

喀斯特城市桂林地表温度时空变化及地物覆盖影响分析*

王恺宁¹, 王修信^{2,3}

(1. 辽宁师范大学 城市与环境学院, 辽宁 大连 116029; 2. 广西师范大学 计算机科学与信息工程学院, 广西 桂林 541004;
3. 北京师范大学 遥感科学国家重点实验室, 北京 100875)

摘要:【目的】定量分析喀斯特城市桂林1990—2015年快速扩展对热环境的影响。【方法】提出喀斯特山峰混合像元比辐射率估算方法,对Landsat卫星12景遥感图像用模型反演地表温度并分析地表温度时空变化规律;提出建筑覆盖率、水体覆盖率和裸土率估算方法,反演植被覆盖度、建筑覆盖率、水体覆盖率、裸土率和裸岩率,分析混合像元中各地物覆盖率变化对地表温度的影响。【结果】1) 研究地的建筑/道路、喀斯特山峰裸岩、干燥裸土的地表温度相对较高,水体和茂密植被覆盖的喀斯特山峰阴坡地表温度最低,茂密植被覆盖的喀斯特山峰阳坡的地表温度也相对较低;在太阳辐射下,喀斯特山峰阳坡地表温度比阴坡地表温度高1~3℃。2) 1990—2015年研究地的地表温度高于喀斯特山峰茂密林地的高温像元比例呈逐渐上升的趋势,由61.9%变化到75.2%。3) 研究地的地表温度因植被覆盖度、水体覆盖率增加0.1而分别降低0.5~0.7℃,0.2~0.4℃;因建筑覆盖率、裸土率和裸岩率增加0.1而分别升高0.4~0.7℃,0.4~0.6℃和0.3~0.5℃。【结论】喀斯特城市桂林的地表温度明显受人为因素、植被覆盖和地形的影响。

关键词:喀斯特城市;遥感;地表温度;时空变化;地物覆盖影响;桂林

中图分类号:TP79

文献标志码:A

文章编号:1672-6693(2018)04-0117-08

中国广西、贵州、云南等地分布着世界上面积最大的喀斯特地区。自古享有“山水甲天下”美誉而闻名世界的桂林是位于该地区的典型喀斯特城市,石灰岩孤峰或峰丛镶嵌于城区之中。桂林城市地物覆盖类型不仅有人工不透水面(建筑、道路、广场等)、植被(人工种植的城市绿化植被和喀斯特山峰自然生长的森林植被)、水体(漓江等江河、湖泊、池塘)等,还有裸岩(喀斯特山峰裸露的石灰岩)。最近20多年来,随城市的快速扩展,桂林城市周边地物覆盖类型逐渐发生变化:近郊农田、林地、池塘等自然地表逐渐为人工不透水地表所代替;同时进入城区的还有一些喀斯特山峰;少数在城市边缘的喀斯特山峰还成为了生产建设工程石料的采石场,喀斯特植被受到毁灭性破坏,大面积石灰岩山体完全裸露。城市地物覆盖的变化直接影响局地热环境,而地表热场可用地表温度来定量描述。不透水面、植被、水体、裸岩是影响喀斯特城市地表温度的主要因素。2014年,桂林喀斯特获准列入“中国南方喀斯特第二期”世界遗产名录,而人类活动剧烈的喀斯特城市建设如何应对城市化的生态环境问题并实现可持续发展成为了急需研究的内容。因此,研究喀斯特城市地表温度的时空变化及地物覆盖率对地表温度的影响具有重要意义。

近些年来,有关城市地表温度及不透水面、植被、水体对它的影响已有较多的报道。通过多时相遥感图像,部分研究将重点放在地表温度的时空特征分析上^[1-3];而大部分研究则直接计算部分地物指数(如不透水面指数或建筑指数、植被指数、水体指数等)来定量描述城市地物覆盖^[4-9],或者基于地物指数估算混合像元中植被覆盖度等^[10],又或进一步估算不透水面丰度^[11-13]来分析不同时相地物覆盖与地表温度空间分布的关系。然而目前大部分研究未能综合分析混合像元中不透水面、植被、水体等3个地物覆盖率对城市地表温度的影响;且研究中不同年度遥感数据的年跨度较大,例如20多年的跨度只用4幅遥感图像。此外,未见喀斯特城市的相关研究,而喀斯特城市是一种特殊的城市生态系统,与其他类型城市相比增加了喀斯特裸岩这一地物覆盖类型。因此,针

* 收稿日期:2017-04-12 修回日期:2018-02-26 网络出版时间:2018-07-26 16:50

资助项目:国家自然科学基金地区科学基金项目(No. 41561008);广西自然科学基金(No. 2014GXNSFAA118289);广西高校科学技术研究项目(No. 2013LX020;No. KY2015LX007)

第一作者简介:王恺宁,男,研究方向为生态环境遥感,E-mail:knwanggl@163.com;通信作者:王修信,男,教授,博士,E-mail:xxwangbnu@163.com

网络出版地址:http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1165.N.20180726.1650.044.html

