

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2023.02.012

基于 Landsat 时间序列遥感影像的 合肥市 FVC 时空演化与分析

吴青云, 高飞, 李振轩, 车子杰

(合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要:文章基于 Landsat 时间序列遥感影像,采用像元二分模型反演合肥市 2008—2019 年植被覆盖度 (fractional vegetation cover, FVC), 并利用马尔可夫转移矩阵与差值图像算法,定量分析 2008—2019 年合肥市不同等级 FVC 变化特征。研究表明:2008 年、2011 年、2013 年、2015 年、2017 年、2019 年合肥市平均 FVC 分别为 60.9%、48.4%、56.0%、48.0%、63.0%、61.2%, 年均 FVC 波动较大,但总体呈上升趋势;合肥市 FVC 变化以稳定区为主,主城区的外围 FVC 出现退化趋势,而长丰县、主城区及庐江县 FVC 增长明显;各等级 FVC 总体变化趋势为良性,未来 FVC 预计以增加为主;2008—2019 年合肥市气温呈升高趋势,而降水量呈下降趋势,总体表现为“暖干化”,且这种趋势对合肥市 FVC 增加具有促进作用,其中年均气温是影响 FVC 演化的主要因子。

关键词:植被覆盖度(FVC);像元二分模型;时空变化特征;气象因子

中图分类号:P237 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2023)02-0221-08

Spatiotemporal evolution and analysis of fractional vegetation cover in Hefei City based on Landsat time series remote sensing images

WU Qingyun, GAO Fei, LI Zhenxuan, CHE Zijie

(School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: This paper inverses the fractional vegetation cover (FVC) in Hefei City from 2008 to 2019 using the dimidiated pixel model based on Landsat TM/ETM+/OLI remote sensing images. Then, the Markov transfer matrix and difference image algorithm are applied for quantitative analysis of the FVC change characteristics at different levels in Hefei City from 2008 to 2019. The results show that the average value of FVC in Hefei City in 2008, 2011, 2013, 2015, 2017 and 2019 is 60.9%, 48.4%, 56.0%, 48.0%, 63.0% and 61.2%, respectively. The annual average FVC fluctuates greatly, but the overall trend is on the rise; the change of FVC in Hefei City is mainly at the level of stable areas, the peripheral FVC of the main urban area has a trend of degradation, while those of Changfeng County, main urban area and Lujiang County increase significantly; the overall change trend of FVC at all levels in the study area is benign, and the FVC is expected to increase in the future; the temperature in Hefei City shows an upward trend from 2008 to 2019, while the precipitation shows a downward trend, with an overall performance of warming and drying. And this trend can promote the increase of FVC in Hefei City, in which the annual average temperature is the main factor affecting the evolution of FVC.

收稿日期:2021-03-16; **修回日期:**2022-09-20

基金项目:安徽省自然科学基金资助项目(2208085QD105);安徽省测绘科技专项资金资助项目(CHZX201801)和中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(JZ2021HGTA0167)

作者简介:吴青云(1994—),男,安徽芜湖人,合肥工业大学硕士生;

高飞(1962—),男,安徽天水人,合肥工业大学教授,博士生导师;

李振轩(1991—),男,山东汶上人,博士,合肥工业大学讲师,通信作者, E-mail: zxli2019@hfut.edu.cn.

Key words: fractional vegetation cover(FVC); dimidiate pixel model; spatiotemporal variation characteristic; meteorological factor

植被是陆地生态系统的重要组成部分,在能量流动、生态水文、生物化学循环等过程扮演重要角色,同时在防止水土流失、净化空气、维护生态环境稳定中起着重要作用^[1-2],尤其是在蒸发、蒸腾和光合作用等生物物理过程中起着至关重要的作用^[3-4],而植被覆盖度(fractional vegetation cover, FVC)是描述地表植被覆盖和生态系统特征的一个定量参数^[3-4]。

FVC 作为表征陆地地表生态环境的一个直观参数,能够对地表生态环境进行量化表示,通常定义为植被(包括叶、茎、枝)在地面的垂直投影面积占统计区总面积的百分比^[5-6]。FVC 研究始于 20 世纪 30 年代,目前国内外主要研究热点为 FVC 时空变化及生态环境因子与 FVC 空间分布格局的关系。文献[7]利用基于多种植被指数的像元二分法,评估南方丘陵区 FVC 的地形效应,研究发现,基于归一化差值山地植被指数(normalized difference mountain vegetation index, NDMVI)的像元二分模型能较好削弱地形效应;文献[8]利用无人机遥感技术,对卫星遥感技术反演 FVC 的真实可靠性进行研究,分析 4 种不同气象因子与 FVC 的关系,并在此基础上利用气象因子对研究区的 FVC 进行预测;文献[9]通过空间分析、数量变化分析、区域差异分析、流失流向分析,对山东省 FVC 现状及其动态变化进行研究分析;文献[10]分析 2001—2015 年中国陆地 FVC 时空变化特征,发现不同地区的 FVC 动态变化驱动因素不同;文献[11]对黄河上游年最大 FVC 进行反演,分析其空间分布及变化特征,并对空间分布的影响因素进行定量研究;文献[12]研究中国北方干旱半干旱区奥廷达格(Otindag)FVC,结果表明研究区 FVC 呈下降趋势,且降水是控制 FVC 总体分布格局的主要气象因子。

