

# 基于环境一号卫星的太湖流域地表温度与地表类型的关系分析

孙 俊<sup>1,2</sup>, 张 慧<sup>1\*</sup>, 王 桥<sup>3</sup>, 沈渭寿<sup>1</sup>

1. 环境保护部南京环境科学研究所, 江苏 南京 210042
2. 南京市国土资源局江宁分局, 江苏 南京 211100
3. 环境保护部环境卫星应用中心, 北京 100029

**摘要:** 利用我国新发射的环境一号小卫星数据,以 2010 年 3 月 26 日环境一号卫星的红外波段为例,尝试根据同步 MODIS 数据反演大气水汽含量参数,采用 Jimenez-Munoz 和 Sobrino 的普适性单通道算法反演地表温度,经 MODIS 地表温度产品验证,地表温度反演精度满足要求. 将人工目视解译的 2009 年太湖流域土地利用、地表温度和归一化植被指数作相关关系分析. 结果表明:当林地和农田、草地植被指数相同时,林地的地表温度比农田和草地低,因此林地比农田和草地的调节温度效果好,在城市中增加林地的面积,对缓解城市热岛效应的作用最大.

**关键词:** 地表温度; 归一化植被指数; 环境一号卫星; 太湖流域

**中图分类号:** X16      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-6929(2011)11-0000-00

## Correlations between Land Cover Type and Surface Temperature of the Taihu Lake Basin Based on HJ-1 Satellite Data

SUN Jun<sup>1,2</sup>, ZHANG Hui<sup>1</sup>, WANG Qiao<sup>3</sup>, SHEN Wei-shou<sup>1</sup>

1. Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Environmental Protection, Nanjing 210042, China
2. Jiangning District of Nanjing Municipal Bureau of Land and Resources, Nanjing 211100, China
3. China Center of Environmental Satellite Data and Application, Ministry of Environmental Protection, Beijing 100029, China

**Abstract:** Based on thermal infrared images of the Taihu Lake Basin taken by the newly-launched HJ-1 satellite on March 26, 2010, atmospheric moisture content was inverted using synchronous modis data, and land surface temperature (LST) was inverted with the generalized single-channel algorithm (Jimenez-Munoz & Sobrino, 2003). LST could satisfy the accuracy requirement, as validated by using the temperature product of MODIS. Correlation analysis between artificial visual interpreting LST, NDVI and land use data of the Taihu basin in 2009 indicated that LST of forest was lower than that of farmland and grassland when the vegetation index of forest was same as that of farmland and grassland. Forest had better a temperature regulating effect compared with farmland and grassland. Increase of forest area in cities could effectively alleviate the urban heat island effect.

**Key words:** land surface temperature; NDVI; HJ-1 satellite; Taihu lake basin

收稿日期: 2010-12-21      修订日期: 2011-05-11

**基金项目:** 国家“十一五”科技支撑计划重点项目(2008BAC34B07-03, 2008BAC34B01-2); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07528-005)

**作者简介:** 孙俊(1986-),男,江苏盐城人,584845197@qq.com.

\* 责任作者,张慧(1964-),女,江苏南京人,研究员,博士,硕导,主要从事 GIS 和 RS 技术应用、景观评价、景观规划、生态环境质量评价、生态安全的研究,zhnies@126.com

陆地表面温度(Land Surface Temperature, LST)在地表与大气相互作用过程中起着重要作用,它在气象、地质、水文和生态等众多领域有着广泛的应用需求. 土壤水分状况和森林火灾的检测、地热位置的判别、军事伪装的应用、石油和铀矿的寻找等都离不开地物表面温度信息<sup>[1]</sup>. 在全球增暖和高速城市化进程的背景下,城市热环境反映着城市环境的改变,成为主导整个城市环境的要素之一<sup>[2]</sup>,因此,研究地表温度与地表类型的

