

基于 TVX 方法的南京市城区时空格局与 地表温度的研究¹

丁海勇¹, 李往华²

(1. 南京信息工程大学遥感与测绘工程学院, 江苏 南京 210044; 2. 南京信息工程大学地理科学学院, 江苏 南京 210044)

【摘要】: 随着全球气候变化和人类活动的不断加剧, 导致生态、资源与环境问题日趋严重, 区域空间格局变化与地表温度的研究已成为全球环境变化的热门和重点研究课题。采用 2000 年、2006 年和 2010 年的 TM 遥感影像, 结合 GIS 和 RS 技术研究南京市不同时期的时空分布特征、演变特征以及地表温度的变化。结果表明: 2000~2010 年南京市城区建设用地面积增长幅度较大, 而耕地面积却呈显著递减趋向, 水体和草地面积基本保持稳定, 林地面积略有增长。NDVI 和 MNDWI 均与地表温度呈负相关, 通过构建 TVX 空间观察南京城市化进程, 发现植被覆盖度持续降低, 地表温度急速上升, 到 2010 年, 所有土地利用类型的聚类点的转化轨迹趋于一点, 变化向量幅度是: 林地 > 草地 > 水体 > 耕地, 研究结果表明林地和水域对城市地表热环境具有强大的缓解作用, 在城市化进程中, 要注重城市水域和林地的保护, 同时要改善城市绿化、减少能耗和节制热源。

【关键词】: 地表温度; 土地利用类型; TVX 方法; 空间分布

【中图分类号】: TN219 **【文献标识码】**: A **【文章编号】**: 1004-8227 (2018) 04-0735-10

【DOI】: 10.11870/cjlyzyyhj201804005

随着城市化进程加快, 土地利用类型发生了翻天覆地的变化, 由于土地利用类型的快速改变, 地表覆盖状态随之发生剧烈变化, 从而改变地表反照率和粗糙度, 影响地表热收支的平衡及水文和水汽的垂直输送, 以及城市扩展导致的热岛效应加强等^[1]。大尺度土地利用覆盖变化通过影响气候形成的物理、生物过程, 进而引发极端气候、食品健康安全、生物和生态环境等一系列问题, 是科学界关注的一个热点^[2]。

近年来, 国内外学者对城市化进程导致土地利用类型的改变及其对城市地表温度的影响进行了大量研究。如 Hansen 等^[3]揭 75 全球土地利用类型变化引起反照率变化所产生辐射强迫具有降温作用, 而 IPCC^[4]则认为大气中温室气体 CO₂ 增加导致的辐射强迫有升温作用, 其中 1/3 的强迫源为土地利用变化的贡献。王明娜等^[5]对 21 世纪初中国北方半干旱区农田扩张、植树造林和草地恢复 3 类土地利用类型变化研究, 结果表明这 3 类土地利用类型变化现象对格点多年平均温度均呈现负效应, 其中草地恢复年平均温度降低更为明显。杜培军等^[6]定量分析江苏省盐城滨海湿地土地利用类型, 该地区最主要的类型是人类主导型, 且以自然类型向人工类型转化最为显著, 其中湿地地表温度有显著起伏, 普遍湿地类型温度均有不同程度的上升。朱玲燕等^[7]

¹**【收稿日期】**: 2017-06-02; **【修回日期】**: 2017-06-16

【基金项目】: 国家自然科学基金项目 (41571350) “城市边缘区地表组分温度反演模型的构建”

【作者简介】: 丁海勇 (1974~), 男, 副教授, 从事土地利用变化检测、地表温度反演等方面的研究. E-mail: hyongd@163.com

分析探讨土地利用类型对地表温度的影响，表明建设用地的扩展对地表温度具有较大的影响，且不同土地利用类型的地表温度与 NDVI 相关程度不同。刘纪远等^[8]通过对 1990~2010 年的 20a 间的土地利用变化研究，发现我国的土地利用变化表现出明显的空间区域差异性，且呈现出耕地南减北增，林地前减后增，荒漠前增后减，草地持续减少的趋势。

本文在前人的研究基础上，将 GIS 和 RS 技术相结合，采用 2000~2010 年南京市城区遥感影像数据并对其进行监督分类和地表温度反演，并引入温度植被指数 (TVX) 空间轨迹分析方法探讨土地利用类型对地表温度的影响，从而为城市化过程导致的城市热环境及其缓解提供科学依据。

1、研究区概况及数据来源

1.1 研究区概况

南京地处 31° 14' ~32° 37' N, 118° 22' ~119° 14' E 之间，位于我国东南部的长江中下游，是江苏省的省会、国家历史文化名城和中国重要的综合性工业产业基地。南京市平面位置南北长、东西窄，成正南北向，整个城市被长江东西贯穿为南北两部分。地貌特征属宁镇扬丘陵地区，以低山山陵为主，占全市总面积的 64.52%。南京市属于亚热带季风气候，四季分明，年平均气温 15.4℃，年平均降水量 1106mm。



图 1 研究区域

1.2 遥感数据及其预处理

本文采用了南京地区 2000 年 5 月 3 日 10 时 12 分、2006 年 5 月 20 日 10 时 29 分、2010 年 4 月 29 日 10 时 28 分的 Landsat TM 遥感影像数据，所用数据由 United States Geological Survey 简称 USGS (<http://gioviz.usgs.gov/>) 上下载。遥感影像预处理过程主要包括辐射定标、大气校正、图像剪裁、几何精校正等。