近年来,随着生态文明城市建设和智慧城市建设的推进,合肥市地表生态环境发生显著变化。本文基于 Landsat TM/ETM+/OLI 时间序列遥感影像数据,对合肥市 2008—2019 年 FVC 进行反演与变化分析。首先,利用基于归一化差值植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)的像元二分模型对合肥市 FVC 进行反演;然后采用差值算法和马尔可夫模型,分析研究区 FVC 时空变化特征;最后,结合气象因子,探究

年降水量与年均气温对合肥市 FVC 演变趋势的影响,从而为合肥市生态环境监测提供数据支持,为生态文明建设和经济社会发展提供科学依据。

1 研究区概况与数据处理方法

1.1 研究区概况

合肥市地处安徽中部,位于华东地区与长江三角洲西部,其地理位置为 $30^{\circ}57'N \sim 32^{\circ}32'N$, $116^{\circ}41'E \sim 117^{\circ}58'E$,总面积为 $11\,445.1\text{ km}^2$ 。合肥市行政区划与遥感影像如图 1 所示。其气候属亚热带季风性湿润气候,雨量适中,四季分明,年均降雨量 $800 \sim 1\,700\text{ mm}$,降雨主要集中在 5—7 月,占全年降雨量的 $20\% \sim 38\%$,年均气温 $15.7\text{ }^{\circ}\text{C}$,太阳辐射总量分布均匀,日照充足,年均日照时间为 $2\,000\text{ h}$ 。研究区地形多样,包含丘陵、平原、低山残丘 3 种地貌,且主要以丘陵岗地为主;处于江淮分水岭,地表水系较为发达,涵盖了长江水系(南淝河、丰乐河、滁河、白石天河等)和淮河水系(东淝河、沛河、池河等),境内巢湖是中国五大淡水湖之一。

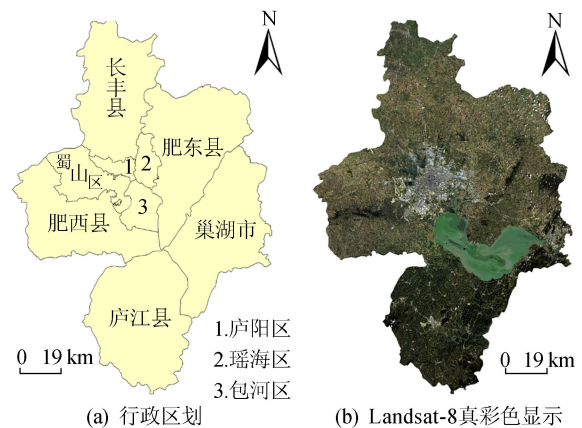


图 1 合肥市行政区划与遥感影像

1.2 遥感影像及数据处理

遥感影像数据选用覆盖合肥市域范围的 2008—2019 年 Landsat TM/ETM+/OLI 数据(<http://www.gscloud.cn>)。同时,为了避免由于植被生长季节性因素所导致的估算结果误差,研究时段选择合肥市植被生长茂盛季节。由于获取的影像已经过校正处理,影像预处理主要包含云及云影去除、辐射定标、大气校正(FLAASH 大气校正)、裁剪等。

植被覆盖对气象因素十分敏感,同时,北半球的 FVC 相比于 20 世纪增长趋势变缓,而气候的降水与气温变化是影响 FVC 变化的主要驱动力^[13-15],因此,本文选取年均气温与年降水量作为气象因子,研究其与 FVC 空间分布格局的联系。2008—2019 年合肥市年均气温与年降水量来源于中国气象数据共享服务网(<http://www.nmic.cn>)。

2 研究方法

本文采用 Landsat 数据集及合肥市矢量数据,对其预处理后获得合肥市地表真实反射率数据;然后进行掩膜处理,抑制水体信息对数据的影响,同时采用基于 NDVI 的像元二分法估算研究区的 FVC,通过差值算法^[16]及马尔可夫模型^[17]分析 FVC 的时空变化,并结合气象数据,定量评价 FVC 时空变化与气候的响应特征。

2.1 水体剔除

由于本研究所需的模型参数为纯净的植被与土壤,而研究区内巢湖水体面积较大,并且在研究时段常有蓝藻爆发,为了避免造成 FVC 估算误差,需要对研究区内水体(特别是含蓝藻水体)进行剔除。随着遥感技术的发展,各种快速提取水体信息的水体指数日益增多,但藻类中叶绿素的存在,含蓝藻水体具有与植被相似的光谱特征,而地物信息提取的物理基础是地物光谱特征,因此可能出现水体信息的误提取。水体、植被与含蓝藻水体地表反射率如图 2 所示。