对喀斯特城市桂林 1990—2015 年间快速扩展所引发的热环境问题,笔者提出了喀斯特山峰混合像元比辐射率估算方法以及建筑覆盖率、水体覆盖率和裸土率的估算方法,对桂林市 Landsat 卫星 12 景遥感图像用模型反演地表温度、植被覆盖度、建筑覆盖率、水体覆盖率、裸岩率、裸土率等指标,分析研究地地表温度的时空变化规律,分析混合像元中各地物覆盖率变化对地表温度的影响,从而为喀斯特城市的可持续发展提供科学依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

桂林主城区位于广西东北部岩溶盆地,广布石灰岩孤峰、峰林,为典型的喀斯特地区。研究地属亚热带季风气候,四季分明,气候温和,雨量充足,雨热基本同季,无霜期长,光照充足,夏长冬短。桂林年平均气温为 19.1 °C,年极端最低气温为 -4.5 °C,极端最高气温为 39.5 °C,年平均相对湿度为 73%~79%,年平均气压为 9.951×10^4 Pa,年平均降雨量为 1 890.8 mm,年日照时数为 1 487.0 h,年平均无霜期为 309 d,全年风向以偏北风为主,平均风速 2.2~2.7 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

最近 20 余年来,桂林城市建设呈快速发展的趋势。1991 年,桂林国家高新区被国务院批准为第一批国家级高新技术产业开发区,面积为 12.07 km^2 ,其中铁山工业园和信息产业园、英才科技园分别于 2003 年、2005 年开始建设。1994 年,桂林西城经济开发区获广西政府批准建设。1999 年,新桂林北始发站投入使用,带动了桂林城区向北扩展。为了保护漓江水环境,2007 年 8 月临桂新区建设获批,计划到 2015 年完成 13.96 km^2 的建城区目标,其中占地 10 km^2 的秧塘工业园于 2010 年开始建设。

1.2 地表温度的反演

计算亮度温度(T_B),有:

$$T_B = \frac{k_2}{\ln\left(\frac{k_1}{L_\lambda} + 1\right)},$$

然后将 T_B 转换为地表温度(T_S)^[14],有:

$$T_S = \frac{T_B}{1 + \left(\frac{\lambda T_B}{\rho}\right) \ln \epsilon}。$$

以上两式中: L_λ 为 Landsat 热红外波段辐射亮度; k_1 和 k_2 可从卫星数据的头文件获取; λ 为发射辐射波长; ϵ 为地表比辐射率; $\rho = \frac{hc}{\sigma}$, c 为光速, h 为 Planck 常数, σ 为 Boltzmann 常数。

从 ASTER 光谱实验数据库获取典型地物比辐射率(ϵ),其中水泥建筑(道路)、植被、水体、干燥土壤(后简称裸土)和碳酸钙石灰岩(后简称裸岩)分别以 $\epsilon_B, \epsilon_V, \epsilon_W, \epsilon_S$ 和 ϵ_R 表示,对应的取值分别为:0.968, 0.985, 0.995, 0.973 和 0.960。

本研究中,对水体取 $\epsilon = \epsilon_W$;对绿化植被与城市建筑(道路)构成的混合像元取 $\epsilon = P_V R_V \epsilon_V + (1 - P_V) R_B \epsilon_B$ 。对植被与裸土构成的混合像元取 $\epsilon = P_V R_V \epsilon_V + (1 - P_V) R_S \epsilon_S$,其中: P_V 为植被覆盖度; R_B, R_V 和 R_S 分别为水泥建筑/道路、植被和裸土的温度比率,可由 P_V 估算^[15]。

提出估算喀斯特山峰混合像元比辐射率方法,由于亚热带地区水热条件较好,植被易于生长,喀斯特山峰裸岩间土壤基本生长植被,因此喀斯特山峰混合像元主要由植被与裸岩构成:

$$\begin{aligned} \epsilon &= P_V R_V \epsilon_V + (1 - P_V) R_R \epsilon_R + d_\epsilon, \\ d_\epsilon &= (1 - \epsilon_R)(1 - F) \epsilon_V. \end{aligned}$$

以上两式中: R_R 为裸岩的温度比率,可由 P_V 估算^[15]; d_ϵ 为混合像元中由于地形引起的植被与裸岩间热辐射相互作用修正; F 为地形因子,可根据不同的几何分布取值^[16]。

1.3 地物覆盖率的反演

参考归一化植被指数(NDVI)估算植被覆盖度方法,提出水体覆盖率、建筑覆盖率和裸土率的估算公式。取 $\rho_B, \rho_G, \rho_R, \rho_{NIR}$ 和 ρ_{SWIR1} 分别为蓝波段、绿波段、红波段、近红外波段和短波红外 1 波段的反射率。

1) 植被覆盖度(P_V)的反演。NDVI 的计算公式为:

$$X_{\text{NDVI}} = \frac{\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{R}}}{\rho_{\text{NIR}} + \rho_{\text{R}}}$$