2、研究方法

2.1 遥感图像分类

结合南京市城市总体规划和遥感影像图的特点，景观的分类选择的是支持向量机分类，在 ENVI 5.1 软件中实现。支持向量机算法是一种建立在统计学习理论基础上的机器学习方法。支持向量机可以自动寻找那些对分类有较大区分能力的支持向量，

由此构造出分类器，可以将类与类之间的间隔最大化，因而有较好的推广性和较高的分类准确率^[9]。

本文根据遥感数据特征，结合先验知识，通过对图像的目视判读获得聚类类别，并将其作为分类模板，根据分类模板，对3期影像分别用支持向量机方法进行监督分类。将分类好的结果图和原图像对比分析，若有错分区域，重新选取样本再分类，直到结果正确为止。采用混淆矩阵方法，并用 Kappa 系数评价分类图的精度。

2.2 土地利用变化

土地利用动态度模型是表示土地资源变化快慢的重要模型，单一土地利用动态度是用来描述区域一定时间范围内某种土地利用类型数量的变化速度。它能表示出不同时期各区域间土地利用类型变化的差别，并且预测未来土地利用类型变化的方向^[10]。动态度的公式如下：

$$K = \frac{U_b - U_a}{U_a} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (1)$$

式中：K 为研究期内某一土地利用类型动态度； U_a 、 U_b 分别为研究初期和末期某一特定土地利用类型的面积，T 为时间，当 T 的时段设定为年时，就表示该研究区域土地利用类型年变化率。

综合土地利用动态度表示某研究区的土地利用的整体动态，其表达见公式（2）。

$$LU = \left[\frac{\sum_{i=1}^n \Delta LU_{i-j}}{2 \sum_{i=1}^n LU_i} \right] \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (2)$$

式中： LU_i 为监测起始时间第 i 类土地利用类型面积； ΔLU_{i-j} 为监测时段第 i 类土地利用类型转为第 j 类土地利用类型面积的绝对值；T 为监测时段长度，当 T 的时段设定为年时，LU 就表示该研究区土地利用类型年变化率^[11]。

2.3 地表温度反演

地表温度在地气间的物质与能量交换过程中起着重要的作用，是地球表面能量平衡和温室效应研究中一个很重要的指标。本文选取辐射传输法反演南京市城区地表温度。该方法表示为^[12]：

$$L_\lambda = [\varepsilon B(T_s) + (1 - \varepsilon)L \downarrow] \tau + L \uparrow \quad (3)$$

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：

$$B(T_s) = [L_\lambda - L \uparrow - \tau(1 - \varepsilon)L \downarrow] / \tau \varepsilon \quad (4)$$

T_s 可以用普朗克公式的函数获取。

$$T_s = K_2 / \ln(K_1 / B(T_s) + 1) \quad (5)$$

对于 TM, $K_1=607.76w/(m^2 \cdot \mu m \cdot sr)$, $K_2=1260.56k$, K_1 和 K_2 可以从*_MTL.txt 元数据文件中获取。在 NASA 公布的网站 (<http://atmcorr.gsfc.nasa.gov>) 输入所采用影像的成像时间以及中心经纬度即可获得大气在热红外波段的透过率 τ 、大气向上辐射亮度 $L \uparrow$ 和大气向下辐射亮辐射亮度 $L \downarrow$ 。

2.4 温度植被指数 (TVX) 空间轨迹分析

TVX 是一种以地表温度与植被指数绘制成的散点图来研究两者之间关系的空间分析方法,即以地表温度和植被指数分别作为 TVX 空间的横、纵坐标,构建 TVX 空间;以某种土地利用类型为聚类点,计算各土地利用类型在空间中的位置,其初始位置决定了运动轨迹路径的幅度和方向^[13]。通过研究 TVX 聚类点的空间运动轨迹,从而分析地表温度的时空变化特征,揭示出土地利用类型变化对地表温度的影响。

为了不同时期的遥感影像数据具有可比性,需对地表温度进行归一化处理,并以植被覆盖度作为植被指数的分析指标,归一化地表温度计算公式为:

$$T_s^* = (T_s - T_{\min}) / (T_{\max} - T_{\min}) \quad (6)$$

式中: T_s^* 为归一化的地表温度; T_s 表示像元温度; T_{\min} 、 T_{\max} 分别表示研究区中最低温和最高温。

根据 TVX 空间变化轨迹,计算各类型土地利用类型变化点的向量幅度,公式如下:

$$L = \sqrt{(x' - x)^2 + (y' - y)^2} \times 100 \quad (7)$$

式中: L 为变化向量幅度; x 、 y 分别表示为土地利用类型变化初期的植被覆盖度和归一化地表温度; x' 、 y' 分别表示为土地利用类型变化末期的植被覆盖度和归一化地表温度。

2.5 归一化植被指数 (NDVI) 及归一化差异水体指数 (MNDWI)