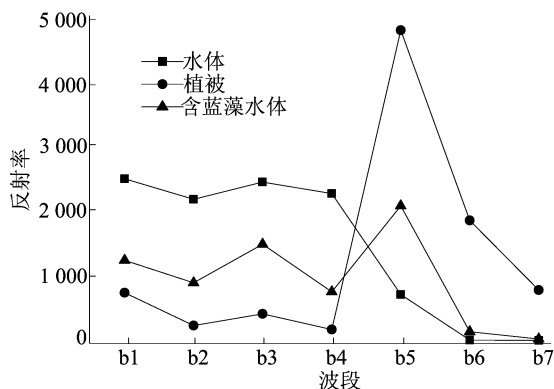


图2 水体、植被、含蓝藻水体平均反射率曲线

含蓝藻水体在绿光波段 b2 与近红外波段 b5 有明显的反射峰,在近红外波段,水体与含蓝藻水体的区别显著,并且这通常是验证水体中含有蓝藻的依据。水体与含蓝藻水体反射率在所选取波段应具有相似特性,由图 2 可知,水体与含蓝藻水

体在绿光波段 b3 的反射率要高于植被的反射率,同时,在中红外波段 b6 水体与含蓝藻水体的反射率接近于 0,此时植被反射率明显高于前两者,因此可以利用该特性将水体与含蓝藻水体完整提取出来。

文献[18]提出的改进的归一化差异水体指数(modified normalized difference water index, MNDWI)通过构建绿波段与中红外波段的模型能够很好地减少建筑物、阴影等因素对水体的影响,同时满足上述分析光谱特性,提取结果如图 3 所示,经多次实验,该模型能够将水体与含蓝藻水体快速完整剔除。因此,本文利用 MNDWI 对非水体区域进行提取。水体区域反射率 R_{MNDWI} 计算公式为:

$$R_{MNDWI} = (R_g - R_m) / (R_g + R_m) \quad (1)$$

其中, R_g 、 R_m 分别为绿光波段反射率与中红外波段反射率。

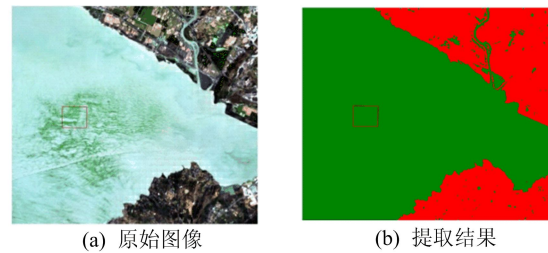


图3 基于 MNDWI 的非水体区域提取结果

2.2 基于像元二分模型的 FVC

像元二分模型形式简单且具有一定的物理意义,被广泛用于 FVC 估算。其基本原理为:假定与地表所对应的影像像元由植被与土壤 2 个部分组成,通过传感器所接受的信号 S 可以表达为植被成分所贡献信息 S_{veg} 与由土壤成分所贡献信息 S_{soil} 的线性组合^[19],其表达式为:

$$S = S_{soil} + S_{veg} \quad (2)$$

将 NDVI 应用于像元二分法,混合像元的 NDVI 值 I_{NDV} 为土壤与植被 2 种组分加权平均和,按照所占比例分析计算,进行等式变化可得 FVC 值 f_c 为:

$$f_c = \frac{I_{NDV} - I_{NDV}^{soil}}{I_{NDV}^{veg} - I_{NDV}^{soil}} \quad (3)$$

其中, I_{NDV}^{soil} 、 I_{NDV}^{veg} 分别为理想状态下与地表对应像元的裸土像元与纯植被覆盖像元的 NDVI 值。

理论上,纯净土壤、植被像元 NDVI 值应分别接近 0、1,但是往往由于土壤类型、植被类型、传感器观测角度、大气等因素的影响,NDVI 极值

并不一定是 I_{NDV}^{soil} 、 I_{NDV}^{veg} 。因此,在取值时选取置信度为 0.5%、99.5% 对应的 NDVI 值作为纯净土壤与纯净植被像元的 NDVI 值。在完成逐像元 f_c 计算后,为了分析时间序列的 FVC 变化及空间差异性,以研究区影像的 FVC 均值 F 作为研究区的 FVC,计算公式为:

$$F = \frac{1}{m \times n} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n f_{cij} \quad (4)$$

其中, f_{cij} 为第 i 行第 j 列像元 FVC。

为了更直观地反映合肥市不同区域 FVC 差异,对合肥市 FVC 进行分级处理,将计算得到的 FVC 分为 5 个等级,见表 1 所列。

表 1 FVC 分级结果

| F 取值范围 | 等级 |
|----------------------|------|
| $F < 10\%$ | 低覆盖 |
| $10\% \leq F < 30\%$ | 较低覆盖 |
| $30\% \leq F < 50\%$ | 中覆盖 |
| $50\% \leq F < 70\%$ | 较高覆盖 |
| $F \geq 70\%$ | 高覆盖 |

2.3 FVC 时空变化分析方法

在 FVC 反演的基础上,利用差值图像算法与马尔可夫模型对合肥市 2008—2019 年的 FVC 动态变化特征进行分析。差值图像算法能够总体反映合肥市 FVC 的动态变化趋势、大小及特征等,计算公式为:

$$\Delta f_c = f_{c,t} - f_{c,t-1} \quad (5)$$

其中: Δf_c 为 FVC 变化值; $f_{c,t}$ 、 $f_{c,t-1}$ 分别为第 t 期、第 $t-1$ 期合肥市 FVC 的栅格图像数据。本研究在此基础上进行密度分割,并将 FVC 动态变化分为 7 个等级,分别为:极显著减少(小于 -30%)、显著减少(-30%~ -20%)、弱显