式中 X_{NDVI} 表示 NDVI。 X_{NDVIV} , X_{NDVIS} 分别为茂密植被覆盖区、完全裸露土壤区的 NDVI 均值。当 $X_{\text{NDVI}} \geq X_{\text{NDVIV}}$ 时,为完全植被覆盖, $P_{\text{V}} = 1$; 当 $X_{\text{NDVI}} \leq X_{\text{NDVIS}}$ 时,为无植被覆盖, $P_{\text{V}} = 0$; 当 $X_{\text{NDVIS}} < X_{\text{NDVI}} < X_{\text{NDVIV}}$ 时,

$$P_{\text{V}} = \frac{X_{\text{NDVI}} - X_{\text{NDVIS}}}{X_{\text{NDVIV}} + X_{\text{NDVIS}}}$$

2) 水体覆盖率(P_{W})的反演。水体指数(MNDWI)的计算公式为:

$$X_{\text{MNDWI}} = \frac{\rho_{\text{G}} - \rho_{\text{SWIR1}}}{\rho_{\text{G}} + \rho_{\text{SWIR1}}}$$

式中 X_{MNDWI} 表示 MNDWI。 X_{MNDWIW} , X_{MNDWIV} 分别为完全水体覆盖区、茂密植被覆盖区的 MNDWI 均值。当 $X_{\text{MNDWI}} \geq X_{\text{MNDWIW}}$ 时,为完全水体覆盖, $P_{\text{W}} = 1$; 当 $X_{\text{MNDWI}} \leq X_{\text{MNDWIV}}$ 时,为无水体覆盖, $P_{\text{W}} = 0$; 当 $X_{\text{MNDWIV}} < X_{\text{MNDWI}} < X_{\text{MNDWIW}}$ 时,

$$P_{\text{W}} = \frac{X_{\text{MNDWI}} - X_{\text{MNDWIV}}}{X_{\text{MNDWIW}} - X_{\text{MNDWIV}}}$$

3) 建筑覆盖率(P_{B})的反演。归一化建筑指数(NDBI)的计算公式为:

$$X_{\text{NDBI}} = \frac{\rho_{\text{SWIR1}} - \rho_{\text{NIR}}}{\rho_{\text{SWIR1}} + \rho_{\text{NIR}}}$$

式中 X_{NDBI} 表示 NDBI。 X_{NDBIB} , X_{NDBIV} 分别为完全建筑覆盖区、茂密植被覆盖区的 NDBI 均值。当 $X_{\text{NDBI}} \geq X_{\text{NDBIB}}$ 时,为完全建筑覆盖, $P_{\text{B}} = 1$; 当 $X_{\text{NDBI}} \leq X_{\text{NDBIV}}$ 时,为无建筑覆盖, $P_{\text{B}} = 0$; 当 $X_{\text{NDBIV}} < X_{\text{NDBI}} < X_{\text{NDBIB}}$ 时, $P_{\text{B}} =$

$$\frac{X_{\text{NDBI}} - X_{\text{NDBIV}}}{X_{\text{NDBIB}} - X_{\text{NDBIV}}}$$

4) 裸土率(P_{S})的反演。裸土指数(SI)的计算公式为:

$$X_{\text{SI}} = \frac{\rho_{\text{SWIR1}} + \rho_{\text{R}} - \rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{B}}}{\rho_{\text{SWIR1}} + \rho_{\text{R}} + \rho_{\text{NIR}} + \rho_{\text{B}}}$$

式中 X_{SI} 表示 SI。 X_{SIS} , X_{SIV} 分别为完全土壤覆盖区、茂密植被覆盖区的 SI 均值。当 $X_{\text{SI}} \geq X_{\text{SIS}}$ 时,为完全裸土,

$$P_{\text{S}} = 1; \text{当 } X_{\text{SI}} \leq X_{\text{SIV}} \text{ 时,无裸露土壤, } P_{\text{S}} = 0; \text{当 } X_{\text{SIV}} < X_{\text{SI}} < X_{\text{SIS}} \text{ 时, } P_{\text{S}} = \frac{X_{\text{SI}} - X_{\text{SIV}}}{X_{\text{SIS}} - X_{\text{SIV}}}$$

5) 裸岩率(P_{R})的反演。对喀斯特山峰而言,有: $P_{\text{R}} = 1 - P_{\text{V}} - P_{\text{S}}$ 。

2 结果与分析

由于中国南方春、夏季多雨,可见光遥感图像易受云雾的污染,因此选取覆盖桂林主城区的 1990—2015 年秋季 10 月左右共 12 景 Landsat 系列 TM/ETM/OLI TIRS 遥感图像,经几何校正、辐射校正、MODTRAN 大气校正等预处理。遥感反演地表温度的结果见图 1,反演值与地面实测值的误差在 2°C 内,可有效反映地表温度的空间分布状况。

2.1 地表温度的空间变化

通过遥感反演的地表温度图像来统计典型地物的平均温度,结果见表 1。由图 1 和表 1 可看出桂林城区地表温度的空间分布存在以下特征:1) 建筑/道路、喀斯特山峰裸岩、干燥的裸土等地物类型的地表温度相对较高,在图 1 中以较高亮度区域呈现;2) 自北向南穿城而过的漓江、城区桃花江、榕湖、杉湖、桂湖、木龙湖等较大水体和茂密植被覆盖的喀斯特山峰阴坡的温度最低,在图 1 中以深黑色蜿蜒曲线和斑块呈现;3) 桂林城区镶嵌着普陀山、西山、叠彩山、穿山、南溪山等较大型的、茂密植被覆盖的喀斯特山峰,这些山峰阳坡的地表温度也相对较低;4) 图 1 中相对较暗的区域,它们的局部温度受植被覆盖的影响,而植被覆盖地区的地表温度总体较低。

