

基于 ETM⁺ 遥感探测山地城市不透水面及其动态分析

任鹏飞¹, 甘淑¹, 谢显奇¹, 宗慧琳¹, 韩林华²

(1. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 云南 昆明 650093; 2. 中国人民解放军 66240 部队, 北京 100042)

摘要: 不透水面是城市的基质景观和地表覆被的典型特征, 主导着城市景观格局与过程, 也是城市环境变化的主要因素之一。利用 Landsat ETM⁺ 卫星影像探测获得昆明市 2000—2010 年 3 个时相的主城区不透水面信息, 采取修正的归一化水体指数进行水体的剔除, 排除水体对不透水面提取精度的影响。利用城市不透水面与植被覆盖度负相关的联系, 进而提取研究区不透水面信息。所提取信息精度较高, 能较好地反映出城市扩张的趋势, 以及对城市周边生态环境的破坏程度。研究结果表明, 昆明市主城区的不透水面面积在近 10 a 间明显增加, 城市不断地向郊区扩张, 极大地影响了周边生态环境, 郊县植被覆盖率严重下降。

关键词: 不透水面; 遥感探测; 动态分析; 植被覆盖度

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2013)05-0109-04

中图分类号: P901

Dynamic Analysis of Mountain City Impervious Surface Based on ETM⁺ Fused Image

REN Peng-fei¹, GAN Shu¹, XIE Xian-qi¹, ZONG Hui-lin¹, HAN Lin-hua²

(1. Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650093, China; 2. PLA Troops 66240, Beijing 100042, China)

Abstract: As city's matrix landscape, impervious surface dominates urban landscape patterns and processes. It is not only a typical characteristic of urban surface cover, but also one of the main factors in the change of urban environment. This paper uses Landsat ETM⁺ satellite images to detect three-phase impervious surface information of the Kunming City from 2000 to 2010. We extract water information by using modified normalized difference water index and exclude the impacts of water on impervious surface extraction accuracy. Based on the negative correlation between urban impervious surface and vegetation coverage, we extract impervious surface information of the study area and obtain higher extraction accuracy. This study can better reflect the trend of urban expansion and the damage extent to the peri-urban ecological environment. Results from the study showed that impervious surface area of the study area increased so fast in the last ten years. The city is continuing to expand to the suburbs, which has a great impact on the surrounding ecological environment and result in a serious decline in the suburban vegetation cover.

Keywords: impervious surface; remote sensing; dynamic analysis; fractional vegetation cover

不透水面 (impervious surface, 简称 IS) 是城市中一种人工地表特征, 其隔离地表水下渗到土壤, 割断了城市地表与地下水文联系, 主要由城市中的道路、停车场、广场及屋顶等建筑物组成^[1-2]。不透水表面指数 (impervious surface area index, 简称 ISA) 是指单位面积内透水表面地表所占的面积比例, 不仅作为表示城市化程度的指标, 还可作为衡量环境质量的指标^[3]。土地利用变化首先反映在各种土地利用类

型的面积变化, 面积变化可以反映区域土地利用格局的变化^[4]。随着我国城市化进程的加快, 作为城市化显著特征之一的不透水面也在不断增加, 这将影响地区的生态环境, 从而导致流域水文循环异常、非点源污染增加、城市热岛效应增强以及生物多样性减少等问题^[5]。

从遥感探测的角度来理解, 不透水面特征表现为水渗透率相对较小的地表覆盖土地类型。随着遥感

收稿日期: 2012-11-14

修回日期: 2012-12-31

资助项目: 国家自然科学基金项目“基于遥感与 GIS 的滇东南石漠化监测、评价及过程模拟研究”(41261092), 云南山区不同地域环境下农户生计与土地利用互动研究(71163023)

作者简介: 任鹏飞(1986—), 男(汉族), 内蒙古自治区土左旗人, 硕士, 研究方向为遥感信息处理与应用技术。E-mail: 494590944@qq.com。

通信作者: 甘淑(1964—), 女(汉族), 云南省腾冲市人, 教授, 博士生导师, 主要从事资源环境管理及 3S 技术应用研究。E-mail: N1480@qq.com。