著减少(-20%~ -10%)、稳定区(-10%~ 10%)、弱显著增加(10%~ 20%)、显著增加(20%~ 30%)、极显著增加(大于 30%)。

马尔可夫模型能够定量描述 FVC 动态变化等级之间相互转移的情况,对研究区 FVC 采用马尔可夫模型进行分析,得到转移矩阵 V_{pq} ,即

$$V_{pq} = \begin{bmatrix} v_{11} & \cdots & v_{1k} \\ \vdots & & \vdots \\ v_{k1} & \cdots & v_{kk} \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中: V_{pq} 为研究区前时期影像第 p 等级 FVC 与后时期第 q 等级 FVC 之间转化的面积; k 为 FVC 分级等级; p, q 取值为 1, 2, ..., 5。

2.4 FVC 气候响应特征分析方法

气象因子是影响地表植被生长的重要因素,分析气象因子对 FVC 时空变化的驱动作用,对于研究 FVC 演变特征及预测未来情景下的 FVC 具有重要意义^[10,20]。

本文基于偏相关分析将合肥市的各等级 FVC、平均 FVC 分别和年均气温、年降水量进行偏相关分析,偏相关系数计算公式为:

$$R_{xy,z} = \frac{r_{xy} - r_{xz}r_{yz}}{\sqrt{1-r_{xz}^2} \sqrt{1-r_{yz}^2}} \quad (7)$$

其中: $R_{xy,z}$ 为消除变量 z 的影响后,变量 x 与 y 进行偏相关分析的系数; r_{xy} 为变量 x 与 y 的简单相关系数; r_{xz} 为变量 x 与 z 的简单相关系数; r_{yz} 为变量 y 与 z 的简单相关系数。

