

基于 TM/ETM⁺ 和 MODIS 的漓江流域生态环境遥感动态监测

吴虹, 郭远飞, 郭建东, 张银桥, 贾志强, 党宇宁
(桂林工学院遥感应用研究所, 桂林 541004)

摘要: 为调查漓江流域近 30 a 来的生态环境变化, 开展了基于 TM/ETM⁺ 和 MODIS 遥感长、短周期结合的动态监测研究。通过对 3 期 Landsat - 5/7 TM/ETM⁺ 遥感影像的信息提取、模式识别和实际调查, 发现造成漓江上游生态环境退化的主要原因与漓江水源林遭人为破坏、城市化扩展和水质污染等因素有关。通过对 MODIS - NDVI 和水体反射波谱分析, 初步探明了流域区植被总量的季节变化规律和漓江水体污染的遥感反射波谱特征, 确定了水质遥感监测的最佳 MODIS 波段, 得到了研究区的植被覆盖、城市扩展变化及河流水质变化信息。

关键词: 漓江; 生态环境; 动态监测; TM; ETM⁺; MODIS

中图分类号: TP 79 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001 - 070X(2007)03 - 0056 - 06

0 引言

漓江从北至南纵贯桂林地区, 清澈见底的江水与沿岸千姿百态的岩溶地貌, 组成了闻名中外的桂林山水。但近 30 a 来, 漓江水量急剧减少, 枯水期越来越长, 水质降低, 生态环境出现退化趋势^[1~4]。为探寻这种剧烈变化的原因, 笔者曾采用 Landsat 遥感数据对漓江水源林开展调查, 得到自 20 世纪 80 年代以来漓江流域区生境退化的结论^[5]。但由于 Landsat 卫星观测重现周期长, 影像波段数少且 Landsat - 7 已停运, 无法及时开展动态跟踪监测, 为此, 在文献^[5]研究基础上, 将研究范围扩大至整个漓江流域区, 并增加了 Terra/Aqua - MODIS 遥感。由于 MODIS 具有每天最少 2 次白天和 2 次晚上的更新数据, 通过对其与 TM/ETM⁺ 遥感数据的结合使用, 使对漓江流域区开展持续的遥感动态监测成为可能。

1 研究区概况

漓江属于珠江 3 级水系, 发源于广西东北部的猫儿山, 流经桂林市, 止于平乐县。漓江流域位于东经 109°45' ~ 110°40', 北纬 24°18' ~ 25°41' 之间, 东西平均宽度约 34 km, 南北长度约全长 214 km, 总面积 6 050 km²。该区域内由于特殊的喀斯特地貌——“桂林山水”而著称于世。研究区位置如图 1

所示。图中区域为 MODIS 影像数据区, 粗线框为 TM/ETM⁺ 数据区。

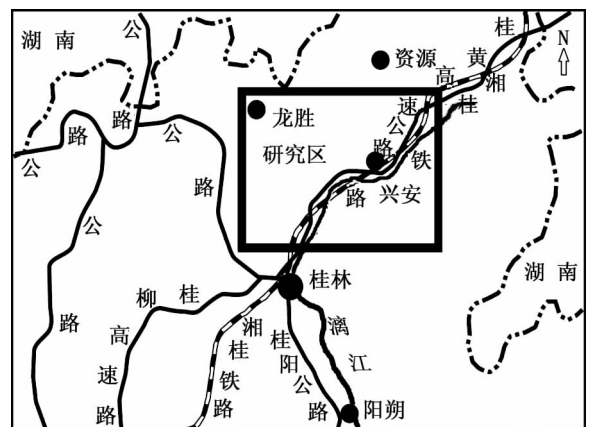


图 1 漓江生态环境变化遥感调查区

2 监测信息提取

植被覆盖、城市化面积和河流水质信息是反映生态环境状况的重要标志, 故以其遥感影像特征作为本次调查的基本信息, 并根据特征差异采取不同的遥感信息提取技术。

2.1 植被信息提取

植被覆盖是反映生态环境状况的最为重要的信息之一, 通常采用遥感植被指数测度, 已有多种计算遥感植被指数的算法。本研究对 2 种不同类型的遥感数据(TM/ETM⁺ 和 MODIS) 分别采用增强型植被指数模型和归一化植被指数模型进行计算^[6,7]。

