

基于马尔科夫模型的郑州市城市热岛效应分析及预测

吴宝军, 雷雅凯, 段彦博, 彭丹丹, 田国行

(河南农业大学 林学院, 郑州 450002)

摘要:基于4期TM遥感影像数据对郑州市热环境的空间动态变化过程进行了分析,并应用马尔科夫模型预测了郑州市未来9年的热环境发展趋势。结果表明:2000—2013年,郑州市热岛效应随着城市发展方向的移动,四环以内的热岛类型正趋于恶化,三环内热岛类型由次低温区、中温区向高温区转移,三环至四环区域内,热岛类型由次低温区向中温区转移,四环以外东南部受到工厂外迁引起的地表温度升高,其余大部仍处于次低温区。未来9年,在现有人为因素干扰的情况下,郑州市四环内的热岛效应可能会加剧,截至2022年,低温区、次低温区、中温区、高温区、超高温区的热岛类型面积比例分别为0.41%,21.01%,68.96%,9.19%,0.38%。植被减少及建筑物增多是热岛效应增强的主要原因,植被以及水域具有很好的“冷岛”效应,对城市热岛效应具有明显的消减作用。

关键词:热岛效应;马尔科夫模型;郑州市

中图分类号:X171.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2017)03-0241-05

Assessment and Prediction of Urban Heat Island Effect in Zhengzhou City Based on Markov Model

WU Baojun, LEI Yakai, DUAN Yanbo, PENG Dandan, TIAN Guohang

(College of Forestry, He'nan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: The dynamic changes of the thermal environment were analyzed based on the TM remote sensing of Zhengzhou City, and the thermal environment development trend in the next 9 years was predicted by the Markov model. The results showed that during the period from 2000 to 2013, the heat island effect changed with the movement of urban development in Zhengzhou City. The heat island type within the fourth Rings deteriorated. The heat island type in the third ring was transferred from the sub low temperature zone and the middle temperature zone to the high temperature zone. The heat island type was transferred from the sub low temperature zone to the middle temperature zone between the third ring and the fourth ring region. The rise of surface temperature of southeast fourth ring region was caused by the factory relocation. Most of the rest zones were still in the low temperature regions. In the next 9 years, the effect of urban heat island in Zhengzhou City is likely to be intensified by the existing human factors. By the end of 2022, the areas of heat island in the low temperature zone, sub low temperature, middle temperature zone, high temperature zone, and super high temperature area were 0.41%, 21.01%, 68.96%, 9.19%, and 0.38%, respectively. The decrease of vegetation and the increase of buildings were the main reasons for the enhancement of heat island effect, and vegetation and water area will decrease the heat island effect.

Keywords: heat island effect; Markov model; Zhengzhou City

近年来,快速的城市化进程使城市规模不断扩大,城市人口急剧增加,导致大面积的自然下垫面被水泥、沥青等人工材料所取代,加之居民日常生活、生产及交通等排放大量人为热,使城市热岛效应愈演愈

烈^[1-4]。城市热岛效应的日益严重不但对自然环境造成许多异常现象,同时对居民身体健康造成巨大威胁^[5-8]。各国学者运用定点观测、气象站观测、样带运动、遥感观测、气象模拟^[9-13]等方法对其产生的机理、

收稿日期:2016-04-11

修回日期:2016-05-27

资助项目:国家自然科学基金(31600579);河南省科技攻关(162102310093);国家自然科学基金(41401206);河南农业大学博士科研启动项目(30600407);河南省交通厅项目(2013J49);河南省交通厅项目(2014Z06)

第一作者:吴宝军(1991—),男,河南郑州人,硕士研究生,研究方向为风景园林规划与设计。E-mail:93658508@qq.com

通信作者:田国行(1964—),男,河南新乡人,博士,教授,主要从事城市绿地资源建设与管控研究。E-mail:tgh081@163.com

演变过程、分布规律以及缓解措施进行了大量的试验研究,并取得大量成果。万志红等^[14]对沈阳市 46 a 的气象数据进行了分析研究,并得出沈阳市热岛效应每年以及每季动态变化规律。张景哲等^[15]通过定点观测法对北京市热岛效应进行分析研究,得出北京市的空间分布特征及所具有的热岛类型。郭勇等^[16]使用 GPS 系统根据样带运动研究方法对北京市区内不同下垫面性质对城市局部地区小气候的影响和气象分布特征进行了研究。刘勇洪等^[17]通过遥感对北京市 1990—2012 年的热岛分布进行研究得出北京市的城市热岛走向并对 2020 年北京市的城市热岛效应进行预测分析。本文通过对郑州市热岛效应动态变化进行分析,同时运用马尔科夫过程对郑州市未来 9 a 的热岛效应变化情况进行预测分析,研究郑州市热岛效应的动态演变规律并预测出未来的发展趋势,提前预知城市热岛效应未来的发展状态,对城市规划部门制定城市未来发展方向的相关政策提供依据和指导,希望做到源头解决代替终端处理。

