表了复杂的土地利用信息。Zha 等创建了量纲一化差值建筑指数(normalized difference built-up index, NDBI)来提取城市建筑用地,然后用 NDVI 指数滤去其中混入的植被信息<sup>[18]</sup>。而 Xu 创建了基于指数的建筑用地信息提取方法——IBI(index-based built-up index)指数<sup>[19]</sup>,它在提取建筑用地信息的同时,还可以将植被信息分离,因此,可用于研究建筑用地对城市生态环境的影响。其公式为

$$I_{IBI} = \frac{I_{NDBI} - 0.5(I_{SAVI} + I_{MNDWI})}{I_{NDBI} + 0.5(I_{SAVI} + I_{MNDWI})} \quad (9)$$

式中: $I_{IBI}$ 代表 IBI 指数值; $I_{NDBI}$ 代表 NDBI 指数值; $I_{SAVI}$ 代表土壤调节植被指数(soil adjust vegetation index, SAVI)值<sup>[20]</sup>;  $I_{MNDWI}$ 代表改进的量纲一化差值水体指数(modified normalized difference water index, MNDWI)值<sup>[21]</sup>。

# 3 结果与分析

## 3.1 福州城区日蒸发散量时空分异

根据上述方法,结合伪彩色对比拉伸技术,得到了研究区2个时相的 ET 分布图、IBI 增强图和 NDVI 增强图(图2),并对其进行了统计,见表1。

首先,从图2研究区的ET分布情况中可以看

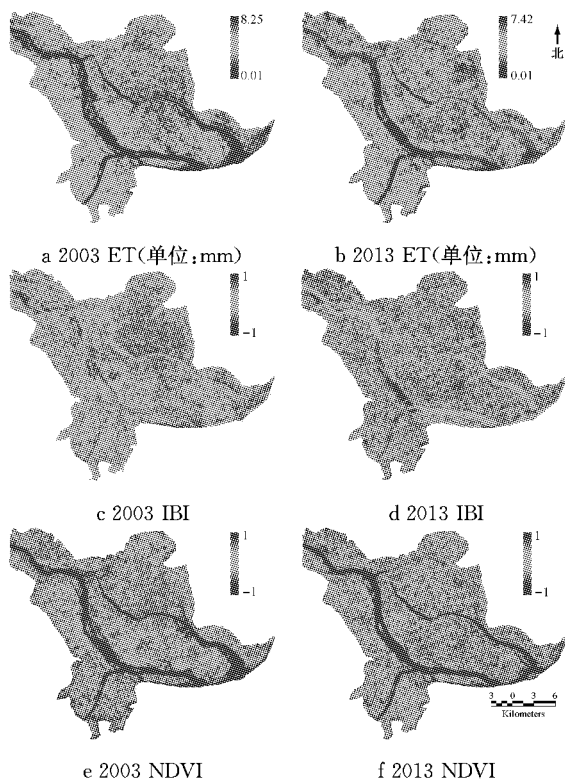


图 2 研究区日蒸发散量、建筑用地信息增强、植被信息增强专题图

Fig.2 Daily ET, IBI and NDVI images of the area under study

出,不同土地类型之间的日蒸发散量存在较大的差异,ET 的高值区明显地分布在研究区中的水体如闽江、乌龙江等处;研究区中有植被覆盖区域(即图 2e, f 的高值区,如城区内的草坪、郊区的农田等处)的 ET 明显高于周围无植被和少植被覆盖区;ET 的低值区分布在研究区中的工业用地、居住用地以及开发用地等处(即图 2c, d 的高值区),较蓝的色调与周围的水体和森林形成了鲜明的反差。

而对比研究区 2 个时相的 ET 分布(图 2a, b)可以得出,整体上 2013 年的 ET 比 2003 年有较大幅度的降低,ET 均值降幅达 30.62%;随着建筑用地的增加和植被的减少,这两种地类的 ET 均值均显著降低,降幅分别达到 42.06%和 14.75%。同 2003 年相比,2013 年 ET 的高值区仍然以城市中的水体和植被为主,分布范围和位置变化不大;而 ET 低值区则明显扩大,趋势为东向鼓山和马尾,南向南台岛和闽侯南通,西向闽侯上街和荆溪扩张,和福州城市化发展步调和范围极其相似。

为了具体查明研究区 2003~2013 这 10 年间 ET 的空间变化特点,进一步将 2 个时相的 ET 分布图作叠加分析,进行图像差值运算,制成日蒸发散量差值影像图(图 3)并计算出面积变化(表 2)。