技术的迅速发展,利用卫星对地观测技术也已经被应用到研究城市不透水面信息探测中。Ridd^[6]提出了研究城市生态的植被—不透水面—土壤模型(vegetable-imperious-soil model,简称 V-I-S 模型),将城市影像中的每个像元看成这 3 种代表性类型的线性组合。Carlson 等^[7]利用植被覆盖度与不透水面之间的关系,研究了适合于城市建成区不透水面信息提取的方法。Bauer 等^[8]将 Landsat TM 分类影像和高分辨率的航空照片结合,提取出不透水面,然后再利用缨帽变换中的绿度分量与不透水面的回归关系来评价不透水面提取的精度。Wu 等^[9]利用光谱混合分析法(SMA)对 Landsat 7 ETM⁺影像进行分解,提取出不透水面,并利用 DOQQ 影像对提取精度进行了验证。

生态环境是人类赖以生存和发展的基本条件,是经济、社会发展的基础,是区域可持续发展的核心^[10]。基于对山地城镇化发展及其生态环境脆弱性的认识,借鉴已有的研究成果,本文以昆明市主城区为例,应用遥感探测技术,构建植被覆盖度与不透水面在城市建成区内的关系以快速提取获得城市不透水面信息,并对研究区内 10 a 间 3 个时相的不透水面信息进行初步的动态分析研究。

1 研究区概况及研究数据

昆明,云南省省会,首批国家级历史文化名城,位于云南省中部,东经 102°10′—103°40′,北纬 24°23′—26°33′,南北长 237.5 km,东西宽 152 km,总面积约 21 473 km²。城区坐落在滇池坝子,海拔 1 891 m,三面环山,南濒滇池。昆明属低纬度高原山地季风气候,冬无严寒,夏无酷暑,四季如春,年平均气温 15℃左右,年均日照约 2 200 h,无霜期 240 d 以上,年均降水约 1 000 mm。鲜花常年开放,草木四季常青,是著名的“春城”、“花城”,是休闲、旅游、度假、居住的理想之地。昆明市主城区包括五华区、盘龙区、官渡区、西山区,即市内 4 区。本研究选取的研究区为昆明市主城区。

本次试验数据选取了 Landsat 7 经过辐射纠正和几何纠正的系统级纠正产品,影像获取时间为 2000 年 11 月 2 日,2006 年 1 月 3 日,2010 年 1 月 30 日。3 幅影像质量较好,所选研究区内均无云遮挡。遥感影像处理采用 ENVI 4.8 软件。Landsat 7 ETM⁺数据包含了 8 个波段,其中,波段 1 和波段 3 为可见光波段,波段 4 为近红外波段,波段 5 和波段 7 为短波红外波段,这 6 个波段地面分辨率为 30 m;波段 8 为全色波段,分辨率为 15 m。波段 6 为热红

外波段,分为波段 61 和波段 62,主要用于探测地球表面不同物质的自身热辐射。

2 研究方法

2.1 修正的归一化水体指数(MNDWI)

MNDWI^[11]是在 Mcfeeters^[12]所提出的归一化水体指数(NDWI)上进一步改进的水体指数。该指数利用中红外波段替换近红外波段进行计算,可用于快速、简单、准确地提取水体信息。相对于 NDWI, MNDWI 的应用范围更为广泛,不仅可用于植被区的水体提取,还可以用于准确地提取城镇范围内的水体信息。本研究采用修正的归一化水体指数(MNDWI)进行研究区内水体信息的剔除,其表达式为:

$$MNDWI = \frac{GREEN - MIR}{GREEN + MIR} \quad (1)$$

式中:GREEN——绿波段;MIR——中红外波段。在 ETM⁺影像中,分别为 2 波段和 5 波段。

2.2 研究区不透水面提取

Carlson^[7]指出,在城市建成区内,不透水面与植被覆盖度有着很强的负相关性。因此,城市建成区的不透水面信息的提取可以利用植被覆盖度来获取。

2.2.1 归一化植被指数(NDVI) 植被指数常作为遥感解译的重要参数,它是从多光谱遥感数据中提取的有关地表植被状况的光谱量数值,能数量化地反映植物状况,有助于增强遥感影像的解译力,以排除非林地信息产生的不必要干扰。归一化差值植被指数又称标准化植被指数,是目前应用最广泛的一种植被指数^[13]。