对于 TM/ETM⁺ 影像:

$$RVI = TM4/TM2 \text{ 或者 } RVI = ETM^+ 4 / ETM^+ 2 \quad (1)$$

式中, *RVI* 为比值植被指数; *TM* 4 和 *TM* 2 为 Landsat 5 的第 4 和第 2 波段的像元亮度值; *ETM*⁺ 4 和 *ETM*⁺ 2 为 Landsat 7 的第 4 和第 2 波段的像元亮度值。

对于 MODIS 影像,采用归一化植被指数模型^[8,9]:

$$NDVI = (B2 - B1) / (B2 + B1) \quad (2)$$

式中, *NDVI* 为归一化植被指数, *B*1、*B*2、*B*3 分别为 MODIS 第 1、2、3 波段的像元亮度值。

为直观反映植被指数与植被覆盖的消长关系,采用如下的植被假彩色增强显示方案,以突出对植被分布的增强揭示效果。

对于 TM/ETM⁺ 影像:

$$F = R\{ETM^+ 4\} \oplus G\{RVI\} \oplus B\{ETM^+ 2\} \quad (3)$$

对于 MODIS 影像:

$$F = R\{B1\} \oplus G\{NDVI\} \oplus B\{B3\} \quad (4)$$

式中, *F* 为假彩色合成图像; *R*{}, *G*{}, *B*{ } 为红、绿、蓝变换; *ETM*⁺ 4 和 *ETM*⁺ 2 表示 *ETM*⁺ 影像的第 4 和第 2 波段;符号“⊕”表示假彩色合成。

2.2 城市化面积信息提取

城市化面积是反映人类干预、侵占和破坏自然生态环境的直接依据和指标之一。本研究主要通过监督与非监督分类相结合来提取这方面的信息。非监督分类 (Unsupervised Classification) 采用 K - Means 法,监督分类 (Supervised Classification) 采用平行六面体法。因为 MODIS 的 250 m 空间分辨率对城镇区域反映过粗,故分类处理只限于对 TM/ETM⁺ 影像进行。具体分类实施采用递进分类法,即:首先,用 K - Means 法定出粗分类区;然后,根据粗分类区与实际的吻合情况筛选出 ROI,从中提取特征;最后,用平行六面体法进行监督分类,利用城市化区域模式识别结果,最终识别、圈定出的城市

化区域能够更加接近于实际情况。

2.3 水质信息提取

水质污染状况是反映漓江流域区生境质量的重要指标。漓江上游受到沿岸工业、农业、旅游业及城镇生活固体废弃物和废水排放增加的影响,水质受到了不同程度的污染。主要污染类型包括固体悬浮物(泥沙和垃圾等)污染、有害化学成分污染、油污染和“富营养化”污染等。污染程度增加导致江水对太阳光电磁波反射、吸收和透射能力发生变化,使水体的表层反射率改变。另外,叶绿素在水中的含量是衡量水体初级生产力和营养作用的指标,其变化也对水环境有重要影响。通过对漓江主要补水源——青狮潭水库水体的 MODIS - Z 剖面水体反射波谱特性测量,进行水体反射波谱特征变化时间序列动态分析,快速获得了漓江的水环境信息。

3 监测分析与评价

本研究采用长短周期监测相结合的方法。所谓长周期遥感动态监测,是指以数年为时间间隔的遥感监测。根据可获得卫星数据实际情况,研究采用了 1986 年 12 月、1998 - 10 - 01 和 2002 - 01 - 05 共 3 个时相的 Landsat - 5/7 TM/ETM⁺ 影像作为长周期监测的数据源。所谓短周期卫星遥感动态监测,是指以月或者天为时间间隔的遥感监测。由于 EOS - MODIS 可以免费获得每天最少 2 次白天和 2 次晚上的 36 个光谱波段和 3 种空间分辨率的更新数据,因而,可以作为短周期监测的理想遥感数据。短周期监测是对长周期监测的时间片断采样,长周期监测是对系列短周期变化信息的累积反映。两者相结合可以观测到流域区宏观的生境动态变化。植被指数、城市化扩展面积和漓江水质污染监测项目,可以安排在两种监测中穿插运用,如图 2 所示。