3 结果分析

3.1 合肥市 FVC 时空分布及总体变化分析

2008—2019 年部分年份合肥市 FVC 均值随时间变化曲线、植被覆盖变化如图 4 所示。FVC 空间分布如图 5 所示。

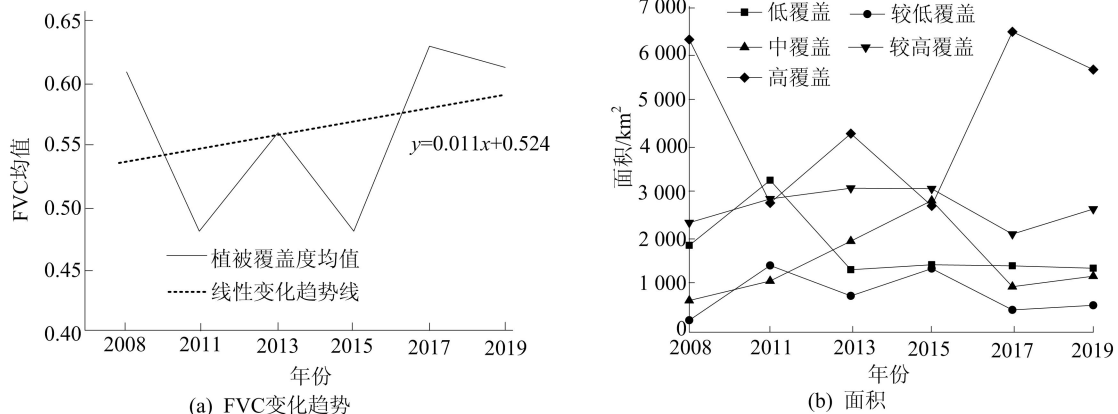


图 4 2008—2019 年部分年份合肥市 FVC 变化趋势及面积

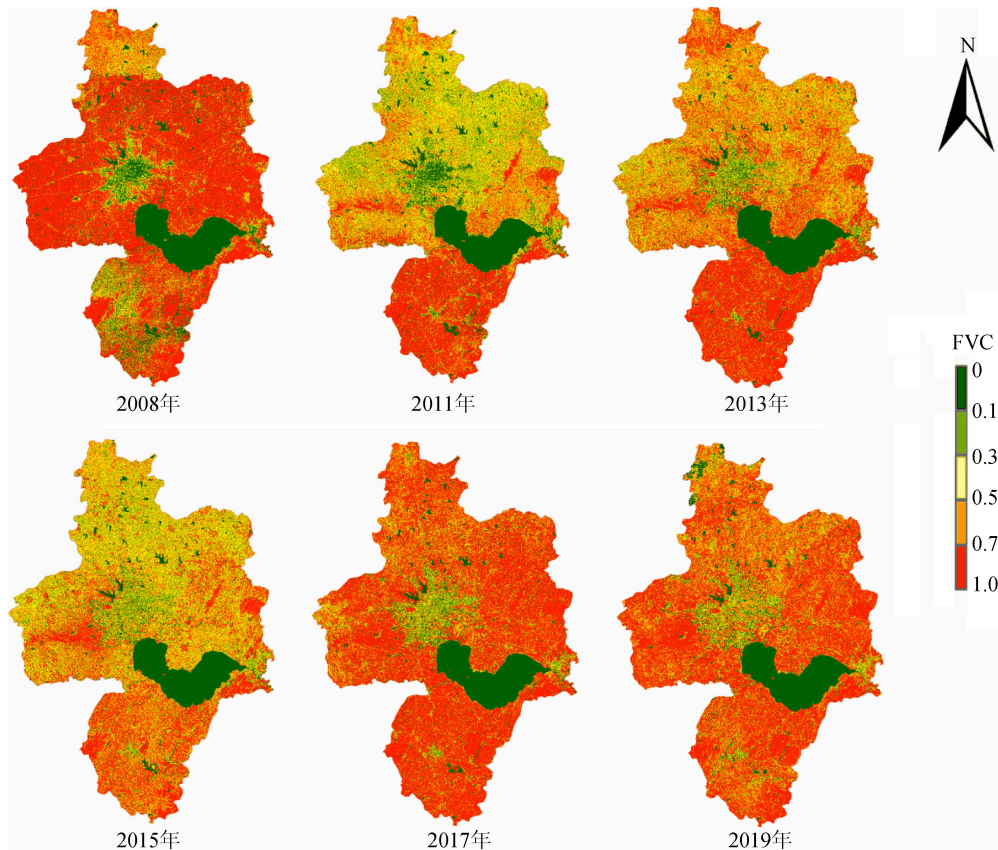


图5 2008—2019年部分年份合肥市 FVC 空间分布

由图 4a 可知,合肥市 FVC 均值在 2008 年、2017 年、2019 年接近 60%,而 2011 年、2015 年低于 50%。

整体而言,研究区 FVC 均值呈波动上升趋势,但是上升趋势线斜率仅为 0.010 9,变化不明显,总体表现为动态平衡。

通过对 f_c 进行统计与分类,得出合肥市 2008—2019 年部分年份各等级平均 FVC。合肥市 FVC 总体状况较好,以较高覆盖以上为主,占合肥市总面积 72%。

从图 4b 可以看出:2008—2011 年、2017—2019 年,合肥市均呈现高覆盖区面积减少,而其他覆盖区面积增加的趋势;2011—2017 年,低覆盖区面积先减少、然后变化保持平缓,较低覆盖区、较高覆盖区面积变化不大,而高覆盖区、中覆盖区面积波动较大。

从图 5 可以看出,合肥市植被覆盖与主城区有较强的空间相关性,高植被覆盖区主要分布在主城区南部、西部及东北部,而中部及巢湖市区以低、较低覆盖区为主。

2008—2019 年合肥市 FVC 估算结果显示,2011 年植被覆盖状况最差,低覆盖区面积占比最

大,主城区的低覆盖区面积明显增加,植被覆盖减少区在空间上表现为经济发展活跃区域,这与该时期的合肥市经济快速发展、城市发展中心向外围扩张有关,说明合肥市经济快速发展对高植被覆盖区产生较大影响;而 2017 年植被覆盖状况最好,低覆盖区面积占比最小,高覆盖区面积占比最大,年均 FVC 增长显著,说明合肥市生态环境得到有效改善。

总体而言,2008—2019 年间平均 FVC 处于中覆盖与较高覆盖之间,并且在空间上具有以合肥市主城区为中心,主城区 FVC 低、外围高的特点。主城区中植被覆盖较集中的区域为大蜀山森林公园,而全市内较高覆盖区主要分布在巢湖南部、紫蓬山、浮槎山、小蜀山及庐江等区域。

3.2 植被覆盖时空演变分析

为形象刻画植被覆盖时空变化特征,基于(5)式对 2 期影像进行差值运算,得到 2 个年份 FVC 变化情况。选择具有代表性的 2008 年、2013 年、2019 年的 FVC 数据,依次进行差值计算,结果如图 6 所示。