1 研究区与研究方法

1.1 研究区概况

郑州位于东经 112°42′—114°14′,北纬 34°16′—34°58′,河南省中部偏北,地处华北平原南部。北临黄河,西依嵩山,东南为广阔的黄淮平原。西南部是黄土丘陵,向北过渡为黄土平原。郑州市是中国中部地区重要的工业城市,全国重要的铁路、航空、高速公路、电力、邮政电信主要枢纽城市。郑州市属于北温带季风气候,年平均气温 14~14.3℃,年平均降雨量 640.9 mm。

1.2 研究方法

1.2.1 数据来源 本研究选用美国地球资源卫星图像作为遥感数据源,选取 2000 年 5 月 30 日、2004 年 6 月 11 日、2009 年 6 月 25 日、2013 年 6 月 4 日覆盖郑州市地区的 4 个时相的影像数据,其中 2000 年、2004 年、2009 年的数据为 Landsat 5 TM 数据,2013 年的数据为 Landsat 8 OLI 数据。2000 年、2004 年、2009 年及 2013 年的轨道号均为 112/35。地表温度反演中地表比辐射率(ϵ)、大气透射率(τ)均来自网站 <http://atmcorr.gsfc.nasa.gov/>。

1.2.2 单窗地表温度反演原理 热红外遥感技术反演地表温度的方法有大气校正法、单窗算法、通道算法、劈窗算法^[18]等。覃志豪等^[19]单窗算法仅需要 3 个地表参数通过算式推算出地表实际温度。根据地表温度的传导方程,因为要考虑到大气对辐射传输的影响,因此对反演得出的地表温度产生的误差将小于 1.1℃,当参数没有误差时,反演精度将小于 0.4℃^[20]。

$$T_s = \frac{\{a(1-C-D) + [(b-1)(1-C-D)+1]T_6 - DT_a\}}{C} \quad (1)$$

式中: T_s 为地表温度(K); T_6 为行星亮温温度; T_a 为大气平均温度(K); a, b 是参考系数($a = -67.355351, b = 0.458606$)^[19]; C, D 是中间变量由公式(3)–(4)可以求得,因此:

$$T_s = \frac{\{67.3554(C+D-1) + [0.54414(C+D) + 0.4586]T_6 - DT_a\}}{C} \quad (2)$$

$$C = \epsilon \cdot \tau \quad (3)$$

$$D = (1-\tau)[1 + (1-\epsilon)\tau] \quad (4)$$

式中: ϵ 是地表比辐射率; τ 是大气透射率^[21]。

1.2.3 马尔科夫模型 马尔科夫模型其原理为系统由一种状态转变为另一种状态,两种状态之间存在着一定的转移概率,在通过给定当前的数据信息,利用事物状态之间的转移概率矩阵,预测事物发生或发展的状态以及发展变化趋势,系统将来所要预测的状态只跟系统当前的状态紧密相关,与系统过去的状态无关^[22]。其数学表达式为:

$$V(t+1) = V(t)P^k \quad (5)$$

式中: k 为起始年份到末尾年份之间的整步长,即 $k = (T_{末} - T_{始})n$ ($n = 1, 2, \dots, n$)。马尔科夫模型在热岛的应用中, $V(t)$ 是由 n 类热岛类型的面积初始值构成的 n 维向量, P 为初始转移概率矩阵^[22-23]。其表达式为:

$$P = (p_{ij}) = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ P_{n1} & P_{n2} & \dots & P_{nn} \end{bmatrix} \quad (6)$$