表 1 研究区相关地类面积及 ET 变化表(2003~2013)

Tab.1 Area and ET changes of the area under study and land use types between 2003 and 2013

地表类型	面积/km <sup>2</sup>		变化值/km <sup>2</sup>	变化率/%	ET 均值/(mm·d <sup>-1</sup> )		变化值/(mm·d <sup>-1</sup> )	变化率/%
	2003	2013			2003	2013		
所有	521.30	521.30	0	0	5.29	3.67	-1.62	-30.62
建筑	66.41	109.83	43.42	65.38	3.78	2.19	-1.59	-42.06
植被	203.30	125.03	-78.27	-38.50	5.49	4.68	-0.81	-14.75

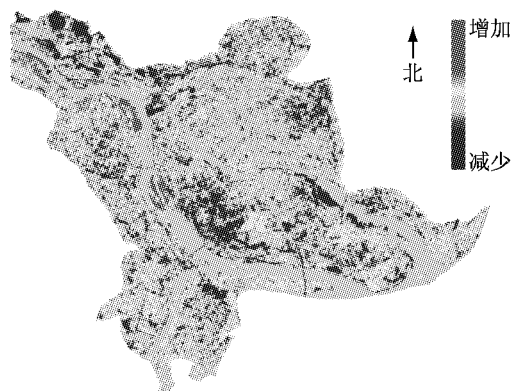


图 3 研究区日蒸发散量差值影像图(2003~2013 年)

Fig.3 Difference image of daily ET in the study area(2003~2013)

由图 3 中可以看出如下几个特点:①代表 ET 减少的泛蓝色调区域主要分布在福州主城区扩展范围及周边几个快速发展的新区内,如鼓山、金山、马

表 2 研究区日蒸发散量变化面积统计表(2003~2013 年)

Tab.2 Area change of daily ET in the area under study(2003~2013)

ET 变化趋势	面积/km <sup>2</sup>	百分比/%
增加	17.71	3.4
不变	209.56	40.2
减少	294.03	56.4
合计	521.30	100.0

尾等地区,表明在这些区域,2013 年的 ET 明显减少,面积合计为 294.03 km<sup>2</sup>,占研究区总面积的 56.4%;②代表 ET 增加的泛红色调区域主要分布在闽江两岸江滨路沿线以及乌龙江部分湿地,表明在这些区域,2013 年的 ET 有所增加,面积合计为 17.71 km<sup>2</sup>,占研究区总面积的 3.4%。

以上特征从福州典型区域的蒸发散量变化中可以更为明显地表现出来,图 4 为福州快安开发区的局部放大图,该区域在这 10 年间发展迅速,土地利

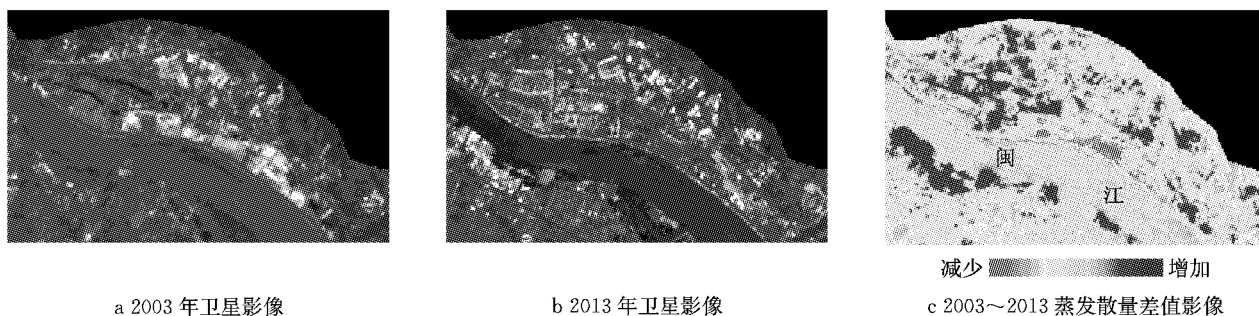


图4 典型蒸发散量变化区域  
Fig.4 Area showing typical ET change

用与覆盖变化较为明显。

由图4c可以看出:闽江南北岸均有成片泛蓝色区域,代表2013年的ET显著减少。从2003和2013年的卫星影像(图4a,b,均以标准假彩色表现)对比可知,北岸的蓝色区域,2003年的土地利用与覆盖类型以水田为主,至2013年已经完全开发成了房地产楼盘;而南岸的蓝色区域,则是在这10年间从水体、农田混合的地表覆盖类型被填江造地而成为了工业区。这种现象在城市化进程中并不少见,且伴随着城市扩展,越来越多的农用地和植被覆盖区被转换为建筑用地,造成城市蒸发散量进一步降低。