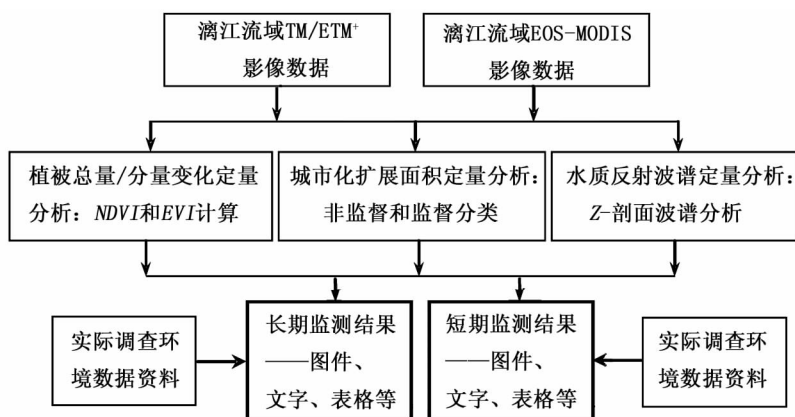


图 2 监测技术实施流程

3.1 长周期监测

3.1.1 植被总量变化分析

根据式(1)~(4)基于 RVI 的比值植被指数增强显示模型,高植被指数区域增强显示为与植被相近的绿色,色度越强植被越发育。比较插页彩片 17~19 可见,随着时间发展,高植被指数区域的绿色范围明显逐渐变小。具体而言,1986 年 12 月影像上(插页彩片 17),对应高植被指数的绿色是全区的主色调,范围几乎覆盖整个图区,只在漓江两岸的冲击平原区才显示为紫红色调。表明当时漓江源头及上游小流域区的生态环境尚处于良性状态。但到了 20 世纪 90 年代末期,绿色范围明显缩小,只剩下北西和东南角存在 2 小片(插页彩片 18)。在红色与绿色范围之间还存在一个较明显的色彩过度带,在位于青狮潭水库北北西的东江河两侧,以及位于猫儿山东南方向的华江河、黄柏江及洞河等漓江支流水系两侧的山脊上,也还存在少量零散的点状绿色区域。这表明此时漓江源头的原始林区已开始遭到

了较大的破坏,但以猫儿山和海洋山为中心的保护区及其外围尚存较多未被破坏的原始林区。2002 年,绿色范围进一步缩小,只剩以猫儿山和海洋山为中心的两个孤立小绿洲,在 20 世纪 90 年代尚存的过度带已经消失,包括水源林区在内的整个漓江上游小流域区都处于了一片紫红色调覆盖之下,直观反映出漓江源头水源林和上游小流域区的植被已经遭受更为严重的破坏,见插页彩片 19。以上结论笔者在 2004 年 4 月实地考察时被查证。

3.1.2 植被分类变化分析

根据实际资料以及对 TM/ETM⁺ 影像的非监督/监督分类(插页彩片 20~25),将研究区分为原始林区、针阔叶混交林区、灌木区、植被稀少区、农耕地区、城镇区和水体区 7 种不同的生态区域。通过这 7 种区域面积变化信息的定量分析,可以直接或间接反映出漓江水源林和上游小流域区环境的变化。采用 GIS 工具对影像监督分类结果进行统计,结果见表 1 和图 3。