转态转移矩阵 P 应满足下列两个公式:

$$0 \leq P_{ij} \leq 1 \quad (7)$$

$$\sum_{j=1}^N P_{ij} = 1 \quad (8)$$

2 结果与分析

2.1 郑州市热岛效应动态分布及演变规律

本文所用 4 期影像之间存在时相的差异,无法直接进行对比分析。为了尽可能地消除时相给试验带来的影响,将各期影像反演出的地表温度,在 ArcGIS 的支持下归一化处理,使地表温度数值分布在 0~1,其表达式为:

$$T_s = \frac{T_i - T_m}{T_m} \quad (9)$$

式中: T_s 表示相对地表温度; T_i 表示研究区每个像元的地表温度; T_m 表示研究区平均地表温度。根据温度对人体的舒适度将研究区的热岛效应分为 5 个等级(图 1)。

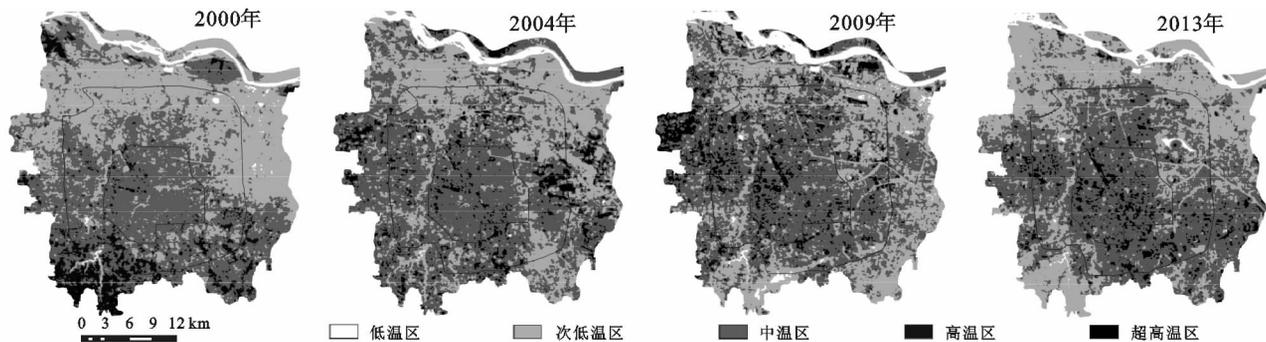


图1 2000年、2004年、2009年、2013年郑州市相对地表温度等级分布

将郑州市4期的相对地表温度等级分布图与Google地图进行叠加分析得出,低温区主要是黄河、如意湖、龙湖、西流湖、尖岗水库等具有大面积水域的区域,次低温区主要以绿地、公园、具有高绿地率的住宅区及高校校园为主,中温区主要以具有一定绿地率高层住宅区及多层住宅区、企业单位为主。高温区主要以裸地、未利用地、工厂、贸易市场、商业中心为主,超高温区主要分布在具有大范围高温区的中间位置,以大型贸易市场中的活动板房,以及工厂中的生产车间为主。

通过ArcGIS软件将2013年和2000年相对地表温度等级分布图差值计算,即2013年减去2000年的相对地表温度数据,得到差值影像图(图2)。图例中正数表示地表温度级别上升的区域,数值越大,温度级别增加的越多。负数表示地表温度级别下降的区域,绝对值越大说明亮温级别降低的越明显。从差值影像图中可以看出2000—2013年郑州市东部及北部热岛类型增加比较显著,与郑州市城市发展方向十分一致。

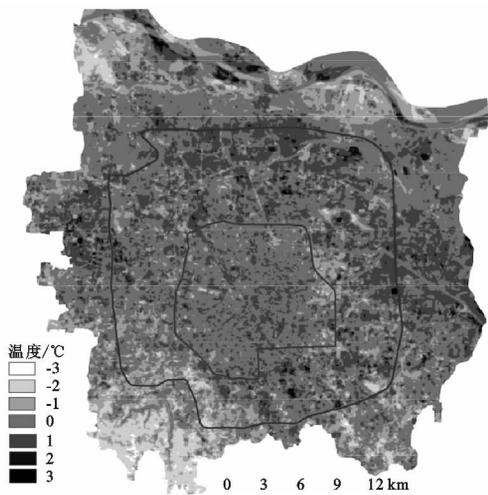


图2 地表温度分布变化

将研究区分为三环以内、三环至四环、四环外3个部分对4期影像进行对比分析(图3),结果显示,三环内次低温区和中温区面积都在逐年减小,高温区在逐年增加,说明三环内的热岛类型正在从低级向高