而在闽江北岸有部分呈条带状的泛红区以及与之相邻的面状红色区,代表此区域2013年的ET有所增加。从卫星影像对比可以看出,这主要得益于福州江滨东大道的道路绿化改造以及对应地块房地产楼盘绿化配套的完善。

### 3.2 福州城区日蒸发散量和相关生态要素之间的定量关系

为了考察研究区ET和建筑用地、植被覆盖之间的量化关系,判定植被和建筑用地对ET的影响程度,采用回归分析方法,在掩膜研究区水体之后,将ET与IBI和NDVI分别进行回归分析,重点判定建筑用地和植被覆盖对ET的影响程度。然后将ET作为因变量,IBI和NDVI作为自变量,进一步采用逐步回归的分析方法来综合查明这些相关城市生态要素的定量关系,考察它们对区域蒸发散量的综合效应。

由于各种参数存在数值、量纲上的不统一与差异,难于用其绝对值来直接进行比较,因此,本次研究将所涉及参数分别进行正规化处理,使它们统一到0~1之间,并进一步转换为百分率。影像采样使用5×5的网格间距,2003年共采样20269个,2013年21338个,较大的样本数目可以保证回归分析的客观性和可靠性。

回归计算过程先后选用了多种函数对上述参数进行拟合,结果表明,线性函数的拟合关系优于其他模型,因此选用线性模型作为组分间的最佳拟合方式。图5为研究区2个时相ET与IBI和NDVI的散点投影图,相应的线性回归方程列于表3(方程均通过了5%的显著性检验)。

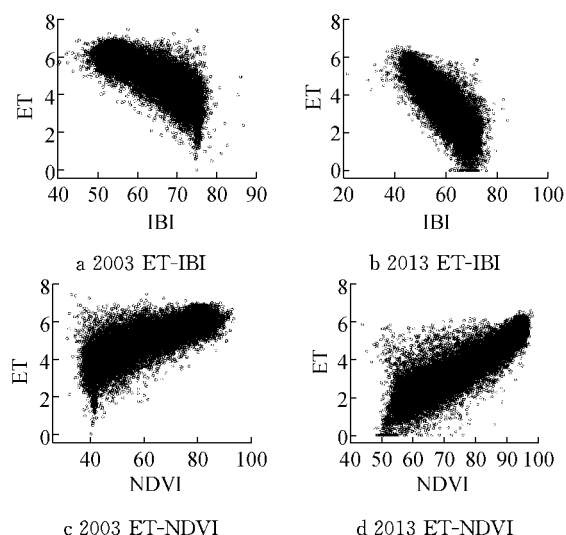


图5 ET与IBI,NDVI的散点投影图  
Fig.5 Scattering of ET, IBI and NDVI

表3 ET与IBI,NDVI之间的回归方程

Tab.3 Regression models between ET, IBI and NDVI		
年份	线性回归模型	r
2003	$E_d = -0.107 I_{BI} + 11.773$	-0.760
	$E_d = 0.052 I_{NDVI} + 1.738$	0.737
2013	$E_d = -0.136 I_{BI} + 11.458$	-0.806
	$E_d = 0.089 I_{NDVI} - 3.178$	0.831

注:方程均通过了5%的显著性检验。

从散点图和回归模型中可以看到,不论是2003年还是2013年,ET与IBI之间存在着较强的负相关关系( $r$ 值分别为-0.760和-0.806),说明建筑用地的增加会引起地表蒸发散量的减少,IBI值每增加0.1,ET就会降低1.07 mm(2003年)和1.36 mm(2013年)。反之,ET与NDVI之间存在着明显的正

相关关系( $r$ 值分别为 0.737 和 0.831),说明植被的增加有助于增加地表蒸发散量,NDVI 值每增加 0.1,地表蒸发散量就会增加 0.52 mm(2003 年)和 0.89 mm(2013 年)。

为了更直观地从三维的角度来考量它们之间的相互关系,做出了 ET,IBI 和 NDVI 三者所组成的三维特征空间散点图(图 6)。图 6a 反映了图 5a,c 的情况,图 6b 反映了图 5b,d 的情况。从图中可以发现,2003 年和 2013 年的特征空间散点都呈现出一种近似三角锥的形态,三角锥的顶端锥点区 A 以低建筑用地、高植被覆盖的绿地为主,因此 ET 值高;底端锥点区 B 以低植被覆盖的建筑用地为主,ET 值低。