归一化植被指数计算可以将多光谱数据变换成一个单独的图像波段,用于显示植被分布,对土壤背景的变化较为敏感,削弱了地形和群落结构阴影的影响,常用来反映植被状况、植被覆盖、生物量信息,是反映植被生态环境的重要指标。其公式为:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (2)$$

式中:NIR——近红外波段;RED——红波段。在 ETM⁺影像中,分别为 4 波段和 3 波段。

2.2.2 利用模型计算植被覆盖度 作为地表植被覆盖状况的一个重要指标,植被覆盖度能描述生态系统的现状及区域生态系统环境变化^[14]。本研究运用李苗苗等^[15]在像元二分模型的基础上得出的植被覆盖度模型来计算研究区的植被覆盖度。其公式为:

$$Fc = \frac{NDVI - NDVI_{soil}}{NDVI_{veg} - NDVI_{soil}} \quad (3)$$

式中:Fc——植被覆盖度;NDVI_{veg}——全部被植被覆盖的像元的 NDVI 值;NDVI_{soil}——完全是裸地或无植被覆盖区域的 NDVI 值。这 2 个值的计算公式为:

$$NDVI_{soil} = \frac{(Fc_{max} \times NDVI_{min} - Fc_{min} \times NDVI_{max})}{(Fc_{max} - Fc_{min})} \quad (4)$$

$$NDVI_{veg} = \frac{(1 - Fc_{min}) \times NDVI_{max} - (1 - Fc_{max}) \times NDVI_{min}}{(Fc_{max} - Fc_{min})} \quad (5)$$

式中:Fc_{max}——植被覆盖度的最大值;Fc_{min}——植被覆盖度的最小值;NDVI_{max}——区域内最大的 NDVI 值;NDVI_{min}——区域内最小的 NDVI 值。

本研究中,设定区域内近似取 Fc_{max} = 100%, Fc_{min} = 0%。研究区影像中 NDVI_{soil} 和 NDVI_{veg} 取固定值,从而计算植被覆盖度。即 NDVI_{max} 和 NDVI_{min} 分别为区域内最大和最小的 NDVI 值。由于不可避免存在噪声,NDVI_{max} 和 NDVI_{min} 一般取一定置信度范围内的最大值与最小值,置信度的取值主要根据图像实际情况来定。经过多次实验对比,本研究选取累积概率为 5% 和 95% 附近的 NDVI 值作为 NDVI_{min} 和 NDVI_{max} (如表 1 所示)。

表 1 研究区各时相影像 NDVI 特征值

时间	20001102	20060103	20100130
NDVI _{min}	-0.238 979	-0.061 893	-0.103 478
NDVI _{max}	0.338 611	0.460 870	0.421 154

2.2.3 不透水面提取 根据不透水面与植被覆盖度在城市建成区呈负相关关系。不透水率 (ISA) 可用以下公式计算^[7,16]:

$$ISA = (1 - Fc)_{dev} \quad (6)$$

式中:dev 表示该关系式只适用于被划分为城市建成区的区域。

根据以上方法和步骤,获得了昆明市主城区在 2006 年的不透水面分布图 (图 1)。

图 1 中灰度显示了不透水面的强弱。数值越高所表现的亮度越大,则不透水面的信息越强。以 2006 年为例,图 1 中灰度较暗区域的植被覆盖度较密集,主要是林地、农田、草地等,其值在 0.5 以下;城市用地 (如房屋、道路等) 的灰度较亮,趋近于白色,其数值多在 0.7 以上。灰度值位于 0.5~0.7 的地物为植被和不透水面的混合区域。在此基础上,为更为直观地反映不透水面信息,对图像进行密度分割,共分为 10 个层次,得到研究区的不透水面密度分割图 (如图 2 所示)。