关系可为政府的土地合理规划提供重要指导。

卫星遥感监测陆地表面温度是监测城市热环境变化的最直接方式之一,目前国内外许多学者利用不同的遥感数据源得出城市地表温度与地表类型高度相关。1993年 GALLO 等<sup>[3]</sup>运用由 AVHRR(高级甚高分辨率辐射计)数据获得的 *NDVI*(归一化植被指数)估测城市热岛效应,结果表明,同地表辐射温度一样,*NDVI*与城乡气温差异存在明显的线性关系,可用于监测城市热岛效应。WENG 等<sup>[4]</sup>利用 ETM(增强型专题绘图仪)数据对美国印第安纳波利斯市的研究发现,除水体外,*NDVI*与各种土地覆被类型的地表辐射温度呈负相关,二者相关系数与尺度有关。王勇等<sup>[5]</sup>定量分析了绿地格局与城市热岛效应的相关性及其对城市热岛的缓解机制,得出城市热岛效应在给定尺度上与植被盖度呈负相关,与绿地斑块密度指数和分维数呈正相关。王文杰等<sup>[6]</sup>利用1978年以来不同时间段的遥感影像对北京城市用地、绿地、植被指数、城市热岛区面积进行监测,分析了北京20余年来城市规模的变化及空间布局特征、城市绿地变化、城市热岛效应及植被指数相关关系。王艳姣等<sup>[7]</sup>利用 MODIS 遥感反演的地表温度资料,结合同期降水量、植被指数和地表反照率分析,得出夏季城市热岛最强,其他三季较弱。

为了加强环境保护和抗灾减灾能力,我国于2008年9月发射了环境一号2颗光学小卫星(A星和B星)。HJ-1A和HJ-1B卫星上均装有宽覆盖多光谱可见光相机(CCD)、红外相机(IRS)和超光谱成像仪(HSI)。多光谱可见光相机有4个波段,波段设置基本上与TM前4个波段相同,具有30m的分辨率,两星组网观测宽度可达720km,形成2d一个周期的观测能力。超光谱成像仪装载在HJ-1A星上,幅宽为50km,谱段范围为0.459~0.956 $\mu\text{m}$ ,共115个谱段,平均光谱分辨率为4nm,地面分辨率为100m,重访周期为4d。红外相机装载在HJ-1B卫星上,观测模式为星下点垂直观测,相机内设4个谱段,其中长波红外(10.5~12.5 $\mu\text{m}$ )对热特性敏感,可用来记录地表的发热特性,星下点空间分辨率为300m,重访周期为4d。环境一号具有重访能力强、分辨率高的特点,对实现环境和灾害大范围的动态监测提供了良好

的数据源。朱利等<sup>[8-11]</sup>利用环境一号卫星对水体叶绿素浓度反演和水质监测;王中挺等<sup>[12-15]</sup>研究了环境一号卫星在监测大气可吸入颗粒物、雾、陆地气溶胶以及土地利用等方面的应用。在前人的研究基础上,笔者利用HJ-1卫星数据,采用 Jimenez-Munoz & Sobrino 的普适性单通道算法反演太湖流域地表温度,研究地表温度的时空分布特征、地表温度与不同土地利用类型,*NDVI*的定量关系,以揭示土地利用类型与地表温度间的关系影响规律,为土地合理规划提供依据。

## 1 研究区概况

太湖流域面积约为36900 $\text{km}^2$ ,行政区划包括江苏省苏南地区,浙江省的嘉兴、湖州二市及杭州市的一部分,上海市的大部分地区(崇明县除外)。太湖流域以平原为主(占总面积的4/6),水面占1/6,其余为丘陵和山地。太湖流域位于中纬度地区,属湿润的北亚热带气候区。气候具有明显的季风特征,四季分明。太湖流域位于我国东部沿海经济较发达的地区,自改革开放以来,该地区工业化发展迅速,由以乡镇企业为主过渡到外资和民营企业的大力发展,吸引了来自全国各地的就业迁移人口,成为全国流动人口的主要集中区,同时城市扩张速度也加快,许多农田、坑塘变成了建设用地,下垫面的改变使得地表温度发生了变化,城市热岛的面积和强度也发生了巨大变化。