归一化植被指数 (NDVI) 能够很好的反映植被的生长状态和植被的覆盖情况,是衡量区域生态环境状况和性质的一个重要指标。

$$NDVI = \frac{B4 - B3}{B4 + B3} \quad (8)$$

其中 $B4$ 、 $B3$ 分别是近红外波段、红色波段的反射率值。

归一化差异水体指数 (MNDWI) 是表征城市水体信息的指数,能够提取到城市范围内的水体信息,在影像图上, MNDWI 值越高的地方亮度值越大。

$$MNDWI = \frac{B2 - B5}{B2 + B5} \quad (9)$$

其中 $B2$ 、 $B5$ 分别是绿色波段、中红外波段的反射率值。

3、结果

3.1 分类结果及精度评价

利用 RS 和 GIS 技术, 参考《土地利用现状分类》国家标准^[14], 结合南京市土地利用特点及遥感影像的精度, 将研究区划分为 5 种典型地物类型: 建设用地、林地、水体、草地和耕地, 并对不同时期的土地利用类型图进行精度评价(表 1~表 3)。分类精度评价结果为: 2000 年总体精度为 92.63%, Kappa 系数为 0.90; 2006 年总体精度为 92.50%, Kappa 系数为 0.90; 2010 年总体精度为 94.820%, Kappa 系数为 0.93。这 3 期土地利用类型图总体精度均在 92% 以上, 能满足研究需求。

3.2 地表温度反演

根据地表温度反演模型, 反演出南京市城区 3 期遥感数据的地表温度, 2000 年 5 月 3 日地表温度范围在 19.94℃~44.21℃, 温差为 24.27℃, 平均温度为 30.05℃; , 最高温度出现在长江以南人为活动较强的老城区。2006 年 5 月 20 日整个研究区地表温度范围在 20.54℃~50.74℃, 温差为 29.8℃, 水体和城区之间的温度差异显著, 地表温度平均值为 30.95℃。2010 年 4 月 29 日地表温度范围在 6.7℃~36.92℃, 温差为 30.22℃, 平均温度为 20.24℃, 高温区的范围呈现出向西南扩散的趋势。在城区的高温区中, 紫金山和玄武湖地区温度较低。而城区的高温区主要沿着紫金山和玄武湖的向南延伸, 形成环带状分布, 在环形带中西面和北面地区温度相对较高, 主要因为北面是建筑密集区和中央火车站、汽车站等重要交通枢纽地区, 越往东离紫金山越来越远, 温度不断降低, 而南面地区离紫金山越远, 高温区面积逐渐减少, 直至江宁区再次出现高温区。

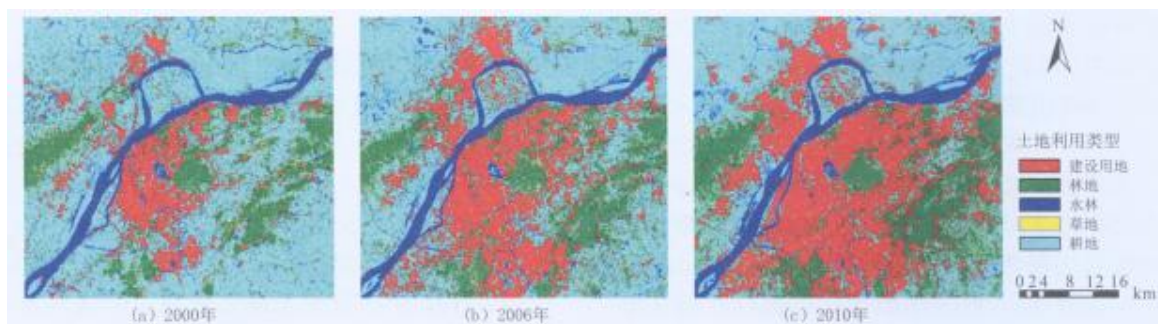


图 2 土地利用类型分布图

表 1 南京市城区 2000 年遥感影像分类混淆矩阵

分类数据	建设用地	林地	水体	草地	耕地	行总计
建设用地	12760	55	0	0	85	12900
林地	19	9639	2	5	24	9689
水体	239	14	3872	0	320	4445
草地	0	21	0	113	6	140
耕地	1180	271	8	222	4676	6357
列总计	14198	10000	3882	340	5111	33531

表 2 南京市城区 2006 年遥感影像分类混淆矩阵

分类数据	建设用地	林地	水体	草地	耕地	行总计
建设用地	10364	38	0	56	198	10656
林地	3	9090	0	69	711	9873
水体	10	9	4310	0	12	4341
草地	2	1	0	380	0	383
耕地	201	1085	33	138	7503	8960
列总计	10580	10223	4343	643	8424	34213

表 3 南京市城区 2010 年遥感影像分类混淆矩阵

分类数据	建设用地	林地	水体	草地	耕地	行总计
建设用地	10271	164	0	201	261	10897
林地	1	10805	0	0	601	11407
水体	6	4	4223	0	0	4233
草地	22	0	0	149	1	172
耕地	112	140	262	43	7797	8354
列总计	10412	11113	4485	393	8660	35063

