

巢湖流域地表热环境与景观变化相关分析及其尺度效应

黄木易¹, 岳文泽^{2*}, 何翔¹ (1.安徽建筑大学环境与能源工程学院, 安徽 合肥 230601; 2.浙江大学土地管理系, 浙江 杭州 310058)

摘要: 基于 Landsat ETM+/TIRS 影像数据, 采用大气校正法反演巢湖流域地表温度, 分析 2000~2013 年的流域地表热环境效应演变规律, 通过 5 个尺度的网格化采样, 在不同幅度水平上定量分析 LST 与下垫面景观的相关性及其尺度效应。结果表明: 2000~2013 年, 巢湖流域 LST 高强度区域主要以合肥市区为集聚中心并向城市周边蔓延, 低强度区域逐渐缩小, 流域地表热环境效应增强。LST 与下垫面景观结构相关关系分析表明, 建设用地景观是流域热环境效应的主要原因, 而水体、林地景观可有效抑制地表温度; 景观格局对热环境效应影响显著, 建设用地与农地景观的破碎度、分离度指数与 LST 呈极显著负相关, 而林地、水体景观的破碎度和分离度与 LST 呈极显著正相关; LST 对景观优势度的影响最敏感, 建设用地优势度与 LST 呈极显著正相关, 而林地、水体优势度增加则能有效降低地表温度。探索性空间数据分析(ESDA)及尺度效应分析表明: 巢湖流域地表热环境具有显著的空间聚集性, 且 LST 空间格局具有明显的尺度效应, 巢湖流域地表热环境效应相关研究的适宜幅度域为 2~4km。通过合理规划配置林地和水体景观类型资源, 加强建设用地增长调控, 优化景观格局是抑制流域地表热环境效应的主要对策。

关键词: 地表热环境; 景观格局; 相关分析; 尺度效应; 巢湖流域

中图分类号: X87 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2017)08-3123-11

Correlation analysis between land surface thermal environment and landscape change and its scale effect in Chaohu Basin. HUANG Mu-yi¹, YUE Wen-ze^{2*}, HE Xiang¹ (1.Department of Environmental Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China; 2.Department of Land Management, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China). *China Environmental Science*, 2017,37(8): 3123~3133

Abstract: Based on the Landsat ETM+/TIRS image data, the inversion of Land surface temperature (LST) were conducted by using atmospheric correction method, and the evolution of land surface thermal environment effect was analyzed from 2000 to 2013 in Chaohu Basin. Cell samples at five scales level were obtained through gridding method, the scale effect of LST and its correlations with the surface landscapes were further quantitatively analyzed at specified scales. The results showed that high LST area was mainly concentrated in Hefei city and spread to its peripheries, while low LST area shrank gradually due to turning into moderate LST area from 2000 to 2013 in Chaohu Basin. As a result, the land surface thermal environment effect was enhanced. The correlation analysis between LST and landscape structure indicated that the construction land landscape was the main reason for the land surface thermal environment effect in the basin, while water and woodland landscapes could restrain LST effectively. The influence of landscape pattern on land surface thermal environment effect was significant. The analysis of correlations indicated that strong significant negative correlations were observed between the fragmentation and separation indices of construction and rural land landscapes and LST, but there was significant positive correlation between the fragmentation and separation indices of woodland and water landscapes and LST. LST is most sensitive to the change of landscape dominance index. The dominance index of construction land was significantly positively correlated with LST, while increasing the dominance of woodland and water could significantly reduce the surface temperature. Analysis of the scale effect and Exploratory Spatial Data Analysis (ESDA) for LST indicated that the LST had a significant spatial clustering characteristic in Chaohu Basin, and that the spatial pattern of LST had an obvious scale effect. 2~4km was the suitable extent of the researches on land surface

收稿日期: 2017-01-22

基金项目: 国家社会科学基金重点项目(14AZD124); 国家自然科学基金项目(41671533)和中央高校基本科研业务费资助; 安徽省哲学社会科学规划项目(AHSKQ2016D23)

* 责任作者, 教授, wzyue@zju.edu.cn

thermal environment in Chaohu Basin. Countermeasures derived from the study for restraining the surface thermal environment in Chaohu Basin included: allocating ecological functional landscape resources, such as woodland and water landscapes, reasonably through planning; strengthening regulations on the growth of construction land; and finally optimizing the landscape pattern.

Key words: surface thermal environment; landscape pattern; correlation analysis; scale effect; Chaohu Basin

自 Howard 首次发现伦敦城市与郊区存在温差的“热岛效应”(Urban Heat Island, UHI)以来,城市热岛现象受到了广泛关注^[1-2].多年来,国内外学者对城市热岛的表现形态、演变模拟、驱动机制^[3-11]等开展了大量研究,取得了丰硕的成果.研究表明,土地利用及植被覆盖变化是大气、水质等生态环境变化的主要因素^[12-14],同时也是地表热环境效应形成、演变的重要原因^[15].由于土地利用类型的物理特性、热学特征、辐射特征差异,会导致不同的地表热环境效应.如由水泥结构为主的建筑物、道路等城市不透水面显热通量大导致地表温度相对较高,是热岛效应的主要原因,而绿地、水体等由于潜热通量贡献大,导致地表温度相对较低,具有抑制热岛效应的功能^[16-17].因此,随着城市的快速扩张,热岛效应随下垫面地类性质的变化而变化.相关研究也表明,热岛效应与景观格局关系密切,基于遥感和 GIS 的地表热环境与景观要素间相互关系的研究为目前该领域热点.相关研究从早期对单一景观类型的作用发展到关注景观整体格局对城市热岛效应的影响^[18-21].但总的来说,城市地表的热岛效应研究颇多,而在流域层次上开展地表热环境效应的研究不多.其次,相关研究主要关注其特点与成因,而对其影响因素及作用机理的研究相对薄弱^[22].另外,多数研究从单一尺度上划分空间单元以建立热岛效应与景观变化的分析样本,基于多种尺度的研究案例缺乏.尺度问题是景观生态学的核心问题^[23],景观格局与地表热环境的关系研究需要关注尺度对生态机制的影响.因此,在作为社会、经济热点区域的流域层面开展地表热环境与景观变化相关关系及其尺度效应综合研究,揭示流域地表热环境影响因素和生态学机制具有重要的理论与实践意义.