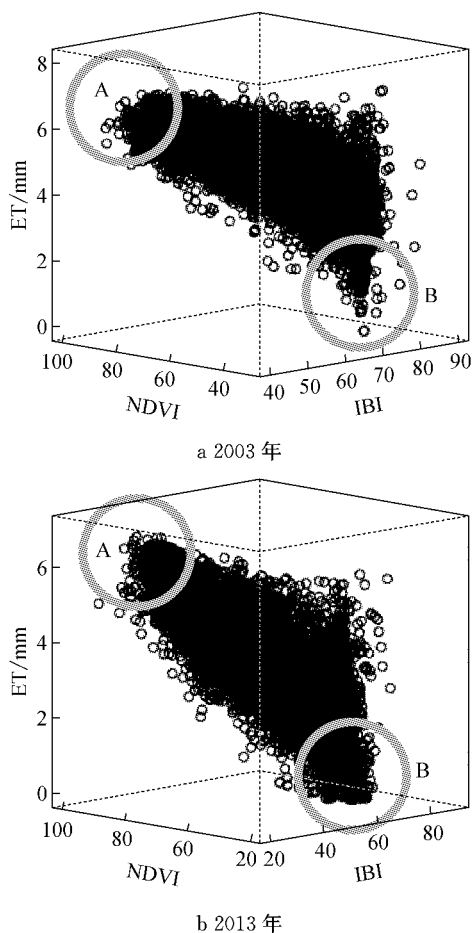


图 6 ET 与 IBI,NDVI 的三维特征空间散点图  
Fig.6 3D-scatterplots of ET, IBI and NDVI

接着,采用逐步回归的方式获得了如下两个年份的 ET 与 IBI,NDVI 的综合关系模型(均通过了 5% 的显著性检验):

2003 年

$$E_d = -0.076I_{\text{IBI}} + 0.017I_{\text{NDVI}} + 8.778, \\ r = 0.765 \quad (10)$$

2013 年

$$E_d = -0.055I_{\text{IBI}} + 0.058I_{\text{NDVI}} + 2.405, \\ r = 0.846 \quad (11)$$

从以上关系模型中可以看出:① 两个拟合公式的  $r$  值都大于 0.7,说明模型拟合效果较为理想;② IBI 和 NDVI 这两个自变量在 2 个时相的逐步回归中都通过了 5% 的显著性检验,说明两者都是影响区域蒸发散量的重要因子;③ 从模型的系数分析,研究区 2 个时相的 ET 变化都与建筑用地和植被覆盖有关,ET 随着 IBI 的增大而减小,却随着 NDVI 的增大而升高。2003 年,IBI 对 ET 的影响大于 NDVI;而在 2013 年,NDVI 对 ET 的影响大于 IBI。

综合上述二维、三维回归关系模型可以得出,日蒸发散量与城市建筑用地、植被之间的关系是相互作用和影响的。在植被覆盖区,由于植物的蒸腾(发)作用使得该区域的蒸发散量增加,而建筑用地密度大的区域,植被较为稀疏,植被覆盖率低,地表蒸发散量就相应较小。另外,以建筑用地为代表的硬化地表持水能力弱,径流系数增大,导致了城市降水迅速消失,从而减少了城市中用于蒸发散的水分,引起区域蒸发散量的明显变化。因此,有针对性地管理区域增加绿化,提高建成区绿地覆盖率,降低建筑物的分布密度,以改变下垫面的性质,可明显增加区域的地表蒸发散量。

## 4 结语

本文采用遥感空间信息技术,有效反演了城市区域蒸发散量,并结合建筑和植被信息等地表参数进行长时间、多因子分析,从二维、三维的不同角度刻画出它们之间的定量关系。研究发现了福州城区蒸发散量在近 10 年中降低了 30.62%,研究还进一步揭示了福州城区蒸发散量分布的分地带性规律及其与建筑用地、植被之间的定量关系。

遥感因子的多变量综合分析表明,建筑用地与植被都是造成城市蒸发散量变化的主要因子,区域蒸发散量与建筑用地面积成反比,与植被覆盖面积成正比。显然,快速城市化进程中人工建筑的增加,植被的消失,不透水面覆盖率的增大,地表持水能力的下降,都造成了城市中可用于蒸发的水分减少,植被蒸腾作用减弱,从而导致城市蒸发散量的显著减少。因此在城市规划和改造过程中,必须从整体上降低不透水面覆盖率,保证较高的绿地率,有针对性地增加老城区、CBD(中央商务区)等高建筑用地比例地区的植被覆盖,以增加城市区域蒸发散量,更好地