表 1 不同生态区监督分类统计

分类区色调	对应环境区域类型	占调查区面积/km ²			占调查区面积百分比/%		
		1986 年	1998 年	2002 年	1986 年	1998 年	2002 年
棕红色	原始林区	1 262	513.8	214.9	24.68	8.86	4.12
浅绿色	针阔叶混交林区	225.5	1 284	997.1	4.41	22.14	19.13
灰色	灌木林区	96.6	745.4	10.95	1.89	12.86	0.21
黄色	植被稀少区	2 505	1 557	2 553	48.98	26.86	48.97
紫红色	农耕地	157.7	345.3	361.3	3.08	5.95	6.93
红色	市区	6.7	57.43	149.2	0.13	0.99	2.86
蓝色	水体	9.4	6.94	5.47	0.18	0.12	0.11

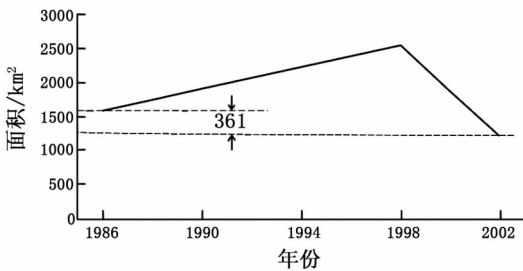


图 3 漓江上游地区水源林面积变化

由图 3 可见,漓江水源林区的面积在近 20 多 a 里,经历了从小增大,再减小的变化过程。其原因尚有待研究,但漓江水源林区的面积从 1986 年的 1 584.1 km²,减少到 2002 年的 1 222.95 km²,面积总量减少了 22.8%,表明漓江源生态环境在退化。

3.1.3 城镇区域变化分析

城镇作为人类侵占自然环境空间的产物,其面积的扩展变化直接反映了人类活动对生态环境影像的程度。由监督分类影像揭示的 5 个主要城镇——灵川县、兴安县、潭下镇、三街镇和溶江镇的面积变化情况可以说明这一问题。在 1986、1998 和 2002 年共 3 个时相的 ETM⁺ 影像上,这 5 个城镇区域显示为明显的灰蓝色影像特征,可见它们的面积随着

年代的增加而增加。通过监督分类处理,城镇区域被准确识别出来,并被彩色编码为红色。可发现它们都具有随着时间增加面积越来越大、形态也越来越复杂的变化趋势。采用 MapGIS 定量测算 5 个城镇在这 3 个时间的面积变化(表 2 和图 4)。可见,灵

表 2 3 个时间的漓江上游主要城镇面积 (单位: km²)

时间	灵川县	兴安县	潭下镇	三街镇	溶江镇
1986 年	2.02	1.06	0.16	0.30	0.26
1998 年	4.27	2.48	0.32	0.57	0.43
2002 年	8.02	2.97	0.35	0.69	0.43

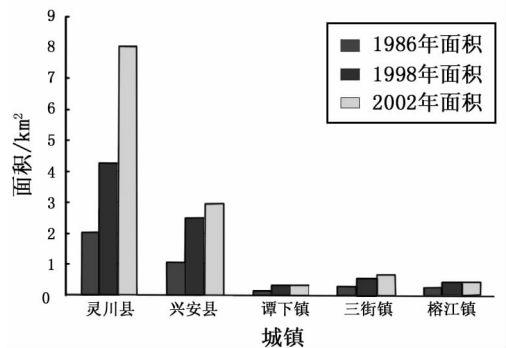


图 4 漓江上游主要城镇区域面积变化

川县城区扩展速度较快,2002 年城区面积比 1986 年扩大近 4 倍,而且近 4 a 发展比前 10 a 要快近 13 倍,其次为兴安县,其它 3 个镇的面积也有不同程度扩大。整个调查区城镇总面积扩展变化统计结果见图 5。