可以看出：虽然 3 期遥感影像图的成像时间不同，但是南京市城区的热环境效应却表现的非常显著，并且高温的面积都表现出不断加剧，主要表现为向西南方向延伸，由老城区向新城区扩散。2000~2010 年南京市城区高温范围逐年增加，这主要是改革开放以来，城市化进程迅速加快，土地利用类型发生了重大的变化，城市化导致建筑物和道路急剧增多，众多人口涌入城市带来更多的热量，致使南京市城区温度较其他地区高，且在 2000~2010 年呈不断增加趋势。低温区主要分布在水体和林地中，城区中主要的湖泊、江体和大型林地的地表温度并没有随着时间的变化而发生显著的波动。

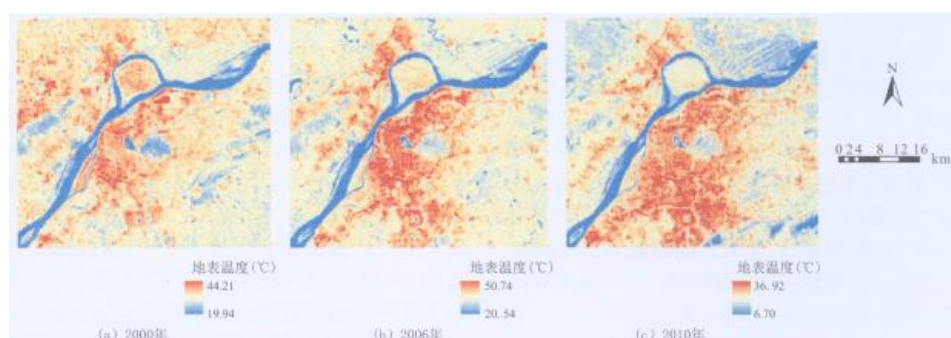


图 3 地表温度反演分布图

4、分析

4.1 南京市城区土地利用转移矩阵及动态变化

4.1.1 2000~2010年南京市城区转移矩阵

利用 Envi5.1 的 Change Detection 命令,分别计算出 2000~2006 年和 2006~2010 年南京市城区土地利用类型转移矩阵(表 4 和表 5)。可以看出,南京市城区主要的土地利用类型是建设用地、林地、耕地和水体,其中建设用地和耕地面积较大。2000~2010 年耕地面积逐渐减少,主要转向建设用地和林地。建设用地面积不断增大,共增加了 375.33km²。2000~2006 年建设用地面积增加量较大,主要由耕地转移而来,这是因为随着城市化进程的加快,城市不断扩张,以主城区为中心,以占用耕地的方式向外扩散,建设用地主要分布在八卦洲以南地区,并沿长江向四周扩散,2000 年、2006 年和 2010 年建设用地面积分别占研究区总面积的 21.54%、30.87%、37.31%。2000~2006 年林地面积并没有出现较大浮动,2006~2010 年林地面积也主要由耕地转移而来,林地主要分布在研究区的西部和东南部地区,且林地集中连片,破碎度较小,2000 年、2006 年和 2010 年林地面积分别占研究区总面积的 13.00%、14.49%、17.35%。水体主要有长江水和湖水,其中长江水面积居多,湖水大多呈狭长的带状分布,主要分布在长江以北地区,长江以南主要是玄武湖,水体的面积随着时间的变化,并没有出现明显的浮动,由 2000 年占研究区面积的 7.65%增加到 2010 年的 7.86%。草地的变化趋势和水体相似,面积基本上无明显变化。耕地主要分布在研究区的西北部、东北部和西南部,在东南部地区也有少量耕地分布,且 2000~2010 年耕地的面积呈现出迅速减少的趋势。

表 4 2000~2006 年南京市城区土地利用转移矩阵 (km²)

地物类型	建设用地	林地	水体	草地	耕地	合计
建设用地	368.06	23.75	13.07	1.58	328.20	734.68
林地	14.85	239.13	0.22	5.96	84.62	344.78
水体	4.00	0.57	152.1	0.01	16.81	173.49
草地	1.18	0.54	0.01	0.34	1.97	4.04
耕地	124.36	45.27	16.64	2.87	933.47	1122.61
合计	512.45	309.26	182.04	10.76	1365.09	2379.60

表 5 丹江口 2006~2010 年南京市城区土地利用 转移矩阵 (km²)

地物类型	建设用地	林地	水体	草地	耕地	合计
建设用地	600.89	37.20	1.10	2.34	246.25	887.78
林地	19.85	269.54	0.41	1.03	121.98	412.81
水体	8.67	0.20	156.39	0.01	21.64	186.91
草地	3.93	0.21	0.02	0.00	1.05	5.21
耕地	101.33	37.63	15.58	0.66	731.69	886.89
合计	734.68	344.78	173.49	4.04	1122.61	2379.60

4.1.2 南京市城区 2000~2010 年土地利用动态变化

根据土地利用动态模型(2),计算出 2000~2010 年南京市城区土地利用动态度(表 6)。由表 6 可以发现,耕地的单一土地动态度在这两期均是负值,这表明其面积总量呈现逐年递减的趋势;同时建设用地和林地单一土地动态度表现为正值,说明他们的面积总量呈现逐年增加的趋势;而水体和草地的动态度在前期为负,到后期转为正。2000~2010 年单一土地利用动态度最大的是草地,达-10.41%,其次为建设用地和耕地,分别是 7.23%和-2.96%,最小的是水体,仅有-0.78%;2006~2010 年这段时期内,林地和建设用地的动态度一直是正数,而且分别以每年 4.93%和 5.21%的速度迅速增加。整体看来,草地变化速率最为