合肥市 2008—2019 年典型年份 FVC 变化分级结果见表 2 所列。

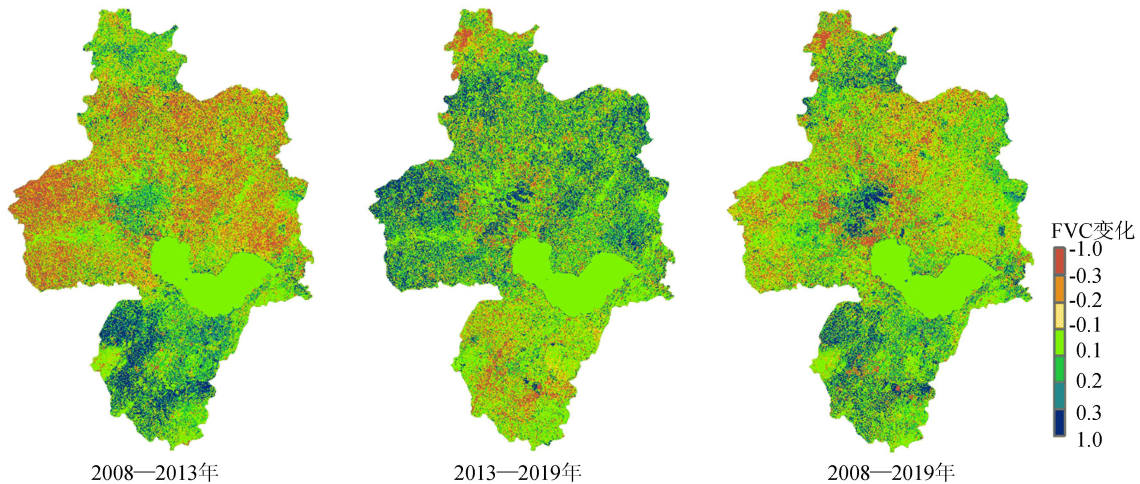


图 6 合肥市 2008—2019 年典型年份 FVC 时空变化分析结果

表 2 2008—2019 年典型年份合肥市 FVC 变化分级结果

| 动态变化等级 | 2008—2013 年 | | 2013—2019 年 | | 2008—2019 年 | |
|--------|--------------------|----------|--------------------|----------|--------------------|----------|
| | 面积/km ² | 占总面积比例/% | 面积/km ² | 占总面积比例/% | 面积/km ² | 占总面积比例/% |
| 极显著减少 | 2 054.06 | 17.95 | 929.57 | 8.12 | 1 209.40 | 10.57 |
| 显著减少 | 1 042.92 | 9.11 | 569.80 | 4.98 | 824.29 | 7.20 |
| 弱显著减少 | 1 426.04 | 12.46 | 1 065.79 | 9.31 | 1 400.78 | 12.24 |
| 稳定区 | 4 448.57 | 38.87 | 4 856.16 | 42.43 | 5 112.95 | 44.67 |
| 弱显著增加 | 998.10 | 8.72 | 1 403.62 | 12.26 | 1 235.63 | 10.80 |
| 显著增加 | 506.98 | 4.43 | 960.38 | 8.39 | 558.12 | 4.88 |
| 极显著增加 | 967.23 | 8.45 | 1 659.69 | 14.50 | 1 102.36 | 9.63 |

结合图 6、表 2 分析可知:合肥市植被覆盖变化以稳定区为主,并且稳定区多位于山地区域,此区域均具有较高 FVC;合肥城区、东北部、长丰县、庐江县的 FVC 改善状况较好。2008—2019 年合肥市 FVC 减少区域、稳定区域、增加区域的面积分别为 3 434.47、5 112.95、2 896.11 km²,占合肥市总面积比例分别为 30.01%、44.67%、25.30%。FVC 减少区与合肥市城区具有很强的空间相关性,主要表现为随着城市扩张及人类活动范围扩张,主城区外围的 FVC 都有一定程度的降低趋势。而长丰县、主城区及庐江县的 FVC 增长明显,这说明近年来政府大力支持人工造林、城市绿化及土地复耕和退耕效果显著。其中,2008—2013 年合肥市 FVC 以稳定区为主,极显著减少次之,分别占合肥市总面积的 38.87%、17.95%,且 FVC 减少区面积大于增加区面积;在空间分布上,除庐江县、巢湖市区及长丰县外,其他区域主要表现为减少趋势,说明在此期间合肥市 FVC 以变差为主。而 2013—2019 年合肥市 FVC 增加区面积为 4 023.69 km²,占全市发生变化区域的 61%,FVC 整体呈现改善趋势,尤其是在合肥市北部、西部与东北部最为明显。

通过分析转移矩阵可得 2 个时相、不同 FVC 之间相互转化的情况,合肥市 2008—2019 年典型年份不同等级 FVC 转移矩阵见表 3 所列。

(1) 研究区低覆盖区转出面积为 826.05 km²,转入面积 321.11 km²,其中转出到高覆盖区的面积占比最高,占低覆盖区转出面积的 41.1%,为 340.83 km²,而转入到低覆盖区最多的为高覆盖区,面积为 154.85 km²;总体而言,低覆盖区面积在减少,且低覆盖区转到高覆盖区面积大于转入面积,这在一定程度上说明合肥市的植被生长状况有所改善。

(2) 较低覆盖区转出面积为 186.48 km²,转入面积为 498.83 km²。较低覆盖区主要转出到中覆盖区,说明研究区较低覆盖区变化趋势是良性的。

(3) 中覆盖区的转出面积为 516.36 km²,转入面积为 1 037.80 km²,中覆盖区的面积有所增加,且主要由较高覆盖区转入,面积为 343.88 km²。在转出部分中,转为高覆盖区的占比最高,达到转出面积的 42%,但由于中覆盖区的面积较小,仅为 217.63 km²,因此,总体而言,中覆盖区的植被变化趋势是消极的。

(4) 较高覆盖区转出面积为 1 560.71 km²,

转入面积为 1 881.84 km²,其中较高覆盖区转出到高覆盖区面积比例为 64.03%,表明研究区的较高覆盖区 FVC 有增长趋势。

(5) 高覆盖区转出面积为 2 245.28 km²,转入面积为 1 595.39 km²,高覆盖区的面积在减少,且主要转出到较高覆盖区,占高覆盖区转出面积的 63.3%,面积为 1 421.96 km²。而较高覆盖区