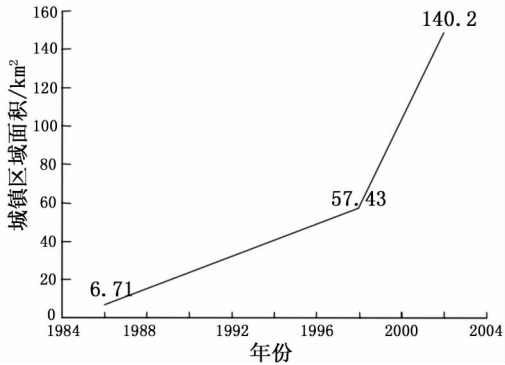


图 5 漓江上游地区城镇面积变化

从图中可见,城镇面积由 1986 年的 6.71 km² 增至 2002 年的 140.2 km²,17 a 间增加了 133.49 km²,约为原来面积的 21 倍^[5]。在非监督分类图中的黄色区域是人类活动频繁区域,1986 年时该区域内分布着较多的绿-蓝色斑块——针叶和阔叶林区,但到了 1998 年,这些区域明显减少,而到了 2002 年,近乎全部消失,使得该区域整体变成了连续的“黄土地”。这些直观反映出桂林市快速发展的经济活动已经对漓江-湘江水系上游的小流域区的生态环境,造成了越来越大的负面影响。

3.2 短周期监测

3.2.1 MODIS 数据

通过 2004 年 11 月建立的“中国科学院地理科学与资源研究所——桂林工学院 EOS-MODIS 数据共享网桂林工学院节点”获取 Aqua/Terra MODIS 数据。数据下载后经过了 Bowtie 消除、几何校正、太阳高度角校正及将 Scaled Integers 值换算成反射率或者辐射值(Scaled_Integers * Reflectance_Scales + Radiance_Offsets)等预处理。经过预处理的数据按时间刻录光盘存储,然后入库保存。由于是 24h 连续下载数据,可以确保连续监测所需的数据源(云层覆盖除外)^[9]。

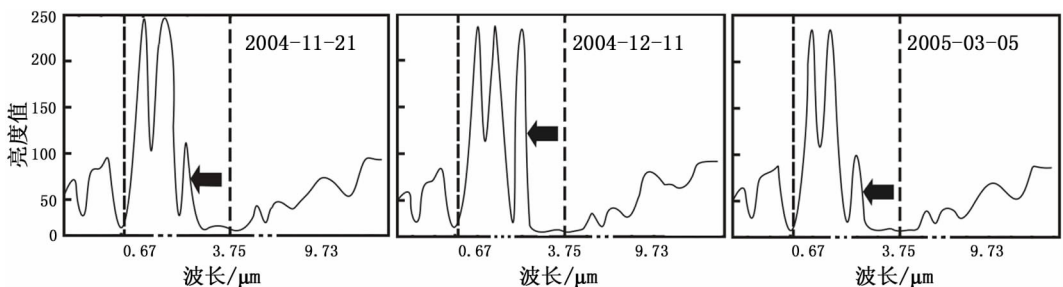


图 6 由 MODIS 遥感影像数据提取的漓江上游青狮潭水库水体反射波谱曲线(Z-剖面)

3.2.2 植被总量变化分析

插页彩片 26~28 是整个漓江流域 MODIS 影像的 NDVI 密度分割增强显示。图上从深绿色—绿色—浅绿色—黄色,依次为对应高($NDVI > 0.63$)—较高($0.41 \leq NDVI < 0.63$)—中等($0.25 \leq NDVI < 0.41$)—低($NDVI < 0.25$)4 种程度的植被覆盖率分布区,直观反映了整个漓江流域区植被总量的分布概貌。从中可以看出,插页彩片 26 和 27 具有非常相似的特征,这与两者观察时间接近,植被覆盖总量变化不大有关。而插页彩片 28 中的高一较高程度绿色区域范围相对于插页彩片 26 和 27 有缩小,并且,对应于低值的黄色区域变得零散和向下游地区扩散。这是由于成像时间(2005-03-05)正值冬末,大多数植物尚处落叶枯萎状态。这 3 幅 MODIS 比值合成密度分割图像揭示的植被总量空间分布变化规律,由表 3 数据得到定量反映。

表 3 漓江流域 3 个时相的 MODIS 影像 NDVI 分级所占比重统计结果

NDVI	成像时间			增强显示色调
	2004-11-21	2004-12-11	2005-03-05	
<0.25	0.036 3	0.046 4	0.286 6	黄色
[0.25,0.41)	13.352 7	6.442 8	16.512 3	浅绿色
[0.41,0.63)	53.086 9	67.996 0	74.341 7	绿色
>0.63	33.524 0	15.514 1	8.859 4	深绿色