改善城市下垫面的热环境状态,促进城市的健康可持续发展。

### 参考文献:

- [1] Brown K W, Rosenberg H T. A resistance model to predict evapotranspiration and its application to a sugar beetfield [J]. *Agronomy Journal*, 1985, 65: 341.
- [2] Li A, Zhao W, Deng W. A Quantitative inspection on spatio-temporal variation of remote sensing-based estimates of land surface evapotranspiration in south asia [J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(4): 4726.
- [3] Wang S, Pan M, Mu Q, *et al.* Comparing evapotranspiration from eddy covariance measurements, water budgets, remote sensing, and land surface models over Canada [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2015, 16(4): 1540.
- [4] 矫京均, 辛晓洲, 余珊珊, 等. HJ-1 卫星数据估算地表能量平衡 [J]. *遥感学报*, 2014, 18(5): 1048.  
JIAO Jingjun, XIN Xiaozhou, YU Shanshan, *et al.* Estimation of surface energy balance from HJ-1 satellite data [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2014, 18(5): 1048.
- [5] 王鹏涛, 延军平, 蒋冲, 等. 华北平原参考作物蒸散量时空变化及其影响因素分析 [J]. *生态学报*, 2014, 34(19): 5589.  
WANG Pengtao, YAN Junping, JIANG Chong, *et al.* Spatial and temporal variations of reference crop evapotranspiration and its influencing factors in the North China Plain [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(19): 5589.
- [6] Xiong J, Wu B, Yan N, *et al.* Estimation and validation of land surface evaporation using remote sensing and meteorological data in north China [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2010, 3(3): 337.
- [7] Raghuveer K V, Eric F W, Craig R F, *et al.* Global estimates of evapotranspiration for climate studies using multi-sensor remote sensing data: Evaluation of three process-based approaches [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(3): 801.
- [8] French A N, Hunsaker D J, Thorp K R. Remote sensing of evapotranspiration over cotton using the TSEB and METRIC energy balance models [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 158: 281.
- [9] 徐涵秋. 基于城市地表参数变化的城市热岛效应分析 [J]. *生态学报*, 2011, 31(14): 3890.
- XU Hanqiu. Analysis on urban heat island effect based on the dynamics of urban surface biophysical descriptors [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(14): 3890.
- [10] Kleerekoper L, Esch M, Salcedo T B. How to make a city climate-proof, addressing the urban heat island effect resources [J]. *Conservation and Recycling*, 2012, 64: 30.
- [11] Coseo P, Larsen L. How factors of land use/land cover, building configuration, and adjacent heat sources and sinks explain urban heat islands in Chicago [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2014, 125: 117.
- [12] Barsi J A, Schott J R, Palluconi F D, *et al.* Validation of a web-based atmospheric correction tool for single thermal band instruments [C]//Earth observing systems X proc. San Diego: SPIE, 2005: 136-142.
- [13] Chander G, Markham B. Revised Landsat-5 TM radiometric calibration procedures and postcalibration dynamic ranges [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41(11): 2674.
- [14] Jr Chavez P S. Image-based atmospheric corrections-revisited and revisited [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1996, 62(9): 1025.
- [15] Bastiaanssen W G M, Menenti M, Feddes R A, *et al.* The surface energy balance algorithm for land (SEBAL): Part 1 formulation [J]. *Journal of Hydrology*, 1998, 212/213: 198.
- [16] Bastiaanssen W G M, Pelgrum H, Wang J, *et al.* The surface energy balance algorithm for land (SEBAL): Part 2 validation [J]. *Journal of Hydrology*, 1998, 212/213: 213.
- [17] Jackson R D, Hatfield J L, Reginato R J, *et al.* Estimation of daily evapotranspiration from one time-of-day measurement [J]. *Agriculture and Water Management*, 1983, 7(1/2/3): 351.
- [18] Zha Y, Gao J, Ni S. Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2003, 24(3): 583.
- [19] Xu H. A new index for delineating built-up land features in satellite imagery [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2008, 29(14): 4269.
- [20] Huete A R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI) [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1988, 25(3): 295.
- [21] Xu H. Modification of the normalized difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, 27(14): 3025.