地表温度受人为因素影响较明显,图 1 中有少数特别亮的高温斑块呈现出来,它们主要对应的是建筑密集的较大面积的工业园(如铁山、大村、秧塘等),市场(如桂北竹木交易市场、五里店农产品批发市场等),广场(如中心广场、国际会展中心等)以及喀斯特山峰上覆盖植被遭受完全破坏、大面积山体裸露的采石场;其中,大面积铁皮屋顶厂房的高温效应更加明显。

喀斯特山峰的地表温度受到地形的影响。由于喀斯特山峰距地面的相对高度一般不超过 200 m,因此高程对地表温度的影响不大,但阳坡的地表温度明显高于阴坡。统计喀斯特山峰阳坡、阴坡的地表温度,结果见表 2。喀斯特山峰阳坡、阴坡的地表温度差在 $1\sim 3^{\circ}\text{C}$ 范围内。

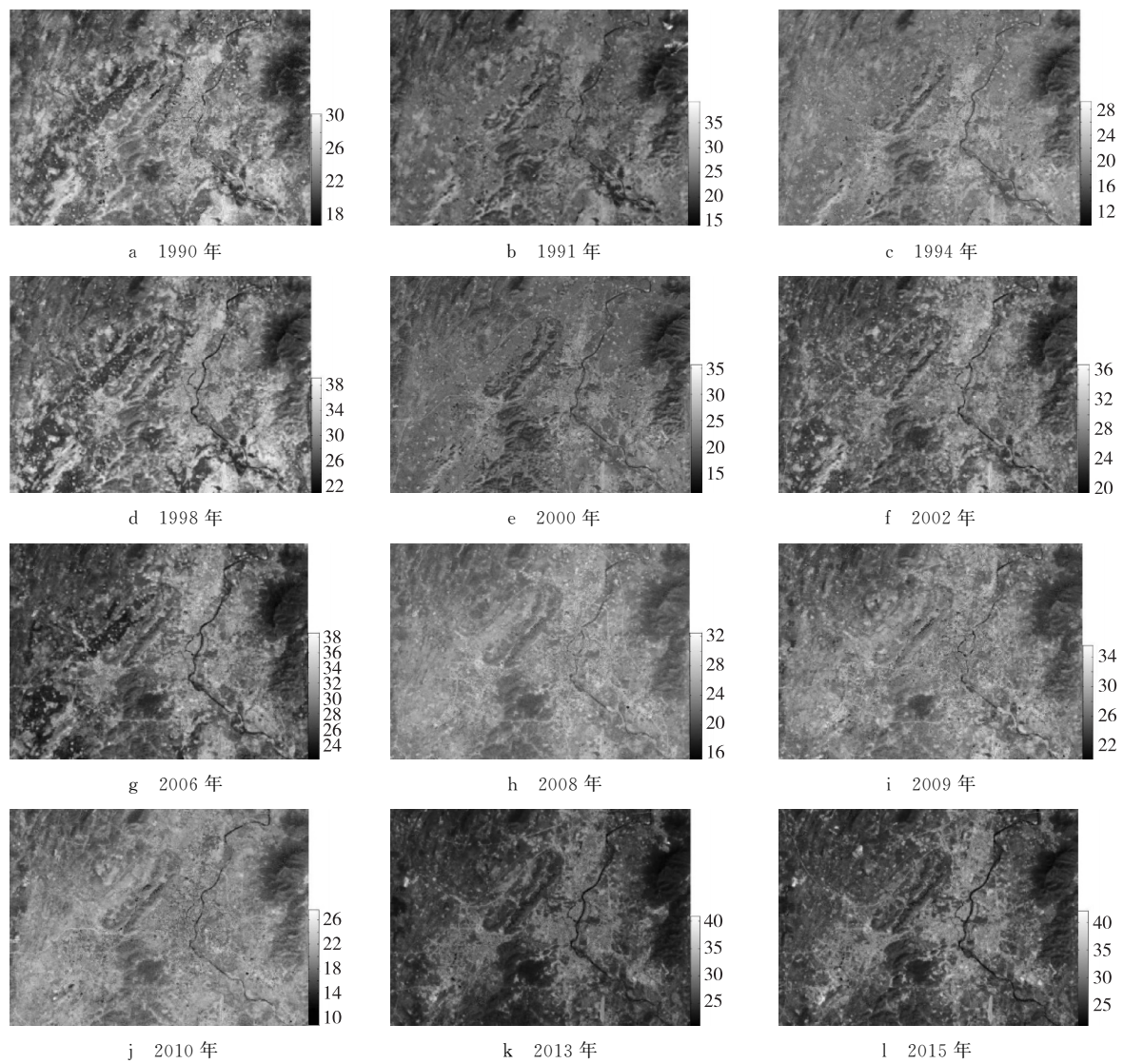


图 1 1990—2015 年 Landsat 数据反演地表温度

Fig. 1 Land surface temperature derived from Landsat data from 1990 to 2015

表 1 遥感反演的典型地物平均温度

Tab. 1 Derived average temperature of typical land covers

°C

地物	年份											
	1990	1991	1994	1998	2000	2002	2006	2008	2009	2010	2013	2015
建筑/道路	28.0	28.4	24.6	36.7	21.9	29.0	31.1	24.7	27.2	19.2	28.4	33.9
植被	21.2	20.8	17.0	27.1	18.7	24.4	25.9	21.7	25.4	16.6	24.1	25.8
水体	18.7	18.2	16.0	23.6	16.3	23.1	24.8	19.6	22.2	14.6	22.8	23.2
裸土	26.6	27.3	22.6	33.8	22.4	29.2	30.9	25.9	28.5	21.1	28.5	30.5
裸岩	24.7	26.4	19.6	30.3	21.3	28.0	28.8	23.8	26.0	17.8	31.4	29.5

表 2 遥感反演的喀斯特山峰平均温度

Tab. 2 Derived average temperature of karst hills

°C

坡向	年份											
	1990	1991	1994	1998	2000	2002	2006	2008	2009	2010	2013	2015
阳坡	22.4	22.6	19.0	28.0	19.1	25.6	27.1	22.5	26.7	18.3	25.3	26.5
阴坡	20.6	20.1	16.4	26.5	16.4	23.5	25.5	20.7	24.7	15.9	23.4	25.0

2.2 地表温度的时间变化

不同时相的地表温度图由于温度数值范围不同而无法直接比较,因此为了获取地表温度的时间变化规律,在温度图中提取喀斯特山峰茂密林地的地表温度(t_F),并将研究区地表温度(t)大于 t_F 的像元均定义为高温像元,而满足 $\frac{t-t_F}{t_F} \geq 0.2$ 的像元定义为极高温像元,统计它们占总像元的百分比,结果如表3所示。从表3可以看出,1990—2015年高温像元比例总体呈现出逐渐上升的趋势,1990年为61.9%,2015年达到75.2%,但在1994—1998年和2010—2015年出现略有下降的趋势。同时期的极高温像元比例也呈与前者基本相同的变化趋势。为了保护漓江,2007年8月桂林市启动了临桂新区的大规模建设,2006—2010年的建筑/道路、建筑工地裸土、采石场裸岩等高温像元比例上升幅度较大;2012年《桂林国际旅游胜地建设发展规划纲要》获国家发改委批复、2014年桂林获批“中国南方喀斯特第二期”世界遗产,这让新开发区城市绿化建设得以加强,故2010—2015年高温像元比例出现了下降趋势。

表3 地表温度高于喀斯特山峰林地温度的像元比例

Tab.3 Proportion of pixels with land surface temperature above karst forest

像元类型	温度	年份											
		1990	1991	1994	1998	2000	2002	2006	2008	2009	2010	2013	2015
高温像元	$t > t_F$	61.9%	64.8%	67.6%	65.8%	68.2%	70.8%	71.9%	75.6%	76.1%	79.7%	77.4%	75.2%
极高温像元	$\frac{t-t_F}{t_F} \geq 0.2$	4.3%	7.5%	8.5%	7.3%	10.4%	12.1%	11.2%	12.9%	12.4%	13.4%	11.8%	9.9%

注: t 为像元温度, t_F 为喀斯特山峰茂密林地的地表温度

2.3 地物覆盖率变化对地表温度的影响

将 P_V, P_W, P_B, P_S 和 P_R 均分为10等份,统计研究区在上述指标各等份上的平均温度。从图2可知地表温度随地物覆盖率变化近似呈线性关系。统计地物覆盖率增加0.1时温度变化的均值,结果见表4。地表温度随混合像元中植被覆盖度、水体覆盖率增加0.1而分别降低0.5~0.7℃,0.2~0.4℃,呈明显负相关关系;而地表温度随混合像元中建筑覆盖率、裸土率、裸岩率增加0.1而分别升高0.4~0.7℃,0.4~0.6℃和0.3~0.5℃,呈明显正相关关系。此外,研究结果还显示:植被覆盖增加导致的地表温度降低幅度明显比水体覆盖增加而导致的地表温度降低幅度更大;建筑覆盖增加导致的地表温度上升幅度也略高于裸土和裸岩覆盖增加导致的地表温度上升幅度。

3 讨论与结论

与已有其他类型城市的相关研究相比,本研究将Landsat图像应用到喀斯特城市时,像元实际上是包含了各地物的混合像元,其中地物还增加了喀斯特山峰裸岩。本研究定量地分析了混合像元中各地物覆盖率变化对地表温度的影响,而混合像元中各地物覆盖率的不同将直接影响喀斯特城市地表温度、热环境和局部小气候。