突出，其次为建设用地和耕地，而水体变化速率最慢，特别是在 2000~2006 年，水体面积的变化速率及其细微，为-0.78%。建设用地和草地动态变化呈现出前期变化速率快，后期变化速率慢。耕地、林地的动态显示和草地相反的特征，即前期变化速率慢，后期变化速率快。

表 6 2000~2010 年南京市城区单一土地利用动态度

类型	2000~2006		2006~2010	
	变化幅度 (km ²)	动态度 (%)	变化幅度 (km ²)	动态度 (%)
建设用地	222.23	7.23	153.1	5.21
林地	35.52	1.91	68.04	4.93
水体	-8.55	-0.78	13.42	1.93
草地	-6.72	-10.41	1.16	7.16
耕地	-242.48	-2.96	-235.72	-5.25

从表 7 中可以看出，2000-2006 年、2006~2010 年南京市城区综合土地利用动态度分别为 2.4%、3.26%。这一现象表明在 2000~2006 年每年每 100km²的土地有 2.4km²土地面积发生变化，而到 2006~2010 年这一变化量达到 3.26km²。这一变化揭示出土地利用类型发生了较大的改变，主要是城市化进程加快，人为干扰加重，干扰幅度越大，土地利用动态变化就表现越剧烈。对比前后两时期综合土地利用动态度可以发现，后一时期动态度比前一时期多 0.86%。

表 7 2000~2010 年南京市城区综合土地利用动态度

类型	2000~2006 年	2006~2010 年
	转换为其他类型的面积 (km ²)	转换为其他类型的面积 (km ²)
建设用地	144.39	133.78
林地	70.13	75.24
水体	29.94	17.11
草地	10.42	4.04
耕地	431.62	390.92
综合动态度 (%)	2.40	3.26

4.2 地表温度与土地利用类型关系

4.2.1 不同土地利用类型与地表温度的关系

因为城市不断发展与扩张，地表温度也发生了巨大变化，为此土地利用类型与地表温度息息相关，统计不同时期的南京市城区各个土地利用类型与地表温度的关系如下（表 8）。

表 8 地表温度反演结果分布特征

时期	地物类型	平均值 (°C)	最大值 (°C)	最小值 (°C)	方差
2000 年	建设用地	32.92	44.21	21.05	1.95

	林地	28.46	38.42	23.03	2.01
	水体	23.24	43.75	19.94	3.55
	草地	30.71	38.39	24.67	1.94
	耕地	30.24	40.38	21.01	1.82
	建设用地	34.03	50.74	20.54	2.53
2006 年	林地	29.68	40.56	23.21	1.45
	水体	23.2	41.69	21.07	2.27
	草地	31.93	38.62	26.59	1.47
	耕地	30.52	46.03	21.68	1.91
	建设用地	22.47	36.92	6.70	1.92
2010 年	林地	19.72	31.13	12.55	1.34
	水体	15.72	34.30	9.40	1.54
	草地	24.51	32.96	8.36	2.23
	耕地	19.18	33.42	9.4	1.68

从表 8 可以看出, 这 3 个时期的遥感影像地表平均温度相比较, 2000 年的平均温度为: 建设用地>草地>耕地>林地>水体; 2006 年的平均温度为: 建设用地>草地>耕地>林地>水体; 2010 年的平均温度为: 草地>建设用地>林地>耕地>水体。建设用地和草地基本上是温度最高的土地利用类型, 而水体的平均温度最低, 主要因为水体尤其是大型的水体能够蒸发散热, 能够吸收周围环境中大量的热量, 同时水的比热容比较大, 温度增加的缓慢, 因此水体的温度相对较低, 例如长江和玄武湖。建设用地和草地的平均温度相对较高, 因为这些土地利用类型表面沙石较多, 地表相对裸露, 植被覆盖度低, 从而吸收较多的太阳辐射, 升温相对较快。林地的温度基本上比草地和耕地的温度低, 因为植物通过叶片的蒸腾作用, 持续的从周围环境中吸收热辐射, 降低环境中的温度, 同时还通过浓荫遮挡太阳直接辐射, 所以林地的温度较低。

可以发现在 2000 年和 2006 年, 建设用地的地表温度最高, 而在 2010 年草地的地表温度却比建设用地高, 主要因为 2010 年遥感影像数据获取时间是 4 月 29 号, 在该年 2、3、4 月份均出现多次连雨雪天气, 导致青草相对 2000 年和 2006 年生长缓慢, 草地相对较为裸露, 能够吸收更多的太阳辐射。又由于多次雨雪天气使得建筑用地的低洼地区积水较多, 建设用地升温较慢, 所以建设用地的温度比草地温度略低, 同时使得南京市的所有地物类型的地表温度均较低。