## 2 方法和数据处理

使用的遥感数据为2010年3月26日在太湖流域成像的环境一号卫星2景CCD影像数据(轨道号为449/76和449/80),1景IRS影像数据(轨道号为451/77),1景MODIS遥感数据和1景MOD11\_L2级MODIS的地表温度产品。首先根据已有的经过几何精校正的TM数据对环境一号卫星IRS数据和CCD数据进行几何校正,将几何误差控制在1个像元内;MODIS数据利用ENVI自带的GEOREFERENCE MODIS模块几何校正,去除蝴蝶结效应;利用太湖流域矢量边界数据裁剪遥感数据,只保留研究区域。

### 2.1 地表温度反演方法

针对不同的遥感卫星数据源,分别采用不同的方法反演地表温度。因Landsat TM(ETM)和CBERS-02(中巴地球资源卫星)仅有一个热红外

波段数据时,一般采用单通道算法. 利用单通道数据反演地表温度的算法主要有大气校正法、单窗算法和普适性单通道算法 3 种<sup>[16]</sup>. 其中普适性单通道算法具有较高的反演精度,只需要输入 MODIS 反演的大气水汽含量数据,而不需要额外的信息,操作简单. 由这 3 种算法可以看出,除地表比辐射率外,决定地表温度反演精度的关键在于大气参数的获取,因此有学者运用多源卫星数据反演地表温度. 张勇等<sup>[17]</sup>采用 TERRA/MODIS 的水汽产品数据,获取与反演地区时空同步的大气柱水汽总含量,对 Jimenez-Munoz 和 Sobrino 提出的普适性单通道地表温度反演算法进行改进,利用 CBERS-02 的热红外通道遥感数据反演北京地区和苏锡常地区的地表温度.

针对环境卫星只有一个热红外波段,笔者选择普适性单通道算法反演太湖流域地表温度,主要包括 4 个计算步骤:①根据辐射定标公式计算辐射亮度 ( $L_{\text{sensor}}$ ),根据普朗克函数计算亮温 ( $T_{\text{sensor}}$ );②根据 GAO 等<sup>[18]</sup>的研究,利用 MODIS 数据反演大气水汽含量 ( $w$ );③根据 GRIEND 等<sup>[19]</sup>的研究,计算比辐射率 ( $\varepsilon$ );④利用普适性单通道算法<sup>[20]</sup>反演地表温度.

## 2.2 地表温度精度检验

利用 NASA 提供的 MODIS 地表温度数据集进行相对验证. 利用 2010 年 3 月 26 日的覆盖太湖流域 MOD11\_L2 级 MODIS 温度产品验证算法精度,该产品是用 WAN 等<sup>[21]</sup>提出的多通道反演算法反演得到. 该算法是同时反演地表温度和比辐射率, WAN 等<sup>[22-23]</sup>对 MODIS 产品精度进行了评价,在晴朗的天气条件下,其反演精度在 1 K 以下. 该 MODIS 温度产品过境时间为上午 10:15,环境一号卫星热红外数据过境时间为上午 10:54,二者过境时间差距不大. 由于环境一号卫星热红外数据空间分辨率为 300 m,而 MODIS 地表温度产品空间分辨率为 1 000 m,所以环境一号卫星热红外数据需重采样到 1 000 m,以与 MODIS 数据保持一致. 经验证,该文算法结果和 MODIS 地表温度产品平均误差为 0.89 K,最大误差为 2.6 K,反演精度可以接受.

## 2.3 植被指数信息提取

为消除大气的影响,笔者利用基于图像本身

的最暗像元法大气校正,该方法直接、简易,校正精度可以满足一般遥感研究和应用,具有较强的实用性. 校正公式为:

$$\rho = \pi(L - L_p)/E_0 \cos\theta \quad (1)$$

式中, $\rho$  为经过最暗像元法大气校正后的地表反射率; $L$  为辐射亮度,  $W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$ ;  $L_p$  为大气程辐射(文中利用图像最暗像元值代替),  $W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$ ;  $\theta$  为太阳天顶角, ( $^\circ$ );  $E_0$  为大气层外相应波长的太阳光谱辐照度,  $W/(m^2 \cdot \mu m)$ .