级转变。2000—2013年三环至四环范围内,次低温区面积所占此区域的百分比由44.83%减少至27.53%,中温区面积由49.29%增加为68.28%,此现象说明郑州市城市化快速进程使建设用地急剧扩张,导致大范围的热岛类型由次低温区向中温区发生急剧转变。高温区由2000年逐年增加至2009年到达最大值后再次减少,其原因为郑州市2002年开始进行大规模的郑东新区建设,出现大范围地表裸露的施工用地,因此高温区逐年增加,随着郑东新区逐渐竣工,加之大片绿地和水域的修建,高温区再次出现减少的现象。四环外,次低温区、高温区先减少后增加,中温区先增加后减少,其原因有:(1)城市化的扩张导致的建筑用地进一步侵占绿地农田,使次低温区发生向中温区转移。(2)2000年郑州市南部尖岗水库附近周围具有大面积裸地,为主要高温区、超高温区分部区域,后来进行尖岗森林公园建设,热岛类型由高温区、超高温区逐级向次低温区转移。(3)大多数的生产加工厂及贸易市场外迁至四环以外,致使活动板房和生产车间增多导致高温区再次增加。

2.2 郑州市热岛效应预测分析

本文选用的马尔科夫模型对郑州市热岛效应的发展规律进行定量预测。马尔科夫模型是时间和状态都是离散的一种马尔科夫过程,时间与状态的离散型恰好能够与热岛效应的年份与热岛等级面积变化关系相符合^[15],因此对这种热岛类型短中期动态变化的预测较为合适。由于郑州市四环以外具有大量的麦田,6月份的第一个星期为麦收时期,热岛效应的强弱与地表植被覆盖度具有正相关性^[24],具有很高的人为干扰性,因此为了得出较为准确的预测结果,只对郑州市四环以内的区域进行预测。

2.2.1 转移概率矩阵的确定 以郑州市2004年四环内各热岛类型所占面积百分比为初始状态向量, $S(0) = (0.07, 28.6, 64.24, 6.87, 0.22)$,通过ArcGIS 10.0计算2004—2013年各热岛类型面积的转移情况,以此确定转移概率,2004—2013年各热岛类型面积的变化

情况(表 1)。

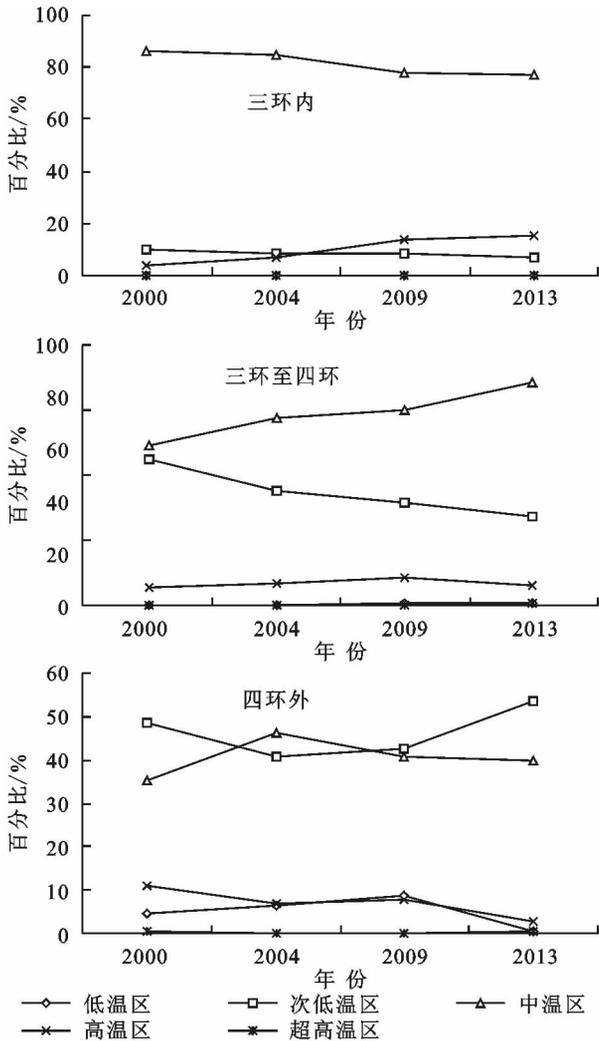


图 3 2004—2013 年热岛类型动态变化

表 1 2004—2013 年各热岛类型面积变化 km²

时间	类型	2013 年				
		低温区	次低温区	中温区	高温区	极高温区
2004 年	低温区	0.163	0.006	0.106	0.059	0.022
	次低温区	1.508	60.233	74.987	3.309	0.266
	中温区	0.259	44.727	239.037	30.7	0.49
	高温区	0	4.652	20.267	8.204	0.571
	极高温区	0	0.072	0.661	0.125	0.224