本研究中,因植被覆盖增加导致地表温度降低的效果明显优于因水体覆盖增加而引起的类似效果,这是因为在覆盖率相同时,植被叶片蒸腾的面积大于水体蒸发面积。桂林城区中有大面积的喀斯特山峰,峰上自然生长着以落叶阔叶林与常绿阔叶林混交林为主的喀斯特森林植被。这些被设置为公园并受到人为长期保护的喀斯特山峰森林树冠基本相连、葱茏繁茂,故地表温度较低,呈现凉岛效应,从而调节了喀斯特城市热环境,降低了局部区域的热岛现象。此外,桂林市相关部门还在道路两侧、建筑周边大量种植榕树(*Ficus microcarpa*)、樟树(*Cinnamomum camphora*)、桂树(*Osmanthus fragrans*)、玉兰(*Magnolia denudata*)等乡土树种,这些树种树冠覆盖地表面积较大,在一定程度上降低了地表温度,减缓甚至抵消了因城市扩展而导致的高温像元增加的趋势。另外,两江(漓江、桃花江)四湖(榕湖、杉湖、桂湖、木龙湖)是桂林主城区中较大的水体,水体热容量较高,这也调节了喀斯特城市的热环境,对缓解局部热岛现象也发挥着重要作用。

本研究还发现,因建筑覆盖增加导致地表温度上升的幅度略高于因裸土和裸岩覆盖增加而引起的类似效果,原因在于:在亚热带季风气候的喀斯特地区,土壤易吸收水分,土壤的地表温度受到土壤含水量的影响;且裸岩存在于喀斯特山峰,常夹杂于植被中。而在覆盖植被遭受人为破坏、大面积石灰岩山体完全裸露、作为采石场

用途的喀斯特山峰,通常表现出严重的石漠化现象,因而在遥感反演结果图像中一直呈现为裸岩高温像元。这种现象很难改变,因为裸岩间的土壤土层瘠薄,植被生长环境恶劣,植被覆盖很难在短时间内恢复。极高温像元则主要出现在城市新扩展区中建筑密集的工业园,这些区域的植被覆盖度或水体覆盖率较低。然而,可通过人工绿化大量种植乡土树种,提高上述区域内的植被覆盖度,降低地表温度。