巢湖流域作为长江流域的重要组成部分,该区域人口密度大、经济发达,是人类活动的热

点区域.近年来,高速城市化和工业化推动社会经济发展的同时,对流域景观格局产生了强烈影响^[24],流域生态系统受到显著干扰,区域生态环境质量也在不断恶化^[25-26],而以合肥为核心的特大城市建成区的快速扩张所导致的不透水面增加对流域地表温度的影响也越来越显著,在一定程度上影响流域生态系统的结构和功能.目前,巢湖流域景观格局、土地覆被变化、水质污染防治等引起相关学者的关注,流域景观格局与地表热环境效应的相关性研究主要以流域单个城市为对象,分析城市热岛强度的时空变化^[27-29],关于流域下垫面景观结构、格局与热环境的相关分析、尺度效应及生态机制研究鲜有报道.本研究遵循景观生态学研究范式,基于空间信息技术平台及地统计分析等方法,详细探讨了巢湖流域景观结构与格局变化对热环境效应的影响,并对巢湖流域热环境效应的尺度问题展开讨论,提出了流域热环境相关研究的适宜幅度域.结果在一定程度上可为巢湖流域规划、景观资源配置与生态系统优化、热环境效应管控措施制定等提供决策理论依据.

1 研究区概况

巢湖 (31°43'~32°25'N, 117°16'~117°51'E) 流域位于安徽省中部,长江流域下游,行政区划涉及 11 县及合肥市辖区、六安市辖区和巢湖市辖区.流域总面积约 14000 km².地势南高北低,西南为山区,东北为丘陵及浅山区,沿湖及东南为平原.巢湖周围共有大小入湖河流 33 条^[30].研究区所在位置见图 1.2000 年巢湖流域总人口约 779 万人,流域 GDP 为 481.5 亿,镇化率为 44%.2013 年流域人口数为 1300 万人左右,生产总值达 5578.4 亿,城镇化提高至 67.8%.合肥市作为省会城市,是巢湖流域的核心区域,是全省乃至整个中部地区崛起的重要经济引擎.

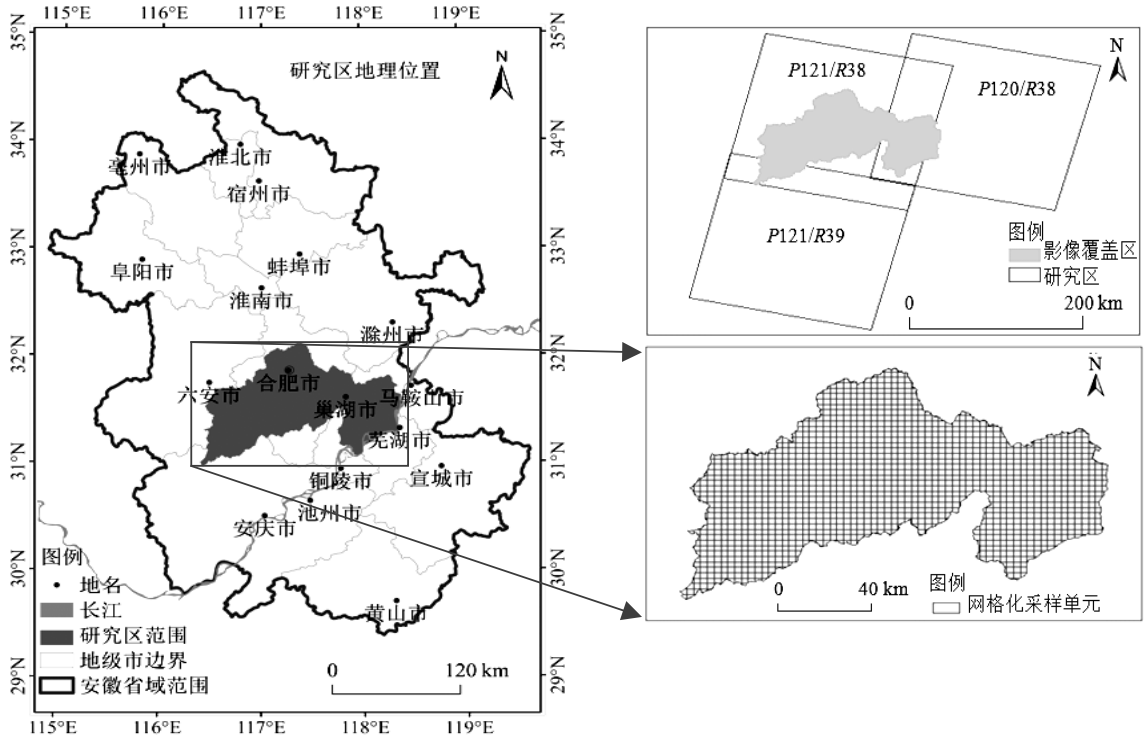


图1 研究区位置及流域网格化采样单元

Fig.1 Location of Chaohu Basin and map of cell samples

2 研究数据与方法

2.1 数据来源及处理

本研究利用3期Landsat ETM+/TIRS卫星影像数据(其中2000、2005年为4月份ETM+,2013年为9月份TIRS,3个时相的9景影像成像清晰少云、质量良好,采用UTM投影统一到WGS-84坐标系)和DEM数据(格式为GRID的SRTM数字高程数据,来源于美国对地观测全球高程数据,分辨率90m).首先利用ArcGIS 10.0水文分析模块对DEM进行巢湖流域范围提取.其次,利用ENVI 5.1对3期遥感影像(轨道号分别为120/038、121/038、121/039)进行几何纠正、拼接、直方图匹配等图像预处理.最后,利用提取的巢湖流域范围对拼接处理后的遥感影像进行裁剪,并对影像进行解译,结合流域的景观特点,将研究区分为农地、林地、水体、建设用地4种景观类型.对3期遥感影像的分类结果进行精度检验,其Kappa系数均在0.75以上,符合研究要求.

另外,利用ArcGIS 10.0创建渔网工具对提取的流域范围进行不同幅度的空间采样,创建1km×1km、2km×2km、3km×3km、4km×4km和5km×5km的尺度单元,形成5种不同幅度的尺度变化.利用网格叠加解译后的景观分类图、地表温度反演图,逐一计算各网格内的景观格局指数和地表温度平均值.