NDVI 的计算公式:

$$NDVI = (\rho_4 - \rho_3)/\rho_4 + \rho_3 \quad (2)$$

式中, $\rho_3$  和  $\rho_4$  分别为环境小卫星在第 3 波段和第 4 波段的经过最暗像元法大气校正后的地表反射率. 由于环境一号卫星热红外数据空间分辨率为 300 m,而 CCD 数据空间分辨率为 30 m,为和热红外数据空间分辨率保持一致,提取的 NDVI 要重采样到 300 m 的空间分辨率.

## 3 结果分析

### 3.1 地表温度与地表类型的关系

为了定量研究土地利用类型与地表温度间的关系,首先对遥感数据进行土地利用分类. 利用 2009 年环境卫星 CCD 数据,结合 Google Earth 软件的高空间分辨率影像,对太湖流域人工目视解译,对于影像中无法判别地物类型的点位,经野外实地调查判别. 根据研究区地物类型的特点和研究目的,将研究区土地利用类型分为旱田、水田、林地(包括有林地、灌木林和疏林地)、草地(包括高、中、低覆盖草地)、水体(包括河流、湖泊、水库和鱼塘等)、城市建筑用地、农村居民用地、其他建设用地以及裸地(包括未开发用地和植被覆盖较少的土地)九大类.

在 GIS 技术支持下,将地表温度与地表类型数据进行掩膜和叠加分析,统计出不同地表类型的地表温度的平均值、标准差、最大值和最小值(见表 1). 由表 1 可知,研究区城镇用地和其他建设用地的地表温度的平均值都较高,由高到低的顺序为城镇用地 > 其他建设用地 > 农村居民用地 > 草地 > 其他未利用地 > 旱田 > 水田 > 林地 > 水体. 城镇用地地表温度平均值最高,主要是该类用地多由不透水表面(水泥、沥青等)组成,这些不透水物质吸热快且热容量小,在相同辐射条件下,它

们比绿地和水面等升温更快;此外,城镇用地上建筑物和人口比较密集,地表热量不易以显热方式扩散,同时潜热通量很小,吸收的能量易引起地表升温. 其他建设用地地表温度低于城镇用地,主要是因为太湖流域这类用地主要分布在郊区,地区空旷,周边植被较好,热量扩散较快. 地表温度标准差结果为水体 > 草地 > 其他建设用地 > 水田 > 林地 > 城镇用地 > 旱地、其他未利用地 > 农村居民用地. 这主要是因为太湖流域水质差异较大,鱼塘等部分水体水质富营养化,从而造成水体温度差异大;城镇用地、旱地、其他未利用地、农村居民用地结构相对简单,差异化较小;林地、草地主要受地面植被盖度、植被长势情况等影响,区域差异化较大;水田地表温度主要受田间水量多少的影响,差异化较大.

表1 各类地表类型的地表温度

Table 1 The land surface temperature of all kinds of surface types

地表类型	地表温度/K			
	平均值	标准差	最大值	最小值
水田	289.71	1.64	295	283
旱田	289.82	1.47	296	285
林地	289.65	1.53	294	284
草地	290.30	1.76	294	284
水体	288.32	1.8	290	282
城镇用地	291.09	1.48	297	285
农村居民用地	290.37	1.46	298	285
其他建设用地	290.83	1.72	299	284
其他未利用地	289.90	1.47	292	287

为了定量表示地表类型对太湖流域高温形成的影响,结合实际反演地表温度结果,统计了不同地表类型的数量面积在不同温度区间内所占的比例,以此来衡量不同地表类型对地表温度的贡献大小. 从表2可知,高温区中建设用地(包括城镇用地、农村居民用地和其他建设用地)的面积比例占有绝对优势,但随着温度的降低其所占比例明显减少,甚至在低温区和中温区所占比例均为0;水田和旱田在次高温区面积比例占有绝对优势,这主要是因为研究所选时间段正是农作物生长初期,遥感影像上收到的信息主要来自裸土而非植物;林地和草地在中温区和次高温区面积比例占有较大份额,说明二者在降低地表温度方面起着重要作用,这主要是因为林地和草地的呼吸作用

可以吸收热量,同时可以增加空气湿度;水体在低温区和中温区中的面积占绝大部分,尤其是低温区,这说明水体地表温度较低. 林地、草地和水体可以明显降低地表温度,在公路旁、住宅区、工业区等人口密集或热量排放高的区域种植树木和花草,可有效抑制城市热环境的恶化;在城市中建设大型公园,开凿人工湖泊,也可以明显地降低城市地表温度.