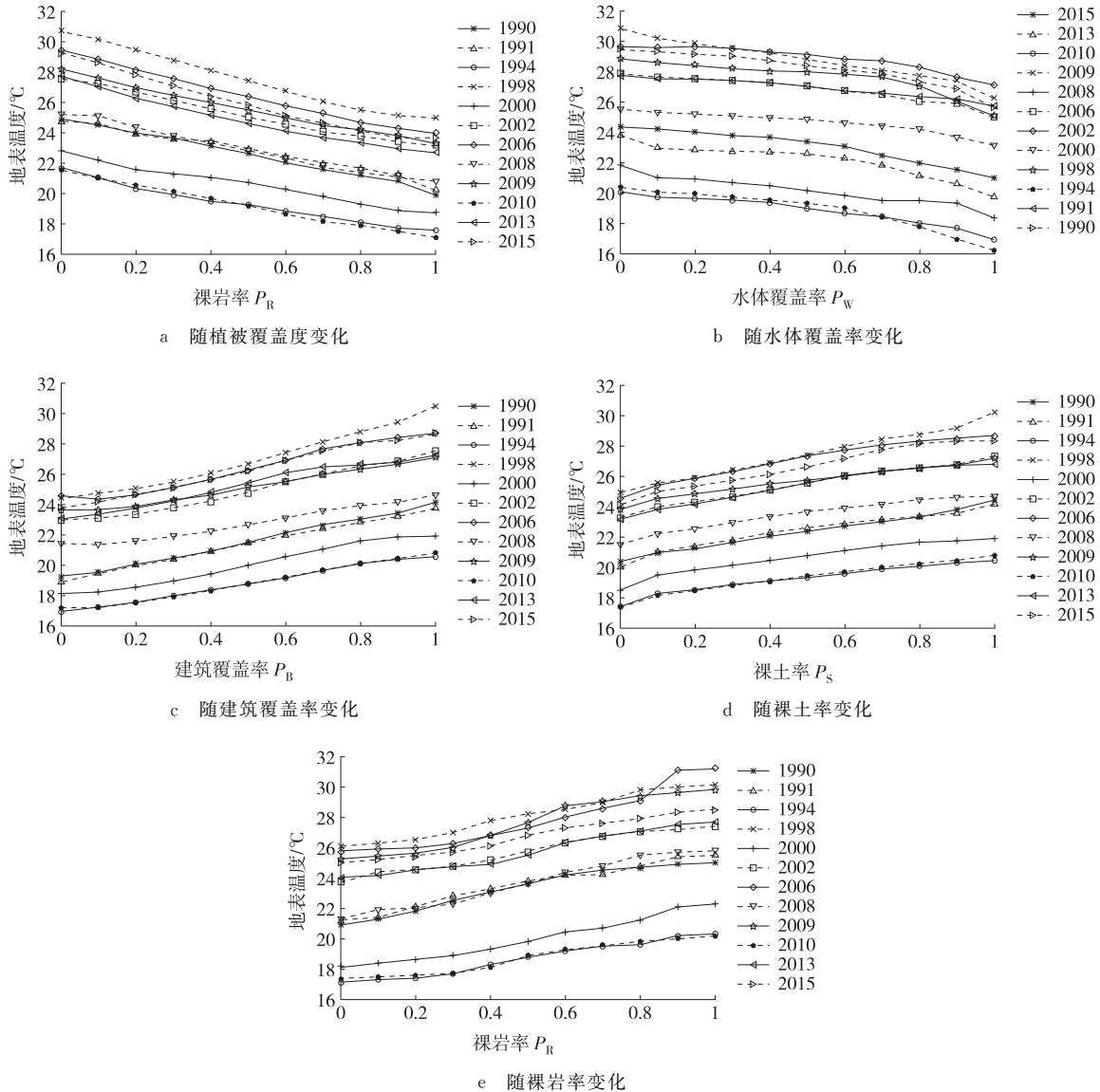


图 2 地表温度随像元中不同地物覆盖率的变化

Fig. 2 Different land cover fraction against land surface temperature in pixels

表 4 地表温度随地物覆盖率增加 0.1 的变化

Tab. 4 Changes of land surface temperature in response to typical land cover increments of 0.1 °C

覆盖率	年份											
	1990	1991	1994	1998	2000	2002	2006	2008	2009	2010	2013	2015
P_V	-0.62	-0.57	-0.51	-0.70	-0.51	-0.55	-0.68	-0.55	-0.62	-0.55	-0.63	-0.69
P_W	-0.31	-0.38	-0.29	-0.40	-0.33	-0.27	-0.24	-0.22	-0.35	-0.39	-0.20	-0.36
P_B	0.61	0.61	0.45	0.69	0.47	0.57	0.52	0.40	0.44	0.45	0.53	0.62
P_S	0.51	0.53	0.38	0.60	0.43	0.51	0.52	0.40	0.42	0.42	0.45	0.52
P_R	0.41	0.43	0.33	0.41	0.42	0.36	0.49	0.46	0.46	0.31	0.37	0.33

此外,研究区中裸土的面积并不多,且主要是建筑工地。有时为减少工程车工作时引起的扬尘对环境的影

响,在这些区域中通常会采取洒水降尘措施;在太阳辐射下,表层湿润的土壤地表温度比表层较干燥的土壤地表温度更低。

总之,通过本研究,可得出以下结论:

1) 喀斯特城市桂林地表温度受人为因素和植被覆盖的影响较明显,其中建筑/道路、喀斯特山峰裸岩和干燥裸土的地表温度相对较高,水体和茂密植被覆盖的喀斯特山峰阴坡的地表温度最低,较大型的、茂密植被覆盖的喀斯特山峰阳坡的地表温度也相对较低;受地形影响,在太阳辐射下,喀斯特山峰阳坡地表温度比阴坡地表温度高 $1\sim 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

2) 1990—2015年研究地的地表温度高于喀斯特山峰茂密林地地表温度的高温像元比例呈逐渐上升的趋势,1990年为61.9%,2015年达到75.2%,但在1994—1998年和2010—2015年出现略为下降的现象;极高温像元比例也呈增加的趋势。城市绿化在一定程度上降低了地表温度,减缓甚至抵消了城市扩展导致的高温像元的增加趋势;但喀斯特森林植被遭受人为破坏、出现严重石漠化现象的喀斯特山峰呈现为裸岩高温像元的现象在短时间内很难改变。

3) 研究地的地表温度随混合像元中植被覆盖度、水体覆盖率增加0.1而分别降低 $0.5\sim 0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$, $0.2\sim 0.4\text{ }^{\circ}\text{C}$;随混合像元中建筑覆盖率、裸土率、裸岩率增加0.1而分别升高 $0.4\sim 0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$, $0.4\sim 0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$, $0.3\sim 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

致谢:感谢北京师范大学遥感科学国家重点实验室朱启疆教授为本项目研究提供的建议与支持。

参考文献:

- [1] 陈倩,周启刚,金亚美.基于 Landsat TM 的重庆都市区地表热环境时空变化研究[J].水土保持研究,2014,21(6):84-90.
CHEN Q,ZHOU Q G,JIN Y M. Research on temporal and spatial changes of land thermal environment based on Landsat TM in Chongqing metropolitan area[J]. Research of Soil and Water Conservation,2014,21(6):84-90.
- [2] MOHAN M, KANDYA A. Impact of urbanization and land-use/land-cover change on diurnal temperature range [J]. Science of the Total Environment,2015,506/507(2):453-465.