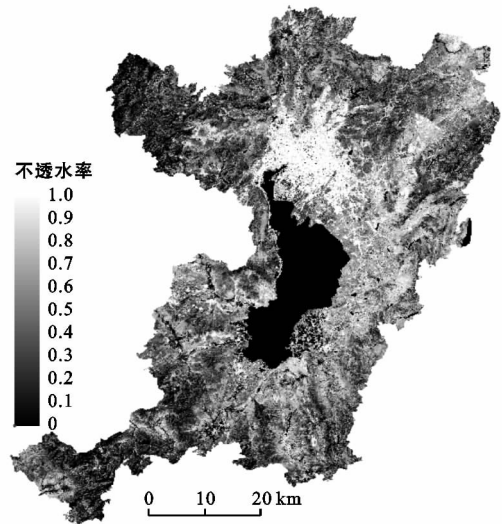


图 1 研究区 2006 年不透水率 (ISA) 灰度图

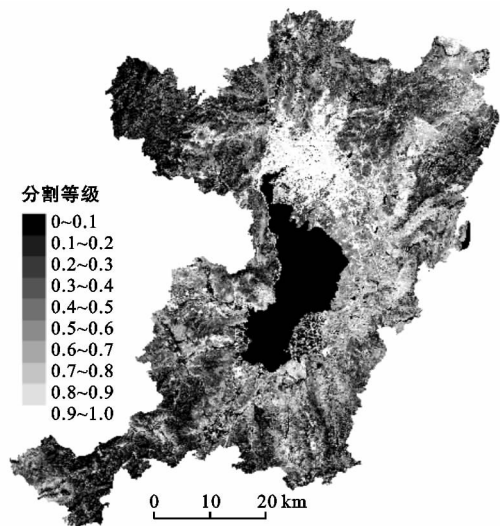


图 2 研究区 2006 年不透水率 (ISA) 图像密度分割图

本研究通过高分辨率影像进行提取适宜性分析。将 ETM⁺ 的第 8 波段即全色波段 (分辨率为 15 m) 与原影像 (30 m) 进行影像融合,以融合后的图像作验证影像。同时应用 Google Earth 影像进行对比验证。通过反复试验,选取阈值为 0.8,即把影像进行二值化处理,大于 0.8 为不透水面,小于 0.8 为透水面。将融合后的高分辨率影像与二值化后的影像叠加在一起,采用随机抽样的方法进行人机交互验证。在 2006 年的影像上,抽取了 1 579 个验证像元,232 个误分,总精度达到 85.31%,Kappa 系数为 0.826 5。可见,试验所选方法能较好地体现城市不透水面信息,具有较好的可行性。

3 结果与分析

按照上述方法,依次提取 2000,2010 年的不透水

面信息。10 a 研究区不透水面有了明显变化,其详细变化统计信息见表 2。由统计数据可知,在 2000—2010 年 10 a 间,昆明经历了一个快速发展的过程,尤其是从 2006 年以来,居民人均收入逐年提升,大量周边居民涌入城区,极大地带动着城市消费以及居民住宅用地的增加,城市呈迅速扩张态势,从而促使城区不透水面面积迅速增长。经反复对比验证,本研究选取阈值 0.7~1.0 为不透水面,0.1~0.4 为植被覆盖较好区域进行定量分析(图 3)。

2000—2006 年,研究区不透水面面积由 900.90 km² 降为 871.45 km²,共减少了 29.45 km²;植被覆盖较好区域面积由 1 186.58 km² 增加到 1 194.15 km²,共增加了 7.57 km²。主要原因为,在这 6 a 间,城市发展程度较缓慢,扩张程度较小,且城市绿化率较高,城市周边的植被覆盖率较高。根据昆明市 2006 年年鉴,建成区绿化覆盖率从 2001 年开始逐年增加,分别是:2001 年 30.7%,2002 年 29.88%,2003 年 25.34%,2004 年 24.67%,2005 年 26.08%。与本研所得数据显示的 trend 相同。

表 2 研究区不透水面统计信息

km²

时期	不透水率(ISA)								
	1.0~0.9	0.9~0.8	0.8~0.7	0.7~0.6	0.6~0.5	0.5~0.4	0.4~0.3	0.3~0.2	0.2~0.1
20001102	340.536 6	243.747 0	316.616 4	397.641 6	397.873 8	426.375 0	428.427 0	405.342 0	352.808 1
20060103	331.194 6	226.530 9	313.749 0	373.375 8	394.734 6	435.051 9	436.229 1	411.132 6	346.786 2
20100130	438.303 6	449.364 6	408.611 7	393.720 3	354.053 7	342.313 2	335.666 9	325.904 4	289.239 3