表2 各温度等级中不同地表类型面积所占比例

Table 2 Area percentage of all kinds of surface types

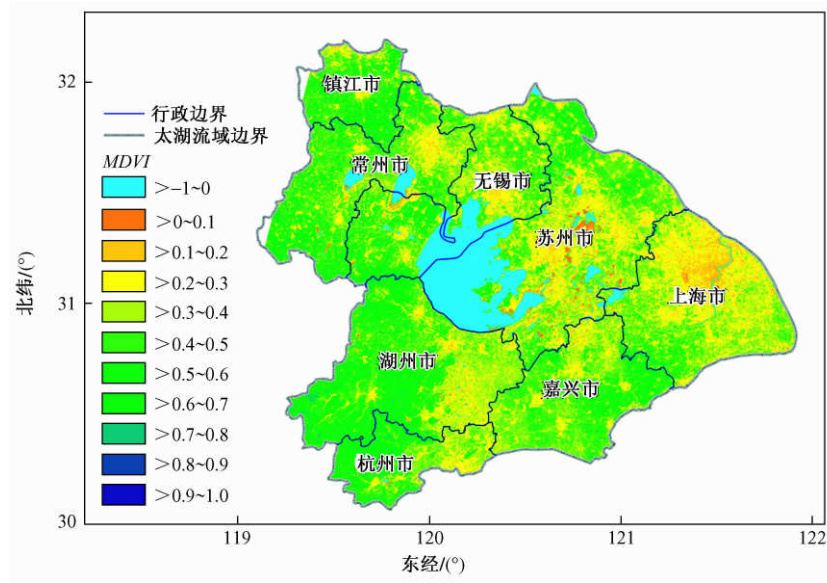
地表类型	面积所占比例/%			
	低温区 (280 ~ 284 K)	中温区 ( >284 ~ 288 K)	次高温区 ( >288 ~ 292 K)	高温区 ( >292 ~ 296 K)
水田	0	0.42	93.10	6.48
旱田	0	0.25	93.77	5.97
林地	0.69	33.02	64.75	1.54
草地	3.09	34.02	59.79	3.09
水体	33.48	53.31	12.94	0.26
城镇用地	0	0	54.48	45.52
农村居民用地	0	0.14	60.81	39.05
其他建设用地	0	0	44.11	55.89
其他未利用地	0	12.50	87.50	0

### 3.2 地表温度与植被指数的关系

根据式(2)计算2010年3月26日太湖流域NDVI数据,并将NDVI分成11级(见图1). 通过普适性单通道算法反演出当日太湖流域地表温度分布,见图2.

从图1和图2可知,太湖流域热岛效应显著,地表温度较高区域主要分布在各城市中心,如上海市、苏州市、无锡市、常州市、嘉兴市、杭州市和湖州市. 城市地表温度在292~296 K范围内,而郊区农田等区域地表温度在284~288 K范围内,城市地表平均温度比郊区高3.5 K. 从图2可看出城市轮廓并判断其发展程度,这也与太湖流域城市实际经济发展情况相符. 由图2可知,温度比较低的是水体,其次是林地、农田. 太湖、溇湖、长荡湖、阳澄湖、澄湖和淀山湖等地的地表温度均为最低,平均值只有282 K左右.

由图1可知,除水体外,NDVI越高地表温度越低. 为了能定量分析地表温度与NDVI的相关性,分别选择林地采样点、农田采样点和城市绿化草地采样点各80个,作二者的散点图,结果见图3.



底图自国家测绘局下载,网址为 <https://219.238.166.215/mcp/MapProduct/Cut/中文政区版/6500万政区版/Map.html>.

审图号:GS(2008)1372号.图2同.