4.2.2 温度植被指数 (TVX) 空间轨迹分析方法

为了将误差降到最低, 本文采用较长的时间周期, 本文使用 ENVI 中的 Change Detection 比较 2000 年和 2010 年两期的土地利用类型图, 并在 ARCGIS 中将 2000 年中在 2010 年转化成建设用地的土地利用类型提取 (图 4)。再结合 ENVI 和 MATLAB 计算出 2000 年和 2010 年其发生变化的植被覆盖度和归一化地表温度, 以归一化地表温度为横坐标, 植被覆盖度为纵坐标, 构建基于土地利用类型的 TVX 空间, 得到 TVX 空间变化轨迹^[15] (图 5), 再通过计算各土地利用类型变化向量幅度分析其变化对热环境的影响, 可以研究地表温度的时空变化特征, 探究土地利用变化导致的城市热岛效应。

由图 4 可知, 2000~2010 年, 大量的耕地、林地等被建设用地占用, 建筑用地的面积不断增加。随着林地、草地和耕地等转变为建设用地, 植被覆盖度和地表温度发生显著的变化。在 2000 年, 植被覆盖度较高的林地、耕地等在 TVX 空间的西北角, 它们的植被覆盖度分别为 0.88 和 0.64, 但却对应着较低的温度分别为 0.35 和 0.42。随着经济的迅猛发展和人们生活水平的提高, 耕地和林地等被大量占用, 耕地变建设用地表现的最为明显, 被占用的土地利用类型慢慢沿斜线方向向东北角运动, 表现出植被覆盖度不断减少而温度却迅速上升。到 2010 年, 不同土地利用类型的聚类点的运动轨迹趋于一点 (图 5)。

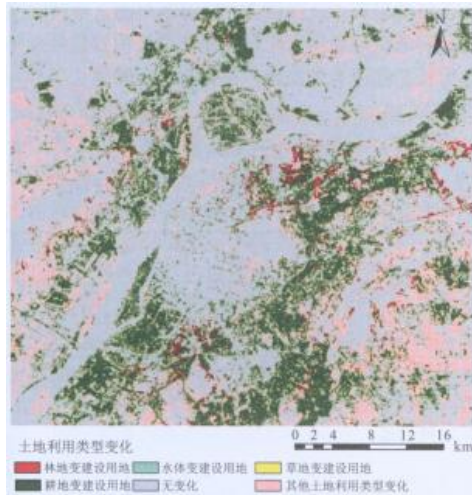


图 4 南京市城区 2000~2010 年土地利用类型变化图

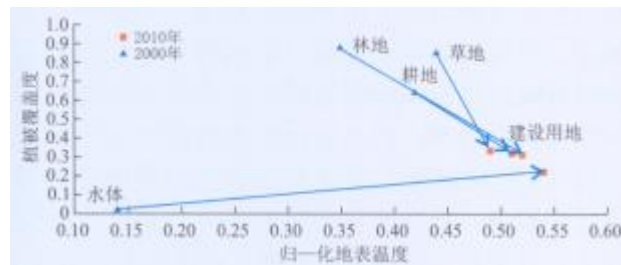


图 5 TVX 空间变化轨迹

分析各土地利用类型变化向量幅度（表 9），林地、水体、草地和耕地在向建设用地转变时，其变化向量幅度不同，即建设用地占用其他土地利用类型所引起的植被覆盖度和地表温度不同，各自对环境的贡献也不一致。变化向量幅度越大表示该土地利用类型的变化引起的热环境变化越显著。林地、水体、草地和耕地转变为建设用地变化向量幅度依次是：林地>草地>水体>耕地，由此可以发现，林地对缓解热环境作用最强，只要因为林地的植被覆盖度较高，可以遮挡太阳的直接辐射，其次是草地和水体，所以在城市规划中应尽量保护林地和草地，爱护水域。

表 9 2000~2010 年土地变化向量统计

土地利用类型		变化向量幅度
2000 年	2010 年	
林地	建设用地	59.5
水体	建设用地	44.7
草地	建设用地	52.2
耕地	建设用地	33.2

4.3 不同土地利用类型指数与地表温度的关系

为了定量研究不同土地利用类型与地表温度的关系，本文选取了 2 个指数 NDVI 和 MNDWI，分析它们与地表温度之间的相关性，从而为缓解南京市热环境提供有效的解决方案。利用 ENVI 软件分别对 2000 年南京市的 NDVI 和 MNDWI 进行计算，生成南京市 NDVI 和 MNDWI 分布图，再运用 MATLAB 分别对不同土地利用类型的 2 个指数和地表温度进行线性回归分析。

4.3. 1NDVI 与地表温度的关系

由于水体的 NDVI 为 0 或者负值，且它的温度往往最低，所以在研究水体和其地表温度时往往做水体掩膜处理，说明用 NDVI 作为地表热特征指标表达的并不是连续的区域表面，具有一定的局限性^[16]。从表 10 可以看出，NDVI 和地表温度呈负相关，相关系数为-0.576，说明 NDVI 值越大，相对应的地表温度的值就越小；反之，NDVI 值越小，则对应的地表温度值就越大。且在不同土地利用类型中，林地的相关性表现的最明显，表明植被覆盖度越高的地方，地表温度就越低，表明其对缓解城市热岛效应具有显著作用。为了进一步研究水体对地表温度的影响，故引入 MNDWI 指数。