3.2.3 水质变化分析

MODIS 具有 36 个成像光谱通道,分布在从可见光~红外($0.415 \mu\text{m} \sim 14.235 \mu\text{m}$)的波段范围内。4 种主要污染类型——固体悬浮物(泥沙和垃圾等)、有害化学成分、油和“富营养化”的存在无疑会改变水体的波谱特征曲线的形态。通过 ENVI 软件的 Z-剖面可以提取 MODIS 影像的任意像元点的波谱特性曲线,快速发现水体的波谱特性曲线发生的改变,从而实现了对漓江水质状态的及时动态监测。

青狮潭水库是漓江上游最大的水库,漓江补水完全由其提供,因此,其水质基本可以代表漓江水质。图 6 是对上游青狮潭水库水体用 2004-11-21、2004-12-11 和 2005-03-05 共 3 个时相的

MODIS 影像数据做出的反射波谱曲线,图中箭头所指为对水质变化呈敏感反应的 B15 和 B17 波峰变化。分析得如下认识:

第一,不同时间的 MODIS 波谱曲线一致反映出,总体上,漓江水体存在 3 个相对独立的辐射波峰/波谷谱段,即:0.415~0.67 μm 、0.92~3.75 μm 和 3.75~14.235 μm 谱段。为讨论方便,依次称为 A(左)、B(中)、C(右)谱段,各谱段的形态和幅值各异。其中,A 谱段以中值双峰曲线形态为特征(极大峰值约为 100),主要是对水体可见光反射波谱特性的反映;B 谱段以连续 3 高峰值曲线形态为特征(极大峰值为 255),主要是对水体反射和发射的近、中红外的混合波谱特性的反映;C 谱段为逐级增大的 4 连峰曲线形态为特征(极大峰值约为 100),主要是对水体发射的远红外光波谱特性的反映。

第二,在 A、B、C 三个谱段中,随时间变化而曲线形态改变最明显的是 B 谱段,而 A、C 谱段的波形基本无变化或变化迟钝。B 谱段变化的主要表现在,位于该谱段内的 0.743~0.753 μm (B15 波段)和 0.890~0.920 μm (B17 波段)两个波峰,在不同时间的幅度起伏变化很大。由 2004-11-21 曲线可见,B15 的极大峰值为 255,而其它两个时间的 B15 的极大峰值<255,表明在 2004-11-21 左右,漓江水体中与 B15 相对应的污染物较多,水质较差。在 2004-12-11 的曲线中,B17 波段出现了与 B13 和 B15 几乎等高度的峰值(约为 255),而在其它两个时间里,B17 只是很不起眼的低值峰值(约为 110),也表明在 2004-12-11 左右,漓江水体中与 B17 相对应的污染物较多,水质也较差。根据 MODIS 的波段功能/用途设计,B8~B16 波段的主要用途是对海洋水色、水体表层性质和生物化学观测,B17 主要用途是对大气水分观测。在青狮潭水库的应用表明,B15 显示出了与设计完全一致的效果,而 B17 虽然原来是面向大气水分观测的设置,但在对青狮潭水库水体观测的敏感性试验中,也显示出了特殊的效果。这些事实表明,B15 和 B17 波段对于漓江水体变化引起的地物反射率变化具有的高度敏感性,因此,可以作为快速评价漓江水环境质量的指示波段。

4 主要成果

(1)通过长周期监测可以获得 10 a 周期的植被覆盖和城市扩展变化信息;通过短周期监测可以获得天周期的植被覆盖和漓江水水质变化信息。

(2)长周期监测发现漓江水源林区的面积在近

30 多 a 来的时间里,面积总量减少了 22.8%,城镇总面积扩展了 21 倍,证明漓江流域区生态环境总体上出现了退化趋势;短周期监测发现漓江流域区植被覆盖总量的时间分布,具有从秋天到冬天,总量由高减低的规律。这表明以 TM/ETM⁺ 作长周期环境动态监测、以 MODIS 作短周期环境动态监测的漓江流域生态环境遥感动态监测方案是行之有效的。