2.2 景观类型提取及指数计算

景观格局指数用来量化景观生态结构、功能与过程^[31].本文除基于景观结构外,还讨论景观格局变化对流域地表热环境影响及尺度效应.从景观斑块的破碎化、分离程度、连通性、优势斑块控制景观程度等角度探讨流域地表温度与下垫面格局的相关性研究,有助于更好地理解景观生态学过程.因此,本文选择了破碎度、分离度和优势度景观格局指数.其中,破碎度指数(C),反映某一景观类型被分割的破碎程度;分离度指数(F),反映某一景观类型中的斑块之间在空间上的分离程度;优势度指数(D),主要用来表达景观类型

中一种或几种类型控制整个区域内景观类型的程度.限于篇幅,各景观指数计算公式详见 Fragstats 3.3 和文献[31].由于不同幅度水平下的网格单元样本数量大,本文在 Arcgis10.0 中利用 Model Builder 建模后批量计算网格景观格局指数.

2.3 地表热环境信息反演

对于流域景观尺度的研究,Landsat 系列卫星数据适用性较强,进行温度反演时也多使用 TM/ETM+/OLI_TIRS 影像.本研究基于大气校正法^[32],利用 Landsat 影像反演地表温度.基本原理为,首先估计大气对地表热辐射的影响,然后将此部分影响从卫星传感器所观测到的热辐射总量中去除,将得到的地表热辐射强度再转化为相应的地表温度.卫星传感器接收到的热红外辐射亮度值 L_λ 由 3 部分组成:大气向上辐射亮度 $L_\uparrow$;地面的真实辐射亮度经过大气层之后到达卫星传感器的能量;大气向下辐射到达地面后反射的能量 $L_\downarrow$.因此,卫星传感器接收到的热红外辐射亮度值 L_λ 的表达式可写为:

$$L_\lambda = [\varepsilon B(T_s) + (1 - \varepsilon)L_\downarrow] \tau + L_\uparrow \quad (1)$$

式中: ε 为地表比辐射率; T_s 为地表真实温度, K; $B(T_s)$ 为黑体热辐射亮度; τ 为大气在热红外波段的透过率.则温度为 T 的黑体在热红外波段的辐射亮度 $B(T_s)$ 为:

$$B(T_s) = [L_\lambda - L_\uparrow - \tau(1 - \varepsilon)L_\downarrow] / \tau\varepsilon \quad (2)$$

$$T_s = K_2 / \ln(K_1 / B(T_s) + 1) \quad (3)$$

式中:对于 TM, $K_1=606.76\text{mW}/(\text{cm}^2\cdot\mu\text{m}\cdot\text{sr})$, $K_2=1260.56\text{K}$;对于 ETM+, $K_1=666.09\text{mW}/(\text{cm}^2\cdot\mu\text{m}\cdot\text{sr})$, $K_2=1282.71\text{K}$;对于 TIRS Band10, $K_1=774.89\text{mW}/(\text{cm}^2\cdot\mu\text{m}\cdot\text{sr})$, $K_2=1321.08\text{K}$.其中,大气剖面参数在 NASA 提供的网站(<http://atmcorr.gsfc.nasa.gov/>)中,输入成像时间以及中心经纬度可以获取大气剖面参数.利用影像及大气剖面数据,依据大气校正法的温度反演方法,使用 ENVI5.1 中的 Band Math 工具、NDVI 工具和 Radiometric Calibration 等工具计算出 3 个时相各景影像的地表温度.

3 结果与分析

3.1 巢湖流域地表温度(LST)空间分布特征

常用的温度等级划分方法有自然断点法、温度正规化法、均值-标准差法等.本文采用均值-标准差法,将研究区地表温度(LST)的平均值作为基准,通过与不同倍数标准差进行组合来区分阈值,对流域 LST 等级进行划分,该方法能够在一定程度上减小背景差异影响,使不同时相的地表温度数据更具可比性^[33],依据该法将各年份流域 LST 划为 5 个温区,即低、次低、中、次高和高温区(图 2).

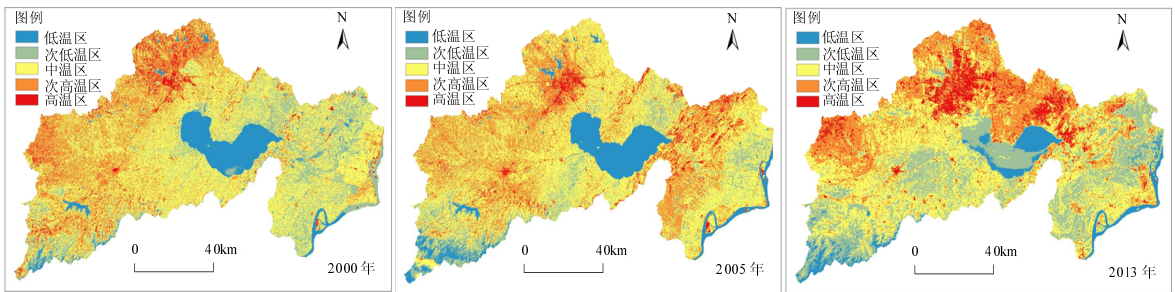


图 2 巢湖流域 2000 至 2013 年地表温度空间分布特征

Fig.2 The spatial characteristic of LST from 2000 to 2013 in Chaohu Basin

分析表明,2000~2013 年间,随城市化和工业化的推动,巢湖流域地表热环境空间格局发生了相应的变化,其时空差异特征明显.其中,2000 年的地表热场主要以中温及以下为主,高温区范围

很小,主要位于合肥市区内,热环境空间格局较简单.2005 年,流域地表热环境主要以次高温及以下为主,高温区范围在合肥市区内并进一步扩大,呈辐射状向城市周边蔓延,与邻近地表形成“高

温-次高温-中温”逐级分布状况.具体表现为:高温区主要为城镇,如合肥市区、舒城县城区及连接城市之间的交通干道.巢湖东部为山区,因近年来的矿业发展导致植被减少,地表温度高.而低温区主要以巢湖水域为冷岛中心,西南部大别山区由于植被覆盖较广,地表温度较低.2013 年由于城镇化、工业化进程加快,社会经济活动对流域地表的土地景观格局造成了强烈干扰,大量自然景观转变为人工和半人工景观类型,导致巢湖流域下垫面景观格局改变,土地利用程度加强^[34],热场演变表现为:高温、次高温区增加明显,低温区减少.其中巢湖北部的合肥市由于城镇化的快速发展及巢湖市行政区划调整,合肥市和巢湖市区集中连片发展,造成合肥特大城市建成区面积大幅增加,在地表热温度上表现为高温区面积增加,热环境效应明显增强.同时,近年来,巢湖市矿业经济发展速度快,采矿业造成的大片山体裸露也是该区域地表温度上升的原因之一.