4 结论

本研究采取修正的归一化水体指数进行水体的剔除,能较好地排出水体对不透水面提取精度的影响,利用城市不透水面与植被覆盖度负相关的联系,进而提取研究区不透水面信息,提取精度较高,能较好地反映出城市扩张的趋势,以及对城市周边生态环境的破坏程度。在 2000—2010 的 10 a 间,昆明市主城区不透水面增加了 395.38 km²,植被覆盖较好区域面积减少了 235.77 km²。

从 2009 年开始,昆明的气候逐渐向干热发展,这与城市的迅速扩张有强烈关系。城市不透水面面积的增加,严重地影响到地表径流的下渗,于此同时,不透水面拥有较高的反射率,将太阳辐射较大程度地反射到近地面空气中,从而加剧了城市热岛效应。研究不透水面不仅为城市规划提供依据,而且能较好地反映城市生态格局。

利用文中方法进行城市不透水信息提取存在如下问题,即季节对于提取精度的影响较大,昆明虽为

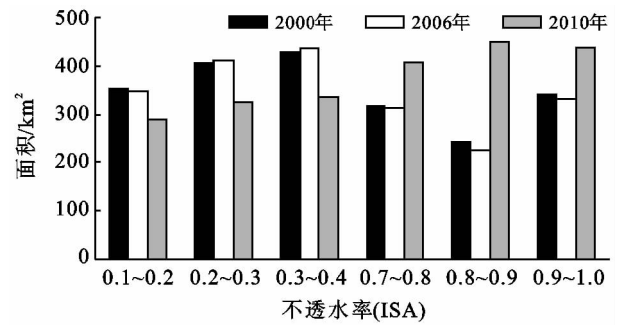


图 3 研究区 2000—2010 年不透水率统计

2006—2010 年,昆明市发展势头较为迅猛,尤其是从 2008 年开始的旧城改造项目,直接加速了城市扩展速度,城建区域逐渐向四周郊县扩张,导致城市不透水面面积迅速增加,伴随植被面积大量下降,尤其是城郊区植被,较严重地破坏了城市周边的生态环境。

4 a 间,研究区不透水面面积由 871.45 km² 增加至 1 296.28 km²,较好植被覆盖区域面积由 1 194.15 km² 下降到 950.81 km²。

低纬度高原山地季风气候,植物多为四季常绿,但仍有部分季节性落叶树木等植被,以及郊县农田的影响。如何提高提取精度将是进一步研究的重点。

[参 考 文 献]

- [1] Espey W H, Morgan C W, Masch F D. A study of some effects of urbanization on storm runoff from a small water shed[R]. Austin: Texas Water Development Board, 1966.
- [2] Stankowski S J. Population density as an indirect indicator of urban and suburban land-surface modifications [C]// U. S. Geological Survey Professional Paper, 1972,800:219-224.
- [3] Arnold C L, Gibbons C J. Impervious surface coverage: emergence of a key environmental factor[J]. Journal of the American Planning Association, 1996,62(2):243-258.
- [4] 陈红顺,夏斌. 快速城市化地区土地利用变化及驱动因素分析:以广东省东莞市为例[J]. 水土保持通报,2012,32(1):54-59.

(下转第 160 页)

0.06。因此,剔除植被光谱干扰能够更有效地反演土壤含水量。

3 结论

(1) 将混合像元分解问题归结为一个基于光谱匹配的非线性最优化问题,并针对最小二乘法的不足,引用了一种基于相关系数匹配的混合像元分解技术。高光谱数据本身提供了丰富的光谱信息,可以预见在高光谱数据中利用基于相关系数匹配的混合像元分解算法能够得到更为精确的结果。

(2) 剔除植被光谱干扰后,土壤反射率、一阶微分、包络线去除光谱的部分波段能够敏感地反映土壤含水量的变化,最佳模型的估测 R^2 值为 0.85;若直接采用原始影像光谱建立估测模型,估测 R^2 值仅为 0.36。

(3) 通过高光谱影像分解剔除植被光谱干扰估测土壤含水量的方法是可行的,可为今后遥感估测土壤含水量的研究提供参考。

[参 考 文 献]

- [1] 周萍,王润生,阎柏琨,等. 高光谱遥感土壤有机质信息提取研究[J]. 地理科学进展, 2008, 27(5): 27-34.
- [2] 陈荣毅,张元明,潘伯荣,等. 古尔班通古特沙漠土壤养分空间分异与干扰的关系[J]. 中国沙漠, 2007, 27(2): 257-265.
- [3] 宋韬,鲍一丹,何勇. 利用光谱数据快速检测土壤含水量的方法研究[J]. 光谱与光谱学分析, 2009, 29(3): 675-

677.