是高覆盖区转入面积的主要来源,占高覆盖区转入面积的 62.6%,面积为 999.01 km²。高覆盖区转出面积大于转入面积,因此,研究区的高覆盖区植被演变过程主要是与较高覆盖区的相互转化,总体呈高覆盖区退化为较高覆盖区的趋势。

综合上述分析,合肥市 FVC 变化总体呈良性趋势,预计未来以增加为主。

表 3 合肥市 2008—2019 年典型年份不同等级 FVC 转移矩阵

| 植被覆盖等级 | 低覆盖 | | 较低覆盖 | | 中覆盖 | | 较高覆盖 | | 高覆盖 | |
|--------|--------------------|-------|--------------------|-------|--------------------|-------|--------------------|-------|--------------------|-------|
| | 面积/km ² | 占比/% | 面积/km ² | 占比/% | 面积/km ² | 占比/% | 面积/km ² | 占比/% | 面积/km ² | 占比/% |
| 低覆盖 | 1 040.41 | 55.70 | 30.52 | 12.02 | 42.49 | 6.48 | 93.25 | 4.11 | 154.85 | 2.42 |
| 较低覆盖 | 96.13 | 5.15 | 67.53 | 26.59 | 83.91 | 12.80 | 124.21 | 5.48 | 194.44 | 3.04 |
| 中覆盖 | 157.14 | 8.41 | 62.84 | 24.74 | 139.01 | 21.21 | 343.78 | 15.16 | 473.78 | 7.40 |
| 较高覆盖 | 231.95 | 12.42 | 55.61 | 21.90 | 172.18 | 26.27 | 706.26 | 31.15 | 1 421.54 | 22.21 |
| 高覆盖 | 340.83 | 18.15 | 37.45 | 14.75 | 217.63 | 33.21 | 999.01 | 44.06 | 4 153.39 | 64.89 |

注:占比为占总面积比例。

3.3 植被覆盖变化与气候的响应

2008—2019 年部分年份合肥市年降水量与年均气温的年变化如图 7 所示。

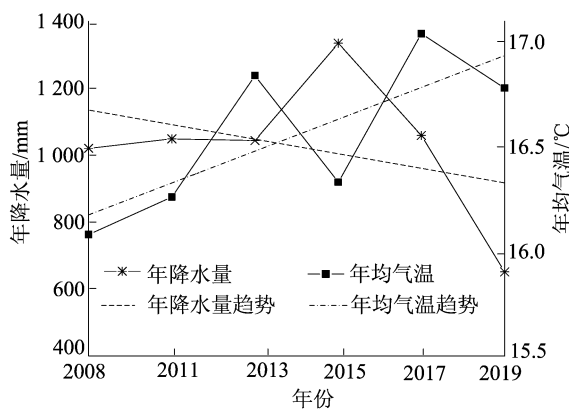


图 7 2008—2019 年部分年份合肥市降水量与平均气温变化

由图 7 可知:合肥市 2008—2019 年降水量年际变化在 2008—2013 年较平稳,2013—2019 年变化幅度较大,总体呈降低趋势,多年平均降水量为 1 026.1 mm;而 2008—2019 年的年均气温总体呈波动上升趋势,多年平均气温为 16.56 °C,除 2015 年、2019 年有下降趋势外,其余年份均为升温,在 2017 年达到年均气温最高值(17.04 °C)。

年均气温、年降水量与 FVC 偏相关性分析结果见表 4 所列。由表 4 可知:合肥市年均 FVC 与年均气温、年降水量均有一定的相关性,且年均气温与年均 FVC 呈正相关,相关系数为 0.389,而年均降水量与年均 FVC 呈负相关,相关系数为 -0.520;合肥市各覆盖等级与年均气温大多为负相关,只有高覆盖区与气温呈正相关,而合肥市各覆盖等级与年降水量大多为正相关,只有高覆盖区与年降水量呈负相关。造成这种相关性差异的原因,可能是由于研究区高覆盖区主要分布在山地或湿地公园等区域,随着温度升高,此区域的积温会增加,因而能改善 FVC,而在 FVC 相对较低区域,温度升高会增加水分的蒸腾,但随着年降雨量减少会使区域水量不足,影响 FVC 的演变。此外,各等级植被覆盖面积随着时间推移,植被覆盖从低到高与年均气温正向相关程度逐渐提高,而与降水量负相关程度逐渐增加,表明气温的升高对合肥市植被生长有促进作用,而年降雨量的变化对 FVC 演变具有抑制作用,并且气温是影响 FVC 的主要因素。

总体而言,合肥市在 2008—2019 年气候变化趋势呈现“暖干化”,而该趋势对研究区的植被生长有促进作用。

表 4 年均气温、年降水量与 FVC 相关系数

| 变量 | 低覆盖 | 较低覆盖 | 中覆盖 | 较高覆盖 | 高覆盖 | 年均 FVC |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 年均气温 | -0.422 | -0.153 | -0.106 | -0.122 | 0.286 | 0.389 |
| 年降水量 | 0.489 | 0.475 | 0.503 | 0.220 | -0.463 | -0.520 |