3.2 巢湖流域地表温度(LST)时序变化及转移

趋势分析

本文利用 ArcGIS 10.0 分析 2000~2013 年巢湖流域 LST 的转化情况,通过转移矩阵分析可揭示此期间巢湖流域地表热环境效应的时空演化规律.分析表明,2000~2013 年,流域 LST 总体表现为低温区、中温区减少,次低温区、次高温区和高温区增加.其中,中温区面积大幅下降,由 2000 年 6014.91km²变为 2013 年 4791.39km²,主要转化为次低温区、次高温区和高温区,面积分别为 1496.82km²、1543.95km²和 323.32km².流域地表热环境温区类型转化表现为:高等级向低等级转化(面积大于 50km²)的主要类型有 7 种,总面积为 3595.79km²,而低等级向高等级转化主要类型为 8 种,面积达 3955.71km²,为高等级向低等级转化的 1.1 倍(表 1).总体上,2000~2013 年巢湖流域由于受到城市化、工业化的推动,社会经济发展对土地利用模式的影响,流域下垫面的景观格局受到了强烈影响,流域地表热环境格局变化明显.

表 1 巢湖流域地表温度时序变化转移矩阵(2000~2013 年)(km²)
Table 1 Transition matrixes of LST from 2000 to 2013 in Chaohu Basin

LST 分布	低温区	次低温区	中温区	次高温区	高温区	2000 年合计
低温区	436.54	504.73	82.94	6.58	0.79	1031.58
次低温区	197.21	731.16	744.59	349.92	95.84	2118.71
中温区	59.24	1496.82	2591.58	1543.95	323.32	6014.91
次高温区	8.43	286.73	1241.16	1082.66	310.42	2929.39
高温区	1.32	25.54	131.12	183.51	98.21	439.70
2013 年合计	702.73	3044.97	4791.39	3166.61	828.58	12534.29
面积净变化	-328.85	926.39	-1223.52	237.22	388.88	0

3.3 巢湖流域地表热环境效应与下垫面景观相关性分析

3.3.1 网格化地表温度(LST)空间异质性分析 为了定量研究 LST 与下垫面景观类型的相关性及尺度效应,本文对景观类型栅格图和地表反演温度栅格图各进行 1km×1km、2km×2km、3km×3km、4km×4km 和 5km×5km 共 5 种不同尺度的网格化采样.LST 网格采样后利用 ArcGIS 10.0 的 Zonal Statics 工具计算样方内 LST 的平均值,限于篇幅,2000、2005 和 2013 年巢湖流域在 3km×3km 尺度下的 LST 空间分布

特征见图 3.最后进行流域地表热环境幅度效应及其与下垫面景观相关性分析.在此,首先利用 ESDA 方法探讨巢湖流域地表热环境随幅度变化的响应特点.

探索性空间数据分析法(Exploratory Spatial Data Analysis, ESDA)通过分析空间中某位置的观察值与其相邻位置观察值是否存在相关性及相关程度,从而探索空间事物的分布特征^[35].在 1km、2km、3km、4km 和 5km 幅度下,分别计算地表温度(LST)的全局 Moran's I^[36].限于篇幅,本研究利用 ArcGIS 10.0 空间分析模块对 2013

年巢湖流域各尺度水平下的 LST 描述性统计变量和空间异质性变化进行分析.Moran's I 值在 1km、2km、3km、4km 和 5km 幅度下分别为 0.78、0.72、0.71、0.60 和 0.79,说明 5 个幅度下的 LST 都存在空间自相关(图 4).随着幅度的变化,Moran's I 指数和 Z-Score 检验均呈波动变化趋势,Moran's I 一般采用 Z 方法进行显著性检验.

本文中,5 个尺度下 LST 空间自相关全部通过了显著性检验($P<0.05$).Moran's I 指数和 Z-Score 检验的意义在于,当 Moran's I >0 时,数值越大表明其空间正相关性越强,Z-Score >1.96 时,数值越大表明其空间正相关则越显著.图 4 中,5 个尺度下的 Z-Score 值均远大于 1.96,表明巢湖流域 LST 空间分布呈现很强的空间正相关.

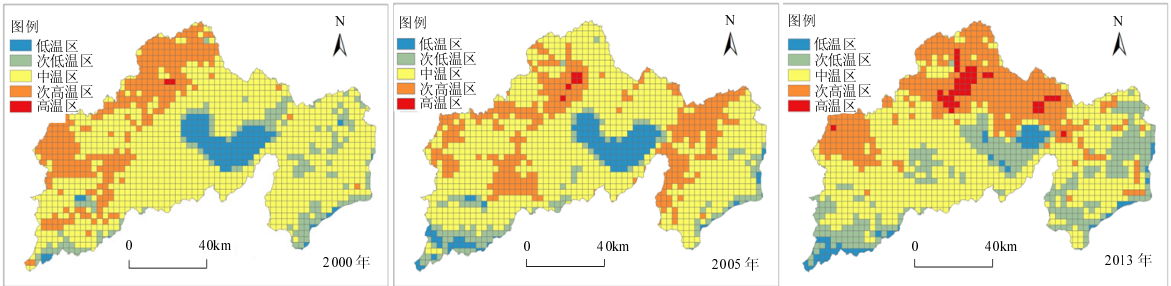


图 3 巢湖流域 2000 至 2013 年地表温度空间分布特征(3km 尺度)

Fig.3 Spatial characteristic of LST from 2000 to 2013 in Chaohu Basin (at 3km scale)

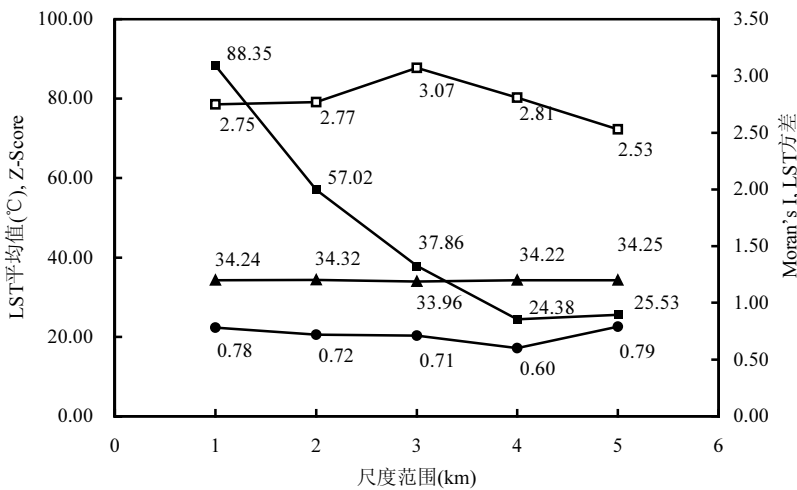


图 4 巢湖流域地表温度(LST)空间统计变量随尺度变化(2013 年)