表 10 不同土地利用类型的 NDVI 与地表温度的线性回归方程

土地利用类型	回归方程	相关系数
建设用地	$y=-6.722x+34.474$	-0.294
林地	$y=-13.987x+37.267$	-0.559
草地	$y=-16.234x+40.502$	-0.512
耕地	$y=-2.196x+31.269$	-0.129
总体	$y=-8.457x+34.303$	-0.576

4.3. 2MNDWI 与地表温度的关系

从表 11 可以看出，MNDWI 与地表温度呈负相关，相关系数达-0.607，且水体的负相关系数最强，相关系数为-0.891，说明水体具有较强的降温作用，在南京市的城市规划中可以适当修建?工水体来缓解城市热岛效应。且耕地的 MNDWI 的相关系数也呈现出较高的负相关，说明它在 MNDWI 分布图上亮度值较高，主要因为南京市的耕地类型以水田为主，土壤中含水量较高。

表 11 不同土地利用类型的 MNDWI 与地表温度的线性回归方程

土地利用类型	回归方程	相关系数
建设用地	$y=2.497x+33.433$	0.078
林地	$y=6.998x+30.860$	0.182
水体	$y=-16.465x+31.093$	-0.891
草地	$y=9.423x+34.190$	0.124
耕地	$y=-7.529x+28.894$	-0.408
总体	$y=-8.926x+28.655$	-0.607

4.4 土地利用驱动力分析

土地利用变化驱动力因素，是指导致土地利用类型、目的发生变化的主要生物物理因素和社会经济因素^[17]。可以分为自然和社会经济两种驱动力。史利江等^[18]对上海市土地利用变化的驱动机制进行定量分析，揭示出上海耕地面积变化的主要驱动力

主要为经济发展、人口（主要表现为城市发展）和人民生活水平提高等因素。对于南京市来说，在 2000~2010 年其自然因素比较稳定，社会经济政策是主要的土地利用驱动力，根据中国城市统计年鉴数据统计分析，可归结为以下几个：

(1) 人口数增长。当一个地区人口数量增加，必然导致人们对衣食住行的需求加大，从而导致建设用地的扩张，使得南京市城区的土地利用类型发生了显著的变化。从表 12 中可以发现，2000~2010 年，南京市城区人口数呈现迅速增加的趋势，其中 2000~2006 年表现的较为突出。

(2) 经济发展。随着一个地区的经济高速发展，人们生活水平的提高，就会使得城镇化进程加快，使得大量的农业人口流入城镇，从而使得建设用地增加，大量的耕地减少。南京市城区 GDP 总值由 2000 年的 775.6 亿元增加到 2010 年的 4515.22 亿元，增幅为 482.16%。

(3) 土地政策和农业技术发展。土地政策制度可以制约或促进城市土地利用类型的变化。如近几年来国家颁布了封山育林、退耕还林等政策，由于国家加强了宏观经济调控，实施土地用途管制，耕地减少的趋势得到有效缓解。虽然耕地减少的比例有所缓解，但是由于农业技术的飞速发展，使得第一产业占 GDP 的比重随之变大。

表 12 南京市城区 2000~2010 年人口数、GDP 总量和第一产业占 GDP 的比重

年份	人口数 (万人)	GDP 总值 (亿元)	第一产业占 GDP 的比重 (%)
2000	282.29	775.60	1.00
2006	513.39	2559.00	2.50
2010	543.61	4515.22	2.58

综上所述，南京市城区土地利用变化的驱动因素中，社会经济因素尤其是土地政策的颁布，要远大于自然因素，所以社会经济因素对南京市城区这 10a 间的土地利用变化起主导作用，主要包括人口数增长、经济水平发展、农业技术发展等。

5、结论

本文利用 GIS 和 RS 方法相结合，分析了南京市 2000-2010 年 10a 的土地空间格局的时空分布及其变化特征和地表温度分布规律，研究发现：南京市主要土地利用类型是建设用地和耕地，且建设用地呈不断增长的趋势，而林地却在减少，主要转为建设用地，水体和草地面积基本保持稳定，林地面积略有增长。从综合土地利用动态度可以发现，后 5a 每年土地面积变化程度比前 5a 变化显著。南京市城区土地利用变化的驱动因素中，社会经济因素起主导作用，主要包括人口数增长、经济水平发展、农业技术发展等。主要由于城市化进程加快，人口数不断增加对建设用地的需求增大，导致大量的耕地面积的减少。

2000~2010 年，南京市城区高温区的面积在不断扩大，主要围绕紫金山和玄武湖的一条向南延伸的环形带，环形带中西面和北面地区温度相对较高，低温区的面积却在持续减小。且不同土地利用类型的地表温度差异较大，其中建设用地和草地温度最高，而水体的温度相对较低。主要因为水体尤其是大型的水体能够蒸发散热，能够吸收周围环境中大量的热量，同时水的比热容比较大，温度增加缓慢。建设用地和草地的平均温度相对较高，因为其表面沙石较多，地表相对裸露，植被覆盖度低，从而吸收较多的太阳辐射，升温相对较快。

通过构建 TVX 空间发现，随着城市化过程的加速，大量的耕地、林地等被建设用地占用，被占用的土地利用类型慢慢沿斜线方向向东北角运动，对应着较高的温度和较低的植被覆盖度，表明城市化过程中，植被覆盖度不断减小，地表温度却迅速增