(3)MODIS 的 B15 和 B17 波段对于漓江水体变化引起的地物反射率变化具有的高度敏感性,可以作为快速评价漓江水环境质量的指示波段。

5 存在的主要问题

(1)对于短周期监测,由于南方云覆盖日子比较多,不能确保 MODIS 短周期监测按照等日期获得可用影像。这是一个较难克服的难题,如果覆盖时间短,用最临近无云日期的影像替代,但若覆盖时间长,则只好空缺。

(2)对于长周期监测,由于 Landsat-7 已失效,可用 Landsat-5 的数据,除此而外,也可以用其它新一代卫星的数据,如 CBERS、ResourceSat-1、EnviSat-1、ASTER 和 SPOT 等,当然能采用高分辨率卫星更好,但数据价格偏贵是一个问题。总之,可结合具体情况选择适合的卫星遥感数据类型。

(3)MODIS 短期监测的环境指标还有许多潜力可挖,有待于进一步研究。

参考文献

- [1] 何观德. 漓江洪涝与枯水问题的思考[J]. 广西水利水电, 1998, (2): 36-40.
- [2] 缪钟灵. 漓江上游枯水成因及补水措施[J]. 桂林工学院学报, 1995, 5(1): 181-189.
- [3] 桂林市年鉴 2000—2003.
- [4] 戴新. 对漓江是否会枯竭与断流的探讨[J]. 广西水利水电, 1994, (2): 48-52.
- [5] 杨永德, 吴虹, 郭建东, 等. 漓江源及上游生态环境变化遥感调查[J]. 桂林工学院学报, 2005, 25(1): 36-40.
- [6] 方洪宾, 张振德, 张佩民. 塔里木盆地周边地区土地退化的遥感研究[J]. 国土资源遥感, 2003, (2): 5-10.
- [7] 潘卫华, 徐涵秋. 泉州市城市扩张的遥感监测及其城市化核分析[J]. 国土资源遥感, 2004, (4): 36-40.
- [8] 马建文, 赵忠民, 布和敖斯尔. 遥感数据模型与处理方法[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2001.
- [9] 刘玉洁, 杨忠东. MODIS 遥感信息处理原理与算法[M]. 北京: 科学出版社, 2001.

LONG – TERM AND SHORT – TERM DYNAMIC MONITORING OF ECOLOGICAL ENVIRONMENT VARIATION IN THE DRAINAGE AREA OF THE LIJIANG RIVER BASED ON TM/ETM⁺ AND MODIS

WU Hong, GUO Yuan – fei, GUO Jian – dong, ZHANG Yin – qiao, JIA Zhi – qiang, DANG Yu – ning
(*Institute for Remote Sensing Application, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China*)

Abstract: The ecological environment of the drainage area of the Lijiang river has been degenerating rapidly in the past 30 years, and hence an experimental research on the long – term and short – term dynamic monitoring of ecological environment variation of the drainage area of the Lijiang river was carried out by using the TM, ETM⁺ and MODIS. Rapid degeneration is attributed to two aspects: the headwater forest in the upper reaches of the Lijiang river has been destroyed continually, and the riverbed sand layer has been mined out on the large scale. This conclusion is based on information extraction, pattern analysis and recognition as well as comprehensive explanation of TM and ETM⁺ images obtained from three periods of time (1986, 1998 and 2002) together with field investigation. The variation law of water quality of the Lijiang river and the gross of the vegetation were discovered, and the optimal monitor bands of MODIS were determined by spectrum analysis of water – body based on pixels and calculation of MODIS – NDVI image data.

Key words: Lijiang river; Ecological environment; Dynamic monitor; TM; ETM⁺; MODIS

第一作者简介: 吴虹(1947 –),男,教授,博士研究生导师,主要研究方向为资源遥感、环境遥感、灾害遥感、遥感 – 综合地学信息可视化与隐伏矿床预测及时态 GIS – 环境动力学模型。

(责任编辑:李瑜)