Fig.4 Changes of LST's statistical variables at five scales in Chaohu Basin (2013)

—■— Z-Score —▲— LST 平均值 —●— Moran's I —□— LST 方差

为了进一步揭示局域地区地表温度是否存在显著的空间聚集点,本文进行局部空间自相关分析 LST 网格单元之间的空间关联性,并可视化局域空间差异,揭示流域 LST 的空间分布规律,分析不同尺度下研究区内 LST 网格单元之间的相互关联性.局部自相关 Moran's I 值将空间分为

“高高(HH)、低低(LL)、高低(HL)和低高(LH)”四个部分,其中,HH 聚集区,表示 LST 高的中心地区其周边 LST 也较高,体现在空间关联中为扩散效应;LL 聚集区表示中心地区和相邻地区的 LST 都较低,属于低温区;落入高高和低低区的 LST 在地理空间上存在显著的空间正相关.高低聚集区,

表示中心地区 LST 值高邻值低,在空间关联中表现出极化效应;低高聚集区,表示中心地区 LST 低邻接高,在空间关联中属于过渡区。其中不显著的网格单元为 LST 空间性不强的区域,本研究中主要呈片状分布(图 5)。

LST 不同幅度变化的空间格局分析表明,Moran's I 值呈“降-升”的变化趋势,即 1~4km 幅度变化中呈下降趋势,4~5km 时呈上升趋势,在 4km 处具有明显拐点。空间自相关分析表明:1km 到 4km 幅度变化中,LST 的空间分布呈现零散到具有多中心集中的变化过程,Moran's I 值表现为下降趋势;而 4km 到 5km 的幅度变化,LST 的空间从多中心分布趋向团状集聚变化,分布格局进

一步简化,集聚中心受幅度变化而减少,因此,Moran's I 值表现为上升趋势。另一方面,LST 描述性统计变量显示,随幅度的变化,LST 的空间分布格局及其统计参数均发生了一定的改变:LST 平均值变化在 0.4℃ 范围内,呈“升-降-升”变化趋势,在 3km 处存在谷点,总体上幅度变化对流域地表温度平均值的影响不大;LST 方差呈先上升后下降,在 3km 处有一个峰值。结合空间自相关 Moran's I 值和 LST 方差分析表明:3km 幅度下的 LST 差异最大,显示该尺度下热场分布信息量丰富。同时,LST 的空间分布具有明显的聚集性,因此,巢湖流域地表热环境效应相关研究适宜的幅度域为(2,4)km。

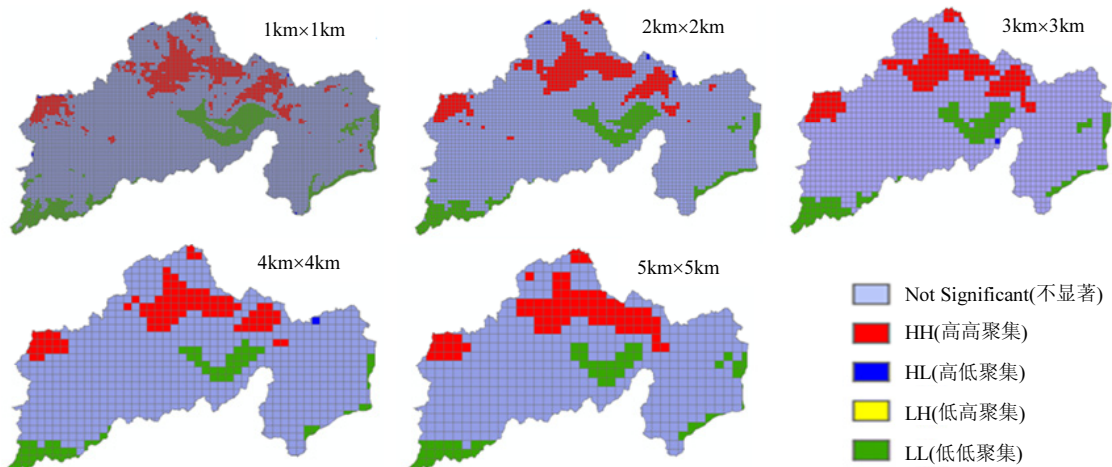


图 5 巢湖流域地表温度(LST)空间异质性的尺度效应(2013 年)

Fig.5 The spatial heterogeneity of LST at five scales in Chaohu Basin (2013)

3.3.2 流域地表温度(LST)与下垫面景观结构相关分析 下垫面是大气的直接热源,地表温度场与大气温度场关系密切,同等太阳辐射条件下,城镇用地中的建筑物道路等化学人工材料吸热快且热容量小,较自然下垫面(林地、草地、水体等)升温快,导致其表面温度明显高于自然下垫面,从而造成相应区域地表温度较高^[37]。

本文对巢湖流域地表温度与下垫面景观结构进行互动分析,结果表明,景观结构与 LST 呈极显著相关关系,2013 年巢湖流域 3km 幅度下景观结构与 LST 的相关关系见图 6。其中,建设用地景观与 LST 呈极显著正相关关系,相关系数

为 0.5936,为流域地表热环境效应的重要影响源,而林地、水体景观与 LST 呈极显著负相关关系,其中水体相关系数最高,达-0.5855,二者为流域地表热环境效应抑制的主要贡献源。由于农地景观受季节性影响最大,本研究 9 月份的农地景观与 LST 呈正相关关系,主要因为该季节部分农田作物收获后,由于裸露的土壤表层比林地、水体显热通量贡献更大,因而地表温度相对较高。但与建设用地景观相比,其相关系数仍较低。结果表明,巢湖流域城镇用地面积的扩张是地表温度增强的重要原因,而林地与水体景观对抑制流域地表温度有重要作用。因此,土地利用

和城市发展模式是地表温度空间差异的主要原因,寻求合理的城市土地利用规模、结构、方式及其空间布局,应当成为有效遏制热环境效应的重要目标^[21].