2.2.2 郑州市热岛效应变化趋势 由各级温区面积的转移情况可以求出各热岛类型面积的平均转移情

表 4 9a 内郑州市热岛类型面积比例

类型	2013 年(实测)	2013 年	2014 年	2016 年	2018 年	2020 年	2022 年
低温区	0.39	0.39	0.39	0.40	0.40	0.40	0.41
次低温区	22.36	24.01	22.16	21.79	21.49	21.23	21.01
中温区	68.29	67.13	68.39	68.57	68.72	68.85	68.96
高温区	8.64	8.23	8.72	8.87	8.99	9.10	9.19
超高温区	0.32	0.31	0.33	0.35	0.36	0.37	0.38

预测计算得到 2022 年郑州市各类热岛面积比例相对误差分别为 0, 8.94%, 1.70%, 4.75%, 3.12%,

况(km²/a),再由平均转化情况求出 2004—2013 年各热岛类型的转移概率矩阵(步长为 1 a),所得矩阵定义为初始状态转移概率矩阵(表 2)。

表 2 初始状态转移概率矩阵

时间	类型	k+1 年				
		低温区	次低温区	中温区	高温区	极高温区
k 年	低温区	0.9226	0.0019	0.0331	0.0184	0.0069
	次低温区	0.0012	0.9366	0.0594	0.0026	0.0002
	中温区	0.0001	0.0158	0.9731	0.0108	0.0002
	高温区	0	0.0153	0.0668	0.916	0.0019
	极高温区	0	0.0074	0.0679	0.0128	0.9119

注:n=0。

根据相关定义,通过 matlab 软件便能够计算出 2004 年以后各热岛类型的转移概率矩阵 P(n)中任意一年的各元素 P_{ij}(n)及各热岛类型所占的比例,因此可以计算出各级热岛类型的面积所占研究区总面积的比例。比如,通过得出的初始状态矩阵经过 n=9 步转移后便能求出 2013 年转移概率矩阵(表 3)。

表 3 2013 年转移概率矩阵

时间	类型	k+1 年				
		低温区	次低温区	中温区	高温区	极高温区
k 年	低温区	0.4845	0.0313	0.2424	0.0959	0.0321
	次低温区	0.0062	0.58	0.3828	0.0289	0.0016
	中温区	0.0011	0.1043	0.8284	0.0644	0.0017
	高温区	0.0006	0.1019	0.4161	0.4725	0.0088
	超高温区	0.0004	0.0668	0.4218	0.074	0.437

注:n=9。

运用马尔科夫模型便能预测郑州市 2013 年未来 9 a 时间各类型热岛所占研究区面积的比例(表 4)。在现有人为因素干扰的情况下,未来 9 a 中,除了次低温区出现逐渐减小的趋势以外,其余的 4 个热岛类型都出现增加的趋势。此现象说明在未来的一段时间内郑州市的城市会进一步使绿地面积减少,导致次低温区减少。高温区涨幅最大,其因素可能因为随着城市扩张会出现更多建筑工地,以及为了满足居民日常生活的需求,会出现更多的贸易中心及商业中心。

各热岛类型的预测相对误差均小于 10%,预测模型相对可靠。

3 结论与建议

(1) 2000—2013年,郑州市热岛效应由低级类型逐渐向高级类型过渡,说明随着城市的扩张,城市热岛效应正在趋于严重的现象。三环内热岛效应最为严重,三环至四环区域次之,四环以外较轻。

(2) 三环内由于商贸市场、步行街等聚集发展,大片的水泥路面和灰色建筑吸收大量太阳辐射能,加之对老城区改造的施工用地,导致高温区大量增加。三环至四环区域为这段时期主要城市化发展区域,房地产的迅速发展促使次低温区急剧减少,中温区急剧增加。四环外除受到一些厂房外迁造成的影响外,热岛效应相对四环以内轻了许多。

(3) 通过利用尔科夫模型对郑州市四环内预测得到的数据在维持现有的人为干扰环境下,在未来9a中,次低温区仍在保持减小的趋势,中温区、高温区、超高温区都在增加,说明在未来的一段时期内,郑州市四环以内热岛效应仍在恶化,绿地会进一步被建设用地所取代。