- [3] 杨丽萍,孔金玲,郭玉芳,等.西安城区地表温度的遥感反演与时空演变分析[J].兰州大学学报(自然科学版),2015,51(3):388-396.
YANG L P,KONG J L, GUO Y F, et al. Inversion and temporal-spatial evolution analysis of land surface temperature in urban Xi'an based on remote sensing data[J]. Journal of Lanzhou University(Natural Sciences),2015,51(3):388-396.
- [4] 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(7):1099-1105.
WANG M Y,XU H Q,FU W, et al. Spatiotemporal variation of urban surface water and its influence on urban thermal environment [J]. Scientia Geographica Sinica,2016,36(7):1099-1105.
- [5] 谢启姣,刘进华,胡道华.武汉城市扩张对热场时空演变的影响[J].地理研究,2016,35(7):1259-1272.
XIE Q J,LIU J H,HU D H. Urban expansion and its impact on spatio-temporal variation of urban thermal characteristics[J]. Geographical Research,2016,35(7):1259-1272.
- [6] 李昕瑜,杜培军,阿里木·赛买提.南京市地表参数变化与热岛效应时空分析[J].国土资源遥感,2014,26(2):177-183.
LI X Y,DU P J,ALIM S. Spatial-temporal analysis of urban heat island effect and surface parameters variation in Nanjing city[J]. Remote Sensing for Land and Resources,2014,26(2):177-183.
- [7] CHEN Y J, YU S X. Impacts of urban landscape patterns on urban thermal variations in Guangzhou, China [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation,2017,54(2):65-71.
- [8] SHARMA R, JOSHI P K. Mapping environmental impacts of rapid urbanization in the national capital region of India using remote sensing inputs [J]. Urban Climate,2016,15(3):70-82.
- [9] MORABITO M, CRISCI A, MESSERI A, et al. The impact of built-up surfaces on land surface temperatures in Italian urban areas [J]. Science of the Total Environment,2016,551/552(5):317-326.
- [10] 杨可明,周玉洁,齐建伟,等.城市不透水面及地表温度的遥感估算[J].国土资源遥感,2014,26(2):134-139.
YANG K M,ZHOU Y J, QI J W, et al. Remote sensing estimating of urban impervious surface area and land surface temperature [J]. Remote Sensing for Land and Resources,2014,26(2):134-139.
- [11] 魏宝成,银山,宋洁,等.呼和浩特市不同植被指数与地表温度的定量遥感关系[J].水土保持研究,2015,22(5):79-85.
WEI B C, YIN S, SONG J, et al. Quantitative analysis on the relationship between land surface temperature and different vegetation indices based on remote sensing [J]. Research of Soil and Water Conservation,2015,22(5):79-