3.3.3 地表温度(LST)与下垫面景观格局相关性及其尺度效应 研究表明,区域地表温度除与下垫面的类型结构有关外,还受到下垫面景观格局的影响.本文对巢湖流域地表温度与景观破碎度、分离度及优势度指数进行定量相关分析,揭示 LST 与景观格局的作用机制,探讨互动作用下的尺度效应.2013 年巢湖流域 3km 幅度下景观格局与 LST 的相关关系分析显示,建设用地、林地和水体景观类型格局指数与 LST 相关性普遍较

高(表 2),体现了该几类景观类型的格局变化对 LST 的影响程度较高,但影响效果各异.其中,建设用地分离度、破碎度与 LST 呈负相关关系,表明具有增温作用的建设用地如分离程度高、越小斑块化,则增温效果会下降.而林地与水体景观的分离度、破碎度与 LST 呈现正相关关系,表明具有降温作用的生态用地如小斑块化、分离度高则降温作用明显下降.从优势度来看,建设用地优势度越高,LST 越高,呈正相关关系,而林地、水体的优势度与 LST 呈负相关关系,优势度越高抑制热环境效应效果越好.由于农地景观由于受季节性影响,在本研究中对流域热环境效应具有一定的促进作用.

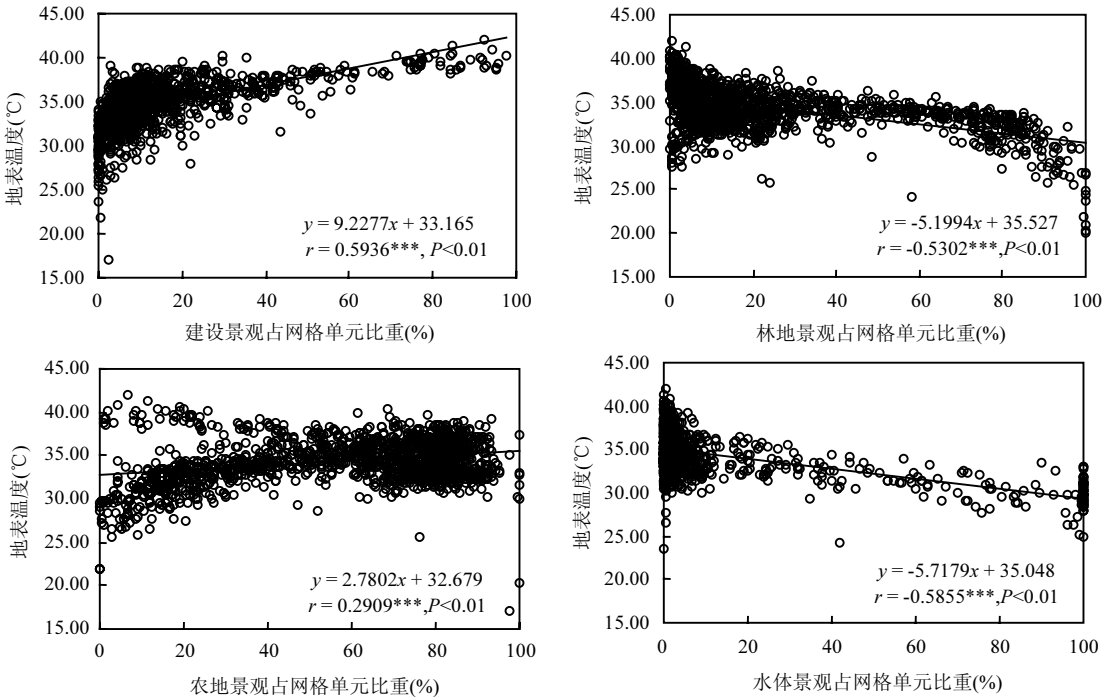


图 6 3km 幅度下巢湖流域景观结构与地表温度回归分析(2013 年)

Fig.6 The regression analysis between landscape structure and LST at 3km scale in Chaohu Basin (2013)

按照相关系数高低排序: $D_{\text{建设用地}} > D_{\text{林地}} > F_{\text{水体}} > D_{\text{水体}} > F_{\text{建设用地}} > C_{\text{水体}} > F_{\text{林地}} > C_{\text{农地}} > C_{\text{建设}} > C_{\text{林地}} > F_{\text{农地}} > D_{\text{农地}}$ (表 2).总体上显示,LST 对优势度 D 的影响较分离度 F 与破碎度 C 更加敏感.研究表明,建设用地集中连片扩张、建成区“摊大饼”式蔓延是 LST 增强的主要原因.而林地和水体等具有生态

功能用地在城市化过程中被其他用地占用造成分离或破碎,在很大程度上降低其对 LST 的抑制功能.因此,实践中可通过加强流域景观结构的配置和格局的调控与优化来达到缓解热环境效应的目的,如流域景观规划中,缓解热环境效应的措施首先应当控制城镇用地集中连片式蔓延增长,

并增加林地、水体等生态功能景观资源的配置, 通过适度分散布局面积较大的绿地、整合低破碎度的绿地达到形状规整,也是有效缓解流域热环境效应的关键.另外,通过林地廊道将分散林地斑块有效连接,构建流域城镇绿地网络系统,对于缓解流域热环境效应的效果也是明显的^[37].

表2 3km 幅度下地表温度(LST)与下垫面景观格局相关分析(2013 年)
Table 2 The regression analysis between LST and landscape pattern at 3km scale in Chaohu Basin (2013)

景观指数	景观类型	3km×3km 网格单元尺度下的地表温度(LST)与景观指数回归关系		
		回归方程	相关系数	显著性水平
破碎度指数 <i>C</i>	建设景观	$LST = -1.6316 \times C + 35.588$	$r = -0.3342^{***}$,负相关	极显著 $P < 0.01$
	林地景观	$LST = 1.97 \times C + 33.13$	$r = 0.3276^{***}$,正相关	
	农地景观	$LST = -4.4625 \times C + 35.03$	$r = -0.3413^{***}$,负相关	
	水体景观	$LST = 2.1752 \times C + 33.202$	$r = 0.3678^{***}$,正相关	
分离度指数 <i>F</i>	建设景观	$LST = -1.3368 \times F + 36.624$	$r = -0.4301^{***}$,负相关	
	林地景观	$LST = 1.0955 \times F + 32.859$	$r = 0.3437^{***}$,正相关	
	农地景观	$LST = -1.9632 \times F + 35.081$	$r = -0.2419^{***}$,负相关	
	水体景观	$LST = 1.0502 \times F + 32.259$	$r = 0.4934^{***}$,正相关	
优势度指数 <i>D</i>	建设景观	$LST = 13.44 \times D + 31.378$	$r = 0.6761^{***}$,正相关	
	林地景观	$LST = -10.813 \times D + 37.269$	$r = -0.5301^{***}$,负相关	
	农地景观	$LST = 6.1177 \times D + 31.708$	$r = 0.2163^{***}$,正相关	
	水体景观	$LST = -13.331 \times D + 35.353$	$r = -0.4738^{***}$,负相关	