4 结 论

(1) 研究区 FVC 整体状况较好,在空间上具有以合肥市主城区为中心,主城区的 FVC 低、外围高的特点。2008—2019 年合肥市植被覆盖具有先降后升的规律,总体呈波动上升趋势。

(2) 合肥市 FVC 变化以稳定区为主,同时 FVC 减少区与合肥市城区具有很强的空间相关性,主要表现为随着城市扩张及人类活动范围的增大,主城区的外围 FVC 出现退化趋势,而长丰县、主城区及庐江县 FVC 增长明显,这说明近年来政府大力支持人工造林、城市绿化及土地复耕和退耕效果显著。

(3) 自 2008—2019 年以来,研究区植被覆盖以较高覆盖为主,各等级 FVC 总体变化趋势为良性,而高覆盖区 FVC 主要以减少为主,且高覆盖区主要表现为退化成较高覆盖区,预计未来 FVC 以增加为主。

(4) 通过研究区 FVC 与气候的响应分析发现:合肥市 2008—2019 年气温呈显著上升趋势,而年降水量具有下降趋势,合肥市的气候演变总体具有“暖干化”趋势;年均气温与年均 FVC 演变具有很好的正相关性,除高覆盖区外,与其他等级的覆盖区均为负相关,且随着 FVC 等级降低,负相关程度增加;而相比于年均气温对 FVC 的影响,年降水量与研究区 FVC 的相关性较弱。

参 考 文 献

- [1] FENG L L, JIA Z Q, LI Q X, et al. Spatiotemporal change of sparse vegetation coverage in northern China[J]. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 2019, 47(2): 359-366.
- [2] SCHLESINGER W H, PILMANIS A M. Plant-soil interactions in deserts[M]//VON BREEMEN N. Plant-induced soil changes: processes and feedbacks. [S. l.]: Springer-Science+Business Media, B. V., 1998: 169-187.
- [3] 贾坤,姚云军,魏香琴,等. 植被覆盖度遥感估算研究进展[J]. *地球科学进展*, 2013, 28(7): 774-782.
- [4] HIZUKA K, KATO T, SILSIGIA S, et al. Estimating and examining the sensitivity of different vegetation indices to fractions of vegetation cover at different scaling grids for early stage Acacia plantation forests using a fixed-wing UAS[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(15): 1816.
- [5] GITELSON A A, KAUFMAN Y J, STARK R, et al. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 80(1): 76-87.
- [6] 梁顺林,白瑞,陈晓娜,等. 2019 年中国陆表定量遥感发展综述[J]. *遥感学报*, 2020, 24(6): 618-671.
- [7] 吴志杰,何国金,黄绍霖,等. 南方丘陵区植被覆盖度遥感估算的地形效应评估[J]. *遥感学报*, 2017, 21(1): 159-167.
- [8] TANG L, HE M Z, LI X R. Verification of fractional vegetation coverage and NDVI of desert vegetation via UAVRS technology[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(11): 1742.
- [9] 田贵全,曲凯. 遥感和 GIS 支持下的山东省植被覆盖动态变化分析[J]. *水土保持研究*, 2008, 15(1): 75-78.
- [10] 赵明伟,王妮,施慧慧,等. 2001—2015 年间我国陆地植被覆盖度时空变化及驱动力分析[J]. *干旱区地理*, 2019, 42(2): 324-331.
- [11] 裴志林,杨勤科,王春梅,等. 黄河上游植被覆盖度空间分布特征及其影响因素[J]. *干旱区研究*, 2019, 36(3): 546-555.
- [12] WANG H, YAO F, ZHU H S, et al. Spatiotemporal variation of vegetation coverage and its response to climate factors and human activities in arid and semi-arid areas: case study of the Otindag Sandy Land in China[J]. *Sustainability*, 2020, 12(12): 5214.
- [13] PARK H S, SOHN B J. Recent trends in changes of vegetation over East Asia coupled with temperature and rainfall variations[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115: D14101.
- [14] LARSON C. 'Third Pole' glacier research gets a boost from China[J]. *Science*, 2011, 334(6060): 1199.
- [15] PIAO S L, WANG X H, CIAIS P, et al. Changes in satellite-derived vegetation growth trend in temperate and boreal Eurasia from 1982 to 2006[J]. *Global Change Biology*, 2011, 17(10): 3228-3239.
- [16] 范海生,马嵩乃,李京. 采用图像差值法提取土地利用变化信息方法:以攀枝花仁和区为例[J]. *遥感学报*, 2001, 5(1): 75-80.
- [17] 解修平,周杰,张海龙,等. 基于景观生态和马尔可夫过程的西安地区土地利用变化分析[J]. *资源科学*, 2006, 28(6): 175-181.
- [18] 徐涵秋. 利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究[J]. *遥感学报*, 2005, 9(5): 589-595.
- [19] 李苗苗,吴炳方,颜长珍,等. 密云水库上游植被覆盖度的遥感估算[J]. *资源科学*, 2004, 26(4): 153-159.
- [20] BACHELET D, NEILSON R P, LENIHAN J M, et al. Climate change effects on vegetation distribution and carbon budget in the United States[J]. *Ecosystems*, 2001, 4(3): 164-185.

(责任编辑 张淑艳)