- 85.
- [12] 潘涛,张弛,杜国明,等. 城乡不透水面增长格局及地表温度的响应特征研究[J]. 地球信息科学学报,2017,19(1):134-142.
- PAN T,ZHANG C,DU G M,et al. Pattern of impervious surface change and its effect on land surface temperature in urban and rural areas[J]. Journal of Geo-information Science,2017,19(1):134-142.
- [13] 买买提江·买提尼亚孜,阿里木江·卡斯木. 干旱区典型城市下垫面特征及其与地表热环境的关系研究[J]. 生态环境学报,2015,24(11):1865-1871.
- MAIMAITIJIANG M, ALIMUJIANG K. Study on land surface characteristics and its relationship with land surface thermal environment of typical city in arid region[J]. Ecology and Environmental Sciences,2015,24(11):1865-1871.
- [14] WENG Q H,LU D S. A sub-pixel analysis of urbanization effect on land surface temperature and its interplay with impervious surface and vegetation coverage in Indianapolis, United States [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation,2008,10(1):68-83.
- [15] 覃志豪,李文娟,徐斌,等. 陆地卫星 TM6 波段范围内地表比辐射率估计[J]. 国土资源遥感,2004,61(3):28-32.
- QIN Z H,LI W J,XU B,et al. Estimation of land surface emissivity for landsat TM6[J]. Remote Sensing for Land and Resources,2004,61(3):28-32.
- [16] VALOR E,CASELLES V. Mapping land surface emissivity from NDVI[J]. Remote Sensing of Environment,1996,57(3):167-184.

Temporal and Spatial Change Analysis of Land Surface Temperature and Land Cover Influence in a Karst City, Guilin

WANG Kaining¹, WANG Xiuxin^{2,3}

(1. School of Urban and Environmental Sciences, Liaoning Normal University, Dalian Liaoning 116029;

2. College of Computer Science and Information Technology, Guangxi Normal University, Guilin Guangxi 541004;

3. State key Laboratory of Remote Sensing Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: [Purposes]The impact of urban rapid expansion on thermal environment needs to be analyzed in Guilin, a karst city, from 1990 to 2015. [Methods]The temporal and spatial changes of land surface temperature (LST) were derived from 12 Landsat images with the proposal of the emissivity estimation method in the mixed pixels on karst hills. Then the derived affecting factors on LST, including vegetation coverage, building percentage, water percentage, bare rock percentage and bare soil percentage, was analyzed. [Findings]1) LSTs in the study area of buildings, roads, dry soil and bare rocks on sunny karst slopes are highest, while LSTs of water body and dense vegetation on shady karst slopes are lowest. LSTs of dense vegetation on sunny karst slopes also are very low. LSTs of sunny karst slopes are 1~3 °C higher than those of shady karst slopes under solar radiation. 2) The percentage of high temperature pixels which are defined as their LST above that of dense forest on the karst hills shows an upward trend from 61.9% to 75.2% during 1990~2015 in the study area. 3) LSTs decreases respectively from 0.5 °C to 0.7 °C, from 0.2 °C to 0.4 °C with 0.1 increasing of vegetation and water body percentages, and increases respectively from 0.4 °C to 0.7 °C, from 0.4 °C to 0.6 °C, from 0.3 °C to 0.5 °C with 0.1 increasing of building, bare soil and bare rock percentages in the study area. [Conclusions]LSTs are influenced by human, vegetation coverage and terrain in Guilin.

Keywords: karst city; remote sensing; land surface temperature; temporal and spatial changes; land cover influence; Guilin

(责任编辑 方 兴)