目前郑州市四环以内的高温、超高温区域所对应的地表类型主要是工厂、建筑用地、人口密集的商贸市场、大片聚集的活动板房等人工热源较多,地表裸露,植被极少的区域。水域以及植被具有很好的“冷岛”效应。因此,应对三环内人口密集的商圈,辅以冠幅较大的树木进行单点栽植,以覆盖水泥、沥青等人工路面,降低吸收太阳辐射,对建筑辅以垂直绿化及屋顶绿化;将人工热源较高的工厂迁移至市区以外,居民聚集较少且周围具有大片绿地的区域;规范市区以内对活动板房的大面积使用,少用甚至不用;希望有关部门对城市的无限扩张加以控制,控制人口规模,严格控制对四环以外的区域进行疯狂的城市化建设,充分利用高速公路及其边坡、城市立交、屋顶进行立体绿化,增加植被覆盖度,以实现“绿岛”消除“热岛”。

本次研究预测的结果,只是得到了各热岛类型所占研究区的比例,并没有实现对其空间的分布进行直观的描述,无法直观看到研究区各类热岛类型所发生的变化,因此需要进一步研究。

参考文献:

[1] 彭少麟,周凯,叶有华,等.城市热岛效应研究进展[J].生态环境,2005,14(4):574-579.
[2] 杨文娟,顾海荣,单永体.路面温度对城市热岛的影响[J].公路交通科技,2008,25(3):147-152.

[3] 刘艳红,郭晋平.城市景观格局与热岛效应研究进展[J].气象与环境学报,2007,23(6):46-50.
[4] 张一平,何云玲.昆明城市热岛效应立体分布特征[J].高原气象,2002,21(6):604-609.
[5] 赵静,宫阿都,徐捷.国内外城市热岛研究进展[J].自然灾害学报,2008,17(6):64-67.
[6] 徐心馨,李小娟,孟丹.北京市不同下垫面类型对热岛效应及人体舒适度的影响[J].首都师范大学学报:自然科学版,2013(3):47-52.
[7] 宋艳玲,张尚印.北京市近40年城市热岛效应研究[J].中国生态农业学报,2003,11(4):126-129.
[8] Wong N H, Yu C. Study of green areas and urban heat island in a tropical city[J]. Habitat International, 2005, 29(3):547-558.
[9] 曾侠,钱光明,潘蔚娟.珠江三角洲都市群城市热岛效应初步研究[J].气象,2004,30(10):12-16.
[10] 郭勇,龙步菊,刘伟东,等.北京城市热岛效应的流动观测和初步研究[J].气象科技,2006,34(6):656-661.
[11] 李兴荣,胡非,舒文军.北京夏季强热岛分析及数值模拟研究[J].气象,2007,33(6):25-31.
[12] 陈燕,蒋维楣,吴润,等.利用区域边界层模式对杭州市热岛的模拟研究[J].高原气象,2004,23(4):519-528.
[13] 张杨,江平,陈奕云,等.基于 Landsat TM 影像的武汉市热岛效应研究[J].生态环境学报,2012,21(5):884-889.
[14] 万志红,万志强.沈阳市热岛动态及其影响因素分析[J].防灾科技学院学报,2008,10(4):7-9.
[15] 张景哲,刘继韩,周一星,等.北京城市热岛的几种类型[J].地理学报,1984,39(4):428-435.
[16] 郭勇,龙步菊,刘伟东,等.北京城市热岛效应的流动观测和初步研究[J].气象科技,2006,34(6):656-661.
[17] 刘勇洪,徐永明,马京津,等.北京城市热岛的定量监测及规划模拟研究[J].生态环境学报,2014,23(7):1156-1163.
[18] 陈子通.静止气象卫星反演海温及其分析技术方法的研究[J].热带气象学报,2001,17(3):235-241.
[19] 覃志豪.用陆地卫星 TM6 数据演算地表温度的单窗算法[J].地理学报,2001,56(4):456-466.
[20] 陈育峰.我国旱涝空间型的马尔科夫概型分析[J].自然灾害学报,1995,4(2):66-72.
[21] 田振坤,黄妙芬,刘良云,等.使用单窗算法研究北京城区热岛效应[J].遥感信息,2006(1):21-24.
[22] 何成刚.马尔科夫模型预测方法的研究及其应用[J].合肥:安徽大学,2011.
[23] 温海彬,王友国.马尔科夫链预测模型及一些应用[D].南京:南京邮电大学,2012.
[24] 杨英宝,苏伟忠,江南,等.南京市热岛效应变化时空特征及其与土地利用变化的关系[J].地理研究,2007,26(5):877-886.