注:限于篇幅,表中只列入2013年3km尺度下的景观格局指数与LST的直线方程关系.网格单元尺度为1km时,样本单元12090个,自由度 $\nu > 1000, r_{0.01} = 0.081$;2km时,样本单元3097个, $\nu > 1000, r_{0.01} = 0.081$;3km时,样本单元1548个, $\nu > 1000, r_{0.01} = 0.081$;4km时,样本单元860个, $500 < \nu < 1000, r_{0.01} = 0.115$;5km时,样本单元568个, $500 < \nu < 1000, r_{0.01} = 0.115$.

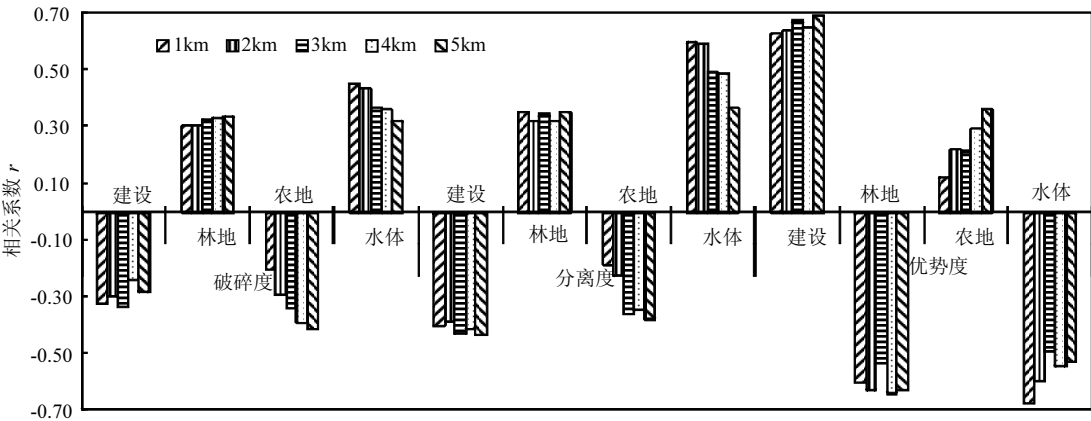


图7 景观格局指数与 LST 相关性随尺度变化的特征(2013 年)

Fig.7 The change characteristics of scale effect for correlation between landscape pattern indexes and LST (2013)

尺度问题是景观生态学的核心问题^[24],景观格局与 LST 相关研究需要关注尺度效应.不同幅度下景观格局与 LST 的相关性分析表明,景观格局指数与 LST 相关性随尺度变化具有一定的差异:总体上,建设用地、林地和农地景观与 LST 的相关性随尺度变化呈上升趋势,而水体景观与 LST 相关性随尺度变化呈下降趋势.其中,建设用地破碎度、建设用地分离度、建设用地优势度、林地分离度、林地优势度和水体优势度在 3km 幅度下具有明显拐点(图 7).结果表明,斑块水平上,不同景观类型格局指数对幅度变化的响应敏感性不一致.少数景观格局指数与

LST 的相关性对幅度变化响应较弱,随幅度变化,在 3km 左右呈上下波动.幅度变化对流域景观格局与 LST 的相关性分析会产生一定的影响,因此,流域地表热环境与景观格局互动分析时需选择合适的幅度水平.

4 结论

4.1 巢湖流域 2000~2013 年的地表热环境效应整体上逐渐增强,空间格局变化明显,高温区主要聚集在合肥市区范围,并进一步呈辐射状向周边蔓延,而中温以下等级区域逐渐缩小.空间异质性分析表明,LST 网格化单元呈显著空间正相关.LST 的空间聚集特征受幅度变化的影响,流域地表热环境应选择适合的幅度水平.结合空间自相关、LST 方差等参数,巢湖流域地表热环境效应相关研究的适宜幅度域在(2,4)km 范围.

4.2 巢湖流域景观结构与 LST 的相关性分析表明,建设用地景观与 LST 呈极显著正相关关系,成为流域地表热环境效应增强的重要影响源,而林地、水体景观与 LST 呈极显著负相关关系,二者为流域地表热环境效应抑制的主要贡献源.巢湖流域城镇用地面积的扩张是地表温度增强的主要原因,而林地与水体景观是抑制流域热环境效应的重要因素.因此,流域规划实践中,应当按照总体规划适度控制流域内建成区总规模和建设用地新增量,避免城镇用地规划集中连片布局形成大斑块建设用地基质,同时加强林地、水体、耕地等生态景观资源的保护和配置可有效缓解流域热环境效应.

4.3 巢湖流域景观格局与 LST 的相关关系及其尺度效应分析显示,建设用地、林地和水体景观类型格局指数与 LST 相关性普遍较高,对 LST 的变化影响程度较高,但对 LST 的影响效果各异.其中,具有增温作用的建设用地如果分离程度高、越小斑块化,则增温效果会下降.而具有降温作用的林地与水体等生态用地景观如果小斑块化、分离度高则降温作用将明显下降.另外,LST 受优势度的影响较分离度和破碎度更加敏感.因此,在流域规划中也应当注重加强流域内城镇建成区景观格局的优化调控,如城镇建设用地开发

应通过修建、连接绿地和水体廊道来分散城镇用地布局,整合破碎的生态景观资源,把相互分散的斑块有机的连接起来形成绿地网络系统,可有效抑制 LST 缓解流域热环境效应.