加。变化向量幅度是：林地>草地>水体>耕地，由此可以发现，林地对缓解热环境作用最强。

NDVI 和地表温度呈负相关，林地的相关性表现的最明显，表明其对缓解城市热岛效应具有显著作用。MNDWI 与地表温度也呈负相关，且水体的负相关系数最强，说明水体具有较强的降温作用，在南京市的城市规划中可以适当修建人工水体来缓解城市热岛效应。

本研究所使用的卫星遥感影像中的热红外波段的空间分辨率较低，混合像元的存在使得反演出的地表温度是像元水平上的平均温度，而不是真实的地表温度^[19~23]。随着遥感技术的发展，可以选择高光谱分辨率的遥感影像数据，来提高研究的精度，同时对地表组分温度进行反演，通过设计算法获取混合像元中代表真实地物的组分温度，并以此为基础研究基于组分温度的城市热岛现象。

[参考文献]:

- [1]PAETH H, BORN K, GIRMES R , et al .Regional climate change in tropical and northern Africa due to green house forcing and land use changes[J].Journal of Climate, 2009, 22 (3) : 114-132.
- [2]FEDDEMA J J, OLESON K, BONAN G , et al. How important is land cover change for simulating future climates?[J].Science, 2005, 310 (5754) : 1674-1678.
- [3]HANSEN J, NAZARENKO L, RUEDY R , et al .Earth' s energy imbalance: confirmation and implications[J].Science, 2005, 30 (8) : 1431-1435.
- [4]IPCC. IPCC fourth assessment report: climate change2007 (AR4) [C].Geneva , Switzer land, 2007.
- [5]王明娜, 韩 哲, 张庆云. 21 世纪初中国北方半干旱区土地利用变化对地表温度的影响[J]. 气候与环境研究, 2016, 21 (1) : 65-77.
- [6]杜培军, 陈 宇, 谭 琨. 江苏滨海湿地土地利用/覆盖变化与地表温度响应遥感监测[J]. 国土资源遥感, 2014, 26 (2) : 112-120.
- [7]朱玲燕, 苏维词. 典型喀斯特城区土地利用变化对地表温度的影响分析[J]. 环境保护科学, 2016, 42 (2) : 60-64.
- [8]刘纪远, 匡文慧, 张增祥, 等. 20 世纪 80 年代末以来中国土地利用变化的基本特征与空间格局[J]. 地理学报, 2014, 69 (1) : 3-14.
- [9]张学工. 关于统计学习理论与支持向量机[J]. 自动化学报, 2000, 26 (1) : 32-41.
- [10]刘纪远, 刘明亮, 庄大方, 等. 中国近期土地利用变化的空间格局分析[J]. 中国科学(D)辑, 2002, 32 (12) : 1031-1040.
- [11]赵英时. 遥感应用分析原理和方法[M]. 北京: 科学出版社. 2003: 140-130.
- [12]高 艳. 基于辐射传输方程和分裂窗算法的 Landsat8 数据地表温度反演对比研究[J]. 甘肃科技, 2016, 32 (2) : 43-45.

-
- [13]OWEN T W, CARLSON T N, GILLIES R R .Assessment of satellite remotely-sensed land cover parameters in quantitatively describing the climate effect of urbanization[J].International Journal of Remote Sensing, 1998, 32 (19) : 1663-1681.
- [14]KIDDER S Q, WU H T .A multi-spectral study of the st .louis area under snow-covered conditions using NOAA-7AVHRR data[J].Remote Sensing of Environment, 1987, 22 (2) : 159-172.
- [15]JIANG J, TIANG J .Analysis of the impact of land/use cover-age changeon land surface temperature with remote sensing[J].Procedia Environmental Sciences, 2010 (2) : 571—575.
- [16]钱乐祥, 崔海山. 归一化水汽指数与地表温度的关系[J].地理研究, 2008, 27 (6) : 1358-1366.
- [17]路云阁, 许月卿, 蔡运龙. 基于遥感技术和 GIS 的小流域土地利用/覆被变化分析[J].地理科学进展, 2005, 24 (1) : 79-86.
- [18]史利江, 王圣云, 姚晓军, 等. 1994~2006 年上海市土地利用时空变化特征及驱动力分析[J]. 长江流域资源与环境, 2012, 21 (12) : 1468-1479.
- [19]郑文武, 曾永年, 城市尺度组分温度的 ASTER 数据遥感反演[J]. 地球信息科学学报, 2012, 14 (5) : 658-665.
- [20]庄家礼, 陈良富, 徐希孺, 地表组分温度反演[J]. 北京大学学报 (自然科学版), 2000, 36 (6) : 850-857.
- [21]何立明, 阎广建, 王锦地, 等, 利用 ATSR-2 数据提取地表组分温度[J]. 遥感学报, 2002, 6 (3) : 161-167.
- [22]孙 珂, 陈圣波. 基于遗传算法综合 Terra/Aqua MODIS 热红外数据反演地表组分温度[J]. 红外与毫米波学报, 2012, 31 (5) : 462-468.
- [23]杨锦鑫, 贾 立. 基于双角度 AATSR 遥感数据的组分温度反演[J]. 遥感技术与应用, 2014, 29 (2) : 247-257.