图 1 太湖流域 NDVI 分布

Fig. 1 Distribution of NDVI of the Tai Lake Basin

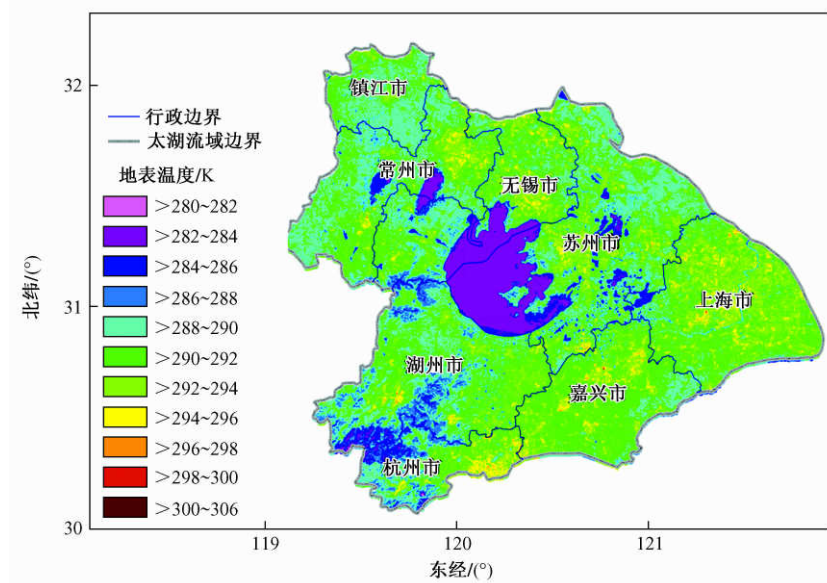


图 2 太湖流域地表温度分布

Fig. 2 Distribution of land surface temperature of the Tai Lake Basin

其中林地采样点主要分布在江苏的宜溧山地和浙江的天目山脉,农田采样点主要分布在太湖流域主要城市的郊区,城市绿化草地采样点主要选择在太湖流域主要城市(苏州、无锡、常州和上

海)。

从图 3 看出,林地的 NDVI 一般为 0.399 ~ 0.724,温度范围一般为 282.4 ~ 286.5 K;农田的 NDVI 一般为 0.23 ~ 0.75,温度范围为 287.2 ~

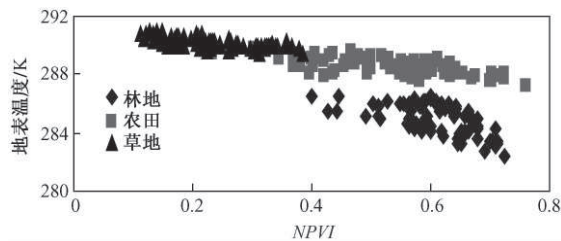


图3 NDVI与地表温度关系

Fig. 3 Map of relationship between the land surface temperature and the NDVI

289.7 K;城市草地的NDVI一般为0.11~0.38,温度范围为289.4~291.0 K;同时可以看出,当林地和农田、草地的NDVI相同时,林地的地表温度比农田、草地低,因此林地比农田、绿化草地调节温度效果好,在城市绿化中增加林地的面积更有助于缓解城市热岛效应。

#### 4 结论

a. 利用2009年环境小卫星数据人工目视解译太湖流域地表类型,并且将地表类型数据与地表温度叠加分析,结果表明,城镇用地、农村居民地、其他建设用地的地表温度较高,而水体、林地和草地具有较好的降温作用。

b. 根据2010年3月26日环境一号卫星热红外波段反演的地表温度来看,太湖流域热岛现象比较严重,尤其是上海、苏州、无锡和常州等发达地区,一般城区地表温度在292~296 K,农田地表温度在284~288 K,城区平均温度比农田平均温度高3.5 K。

c. 地表温度与NDVI有较好的线性关系,随着NDVI的增大,地表温度降低。当林地和农田、草地NDVI相同时,林地的地表温度比农田、草地低,因此,在城市绿化中增加林地的面积将更有助于缓解城市热岛效应。

#### 参考文献 (References):

[1] BARTON I J. Satellite-derived sea surface temperatures: a comparison between operational theoretical and experimental algorithms[J]. Meteorol, 1992, 31: 432-442.

[2] 白香花. 北京城区下垫面类型及城区格局对热场分布影响研究[D]. 北京: 北京师范大学, 2003.