- [4] Bedidi A, Cervelle B, Madeira J, et al. Moisture effects on visible spectral characteristics of lateritic soils[J]. Soil Science, 1992(153):129-141.
- [5] 孙建英,李民赞,唐宁,等. 东北黑土的光谱特性及其与土壤参数的相关性分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2007, 27(8):1502-1505.
- [6] 刘焕军,张柏,宋开山,等. 黑土土壤水分光谱响应特征与模型[J]. 中国科学院研究生院学报, 2008, 25(4): 503-509.
- [7] 王昌佐,王纪华,王锦地,等. 裸土表层含水量高光谱遥感的最佳波段选择[J]. 遥感信息, 2003(4): 33-36.
- [8] 王静,何挺,李玉环. 基于高光谱遥感技术的土地质量信息挖掘研究[J]. 遥感学报, 2005, 9(4): 438-445.
- [9] 吴代晖,范闻捷,崔要奎,等. 高光谱遥感监测土壤含水量研究进展[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(11): 3067-3071.
- [10] 杨伟,陈晋,松下文经,等. 基于相关系数匹配的混合像元分解算法[J]. 遥感学报, 2008, 12(3): 454-461.
- [11] 丁丽霞,王志辉,葛宏立. 基于包络线法的不同树种叶片高光谱特征分析[J]. 浙江林学院学报, 2010, 27(6): 809-814.
- [12] 尹业彪,李霞,赵钊,等. 沙质土壤含水率高光谱预测模型建立及分析[J]. 遥感技术与应用, 2011, 26(3): 355-359.
- [13] 牛宝茹,刘俊蓉,王政伟. 干旱半干旱地区植被覆盖度遥感信息提取研究[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2005, 30(1): 27-30.

(上接第 112 页)

- [5] 任金华,吴绍华,周生路,等. 城市不透水面遥感研究进展[J]. 国土资源遥感, 2012, 24(4): 8-15.
- [6] Ridd M K. Exploring a V-I-S (vegetation-impervious surface-soil) model for urban ecosystem analysis through remote-sensing-comparative anatomy for cities [J]. International Journal of Remote Sensing, 1995, 16(12): 2165-2185.
- [7] Carlson T N, Arthur S T. The impact of land use-land cover changes due to urbanization on surface microclimate and hydrology: a satellite perspective [J]. Global and Planetary Change, 2000, 25(1/2): 49-65.
- [8] Bauer M E, Doyle J K, Heinert N J. Impervious surface mapping using satellite remote sensing [C]// Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS'02, IEEE International, 2002, 4: 2334-2336.
- [9] Wu Changshan, Murray A T. Estimating impervious surface distribution by spectral mixture analysis [J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 84(4): 493-505.
- [10] 张峰,李珍存. 陕西省榆林地区生态环境评价研究[J].

水土保持通报, 2008, 28(6): 146-150.

- [11] 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.
- [12] Mcfeeters S K. The use of Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features [J]. International Journal of Remote Sensing, 1996, 17(7): 1425-1432.
- [13] 郭凯,孙培新,李卫国. 利用 ERDAS IMAGINE 从遥感影像中提取植被指数[J]. 西部探矿工程, 2005, 17(6): 210-212.
- [14] 李丽,童立强,李小慧. 基于植被覆盖度的石漠化遥感信息提取方法研究[J]. 国土资源遥感, 2010(2): 59-62.
- [15] 李苗苗,吴炳芳,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.
- [16] Owen T W, Carlson T N, Gillies R R. An assessment of satellite remotely-sensed land cover parameters in quantitatively describing the climatic effect of urbanization [J]. International Journal of Remote Sensing, 1998, 19(9): 1663-1681.