参考文献:

- [1] Howard L. Climate of London deduced from metrological observations [M]. London: Harvey and Dorton Press(3rd edition), 1833,1:348.
- [2] 李志乾,巩彩兰,胡 勇,等.城市热岛遥感研究进展 [J]. 遥感信息, 2009,8:100-105.
- [3] 岳文泽,徐丽华,徐建华.20 世纪 90 年代上海市热环境变化及其社会经济驱动力 [J]. 生态学报, 2010,30(1):155-164.
- [4] 谢苗苗,王仰麟,付梅臣.城市地表温度热岛影响因素研究进展 [J]. 地理科学进展, 2011,30(1):35-41.
- [5] 钱敏蕾,徐艺扬,李 响,等.上海市城市化进程中热环境响应的空间评价 [J]. 中国环境科学, 2015,35(2):624-633.
- [6] 葛荣凤,王京丽,张力小,等.北京市城市化进程中热环境响应 [J]. 生态学报, 2016,36(19):1-10.
- [7] Jusuf S K, Wong N H, Hagen E, et al. The influence of land use on the urban heat island in Singapore [J]. Habitat International, 2007,31(2):232-242.
- [8] Nichol J E, Fung W Y, Lam K S, et al. Urban heat island diagnosis using ASTER satellite images and 'in situ' air temperature [J]. Atmospheric Research, 2009,94(2):276-284.
- [9] Van De Kerchove R, Lhermitte S, Veraverbeke S, et al. Spatio-temporal variability in remotely sensed land surface temperature, and its relationship with physiographic variables in the russian altay mountains [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2013,(20):4-19.
- [10] Choi Y Y, Suh M S, Park K H. Assessment of surface Urban Heat Islands over three megacities in East Asia using land surface temperature data retrieved from COMS [J]. Remote Sensing, 2014,6(6):5852-5867.
- [11] Sirous H, Weng Q, Darvishi A, et al. Seasonal variations of the surface Urban Heat Island in a semi-arid city [J]. Remote Sensing, 2016,8(4):352-368.
- [12] 唐新明,刘 浩,李 京,等.北京地区霾/颗粒物污染与土地利用/覆盖的时空关联分析 [J]. 中国环境科学, 2015,35(9):2561-2569.
- [13] 徐建锋,尹 炜,闫峰陵,等.农业源头流域景观异质性与溪流水质耦合关系 [J]. 中国环境科学, 2016,36(10):3193-3200.
- [14] 张 月,张 飞,王 娟,等.基于 LUCC 的艾比湖区域生态风险评价及预测研究 [J]. 中国环境科学, 2016,36(11):3465-3474.
- [15] 蒋 晶,乔 治.北京市土地利用变化对地表温度的影响分析 [J]. 遥感信息, 2012,27(3):105-111.

- [16] 寿亦萱, 张大林. 城市热岛效应的研究进展与展望 [J]. 气象学报, 2012, 70(3): 338-353.
- [17] 岳文泽, 徐建华. 上海市人类活动对热环境的影响 [J]. 地理学报, 2008, 63(3): 247-256.
- [18] 周红妹, 丁金才, 徐一鸣, 等. 城市热岛效应与绿地分布的关系监测和评估 [J]. 上海农业学报, 2002, 18(2): 83-88.
- [19] 王 勇, 李发斌, 李何超, 等. RS 与 GIS 支持下城市热岛效应与绿地空间相关性研究 [J]. 环境科学研究, 2008, 21(4): 81-87.
- [20] 陈爱莲, 孙然好, 陈利顶. 基于景观格局的城市热岛研究进展 [J]. 生态学报, 2012, 32(14): 4553-4565.
- [21] 王美雅, 徐涵秋, 付 伟, 等. 城市地表水体时空演变及其对热环境的影响 [J]. 地理科学, 2016, 36(5): 1-7.
- [22] 彭保发, 石忆邵, 王贺封, 等. 城市热岛效应的影响机理及其作用规律—以上海市为例 [J]. 地理学报, 2013, 68(11): 1461-1471.
- [23] 申卫军, 邬建国, 林永标, 等. 空间粒度变化对景观格局分析的影响 [J]. 生态学报, 2003, 23(12): 2506-2519.
- [24] 黄木易, 何 翔. 巢湖流域土地景观格局变化及生态风险驱动力研究 [J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25(5): 743-750.
- [25] 李云生, 周广金, 梁 涛, 等. 巢湖流域的土地利用变化及其生态系统功能损益 [J]. 地理研究, 2009, 28(6): 1656-1664.
- [26] 黄木易, 何 翔. 近 20 年来巢湖流域景观生态风险评估与时空演化机制分析 [J]. 湖泊科学, 2016, 28(4): 785-793.
- [27] 严 平, 杨书运, 王相文. 合肥城市热岛强度及绿化效应 [J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2000, 23(3): 348-352.
- [28] 刘 玲, 吴坤梯, 黄光瑞, 等. 合肥城市发展对热岛强度的影响 [J]. 长江流域资源与环境, 2008, 17(Z1): 88-93.
- [29] 姚玉龙, 刘普幸, 陈丽丽. 基于遥感影像的合肥市热岛效应时空变化特征及成因 [J]. 生态学杂志, 2013, 32(12): 3351-3359.
- [30] 阎伍玖, 王心源. 巢湖流域非点源污染初步研究 [J]. 地理科学, 1998, 18(3): 263-267.
- [31] 傅伯杰, 陈利顶, 马克明, 等. 景观生态学原理及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2001: 58.
- [32] Sobrino J A, Jimenez-Munoz J C, Paolini L. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM5 [J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 90(4): 434-440.
- [33] 陈松林, 王天星. 等间距法和均值标准差法界定城市热岛的对比研究 [J]. 地球信息科学学报, 2009, 11(2): 145-150.
- [34] 黄木易, 何 翔, 吴 迪, 等. 巢湖流域土地利用程度变化及其空间异质性分析 [J]. 土壤, 2015, 47(5): 994-1000.
- [35] 马荣华, 蒲英霞, 马晓冬. GIS 空间关联模式发现 [M]. 北京: 科学出版社, 2007: 103-107.
- [36] Kyriakidis P, Journel A G. Geostatistics models: a review [J]. Mathematical Geology, 1999, 31(6): 615-684.
- [37] 卞子浩, 马超群, 王 迪, 等. 西安地区热岛效应与景观生态格局相关性研究 [J]. 干旱气象, 2016, 34(2): 342-348.

作者简介: 黄木易(1978-)男, 安徽芜湖人, 副教授, 博士, 主要从事城镇化质量、流域生态环境健康诊断及空间信息挖掘. 发表论文 30 余篇.