[3] GALLOPK K P, MCNABAL A L, KARLTR T R, et al. The use of a vegetation index for assessment of the urban heat island effect[J]. International Journal of Remote Sensing, 1993, 14

(11): 2223-2230.

- [4] WENG Q, LU D S, JACQUELYN S. Estimation of land surface temperature vegetation abundance relationship for urban heat island studies[J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 89: 467-483.
- [5] 王勇, 李发斌, 李何超, 等. RS和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): 81-88.
- [6] 王文杰, 申文明, 刘晓曼, 等. 基于遥感的北京市城市化发展与城市热岛效应变化关系研究[J]. 环境科学研究, 2006, 19(2): 44-49.
- [7] 王艳皎, 闫峰, 张培群, 等. 基于植被指数和地表反照率影响的北京城市热岛变化[J]. 环境科学研究, 2009, 22(2): 215-221.
- [8] 朱利, 姚延娟, 吴传庆, 等. 基于环境一号卫星的内陆水体水质多光谱遥感监测[J]. 地理与地理信息科学, 2010, 26(2): 81-85.
- [9] 徐伟凡, 李云梅, 王桥, 等. 基于环境一号卫星多光谱影像数据的三湖一库富营养化状态评价[J]. 环境科学学报, 2011, 31(1): 81-93.
- [10] 旷达, 韩秀珍, 刘翔, 等. 基于环境一号卫星的太湖叶绿素a浓度提取[J]. 中国环境科学, 2010, 30(9): 1268-1273.
- [11] 杨煜, 李云梅, 王桥, 等. 基于环境一号卫星高光谱遥感数据的巢湖水体叶绿素a浓度反演[J]. 湖泊科学, 2010, 22(4): 495-500.
- [12] 王中挺, 厉青, 王桥, 等. 利用环境一号卫星数据监测雾分布[J]. 遥感技术与应用, 2010, 25(4): 318-323.
- [13] 王中挺, 厉青, 陶金花, 等. 环境一号卫星CCD相机应用于陆地气溶胶的监测[J]. 中国环境科学, 2009, 29(9): 902-907.
- [14] 王中挺, 王子峰, 厉青, 等. 环境一号卫星在监测大气PM<sub>10</sub>中的应用[J]. 中国环境科学, 2011, 31(2): 202-206.
- [15] 徐军. 环境一号卫星CCD影像在南宁市土地利用变化监测中的应用[C]. 北京: 中国测绘学会. 2010年学术年会论文集. 2010, 139-142.
- [16] 黄妙芬, 邢旭峰, 王培娟, 等. 利用LANDSAT/TM热红外通道反演地表温度的3种方法比较[J]. 干旱区地理, 2006, 29(1): 132-137.
- [17] 张勇, 余涛, 顾行发, 等. CBERS-02 IRMS热红外数据地表温度反演及其在城市热岛效应定量分析中的应用[J]. 遥感学报, 2006, 10(5): 789-797.
- [18] YORAM J, KAUFMAN, GAO Bo-cai. Remote sensing of water vapor in the near IR from EOS/MODIS[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sensing, 1992, 30(5): 871-884.
- [19] GRIEND A, OWE M. On the relationship between thermal emissivity and the normalized difference vegetation index for nature surfaces[J]. International Journal of Remote Sensing, 1993, 14(6): 1119-1131.
- [20] JIMENEZ-MUFLOZ J C, SOBRINO J A. A generalized single-

- channel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data [ J ]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108 ( D22 ): 4688-4696.
- [ 21 ] WAN Z M, LI Z L. A physics-based algorithm for retrieving land-surface emissivity and temperature from EOS/MODIS data [ J ]. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 1997, 35 ( 4 ): 980-996.
- [ 22 ] WAN Z M, ZHANG Y L, ZHANG Q C, *et al.* Validation of the land-surface temperature products retrieved from terra moderate resolution imaging spectroradiometer data [ J ]. *Remote Sens Environ*, 2002, 83 : 163-180.
- [ 23 ] WAN Z M, ZHANG Y L, ZHANG Q C, *et al.* Quality assessment and validation of the MODIS global land surface temperature [ J ]. *Int J Remote Sensing*, 2004, 25 : 261-274.

(责任编辑:孙彩萍)