

# 基于 Radon 域描绘子乾安湖群湖泊形态 变化遥感信息提取

李晓峰<sup>1</sup>, 张树清<sup>1</sup>, 那晓东<sup>1,2</sup>, 于欢<sup>1,2</sup>, 潘欣<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 吉林 长春 130012 2 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 以乾安湖群为研究对象, 利用 1989 年和 2001 年乾安县 TM 影像分割得到两个时期的湖群对象, 利用具有几何不变性的 Radon 域描绘子提取每个湖泊对象的形态特征向量, 根据所定义的湖泊相似度指数计算出两个时期湖泊对象的相似度, 定量地描述了湖泊对象的时空形态变化特征。通过对所建立的面向对象数据库的挖掘, 得到了比传统的湖泊面积变化检测更加丰富有效的信息, 为防止湖泊进一步萎缩制定有效的保护性措施提供了数量化依据。

**关键词:** Radon 域描绘子; 相似度指数; 形态特征向量; 面向对象数据库

**中图分类号:** TP751 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0690(2009)03-0421-06

湖泊对发展经济、维持区域生态环境平衡起到重要的作用<sup>[1]</sup>。遥感技术是进行湖泊动态变化研究的一种行之有效的方法, 很多湖泊动态变化监测的研究中引入遥感手段<sup>[2-4]</sup>。已有研究大多数针对湖泊面积变化监测, 很少关注湖泊形态信息的提取。事实上, 湖泊的形态决定于其成因和发展过程, 又是客观反映。定量描述湖泊形态特征变化, 能为认知湖泊的演化机理与驱动力提供参考, 为防止湖泊进一步退化制定有效的保护性措施提供决策支持<sup>[5-6]</sup>。目前的形状描述方法尚有如下不足: 一是各形状描述子均依赖于定位准确且鲁棒性强的边缘检测算子, 大多数边缘检测算子不符合要求; 二是不能处理多连通区域边缘情况。

Radon 变换以其良好的反映目标直线结构能力被广泛用于遥感影像上线性特征的检测<sup>[7-9]</sup>。Radon 变换也有与形状表示相关的有用性质, 利用这些性质能构造出具有部分几何变换(旋转或尺度)不变性图像纹理特征<sup>[10,11]</sup>或形态描绘子<sup>[12]</sup>。Tabbone<sup>[13]</sup>构造的 Radon 域形态描绘子把平面对象的内部结构和外部边界特征同时考虑在内, 并有完全的几何变换(尺度、平移、旋转)不变性, 对噪声影响也有一定鲁棒性。

本文将利用上述 Radon 域描绘子对分割后的湖泊对象提取形态特征向量, 将其存入面向对象

数据库, 并对两个不同时期的湖泊对象定义形态相似度指数, 进一步实现该指数与面积变化的统计关联分析, 挖掘其隐含信息, 定量地描述湖泊对象的时空形态变化特征。

## 1 实验区概况

乾安县在吉林省西部平原腹地, 123°25'28"~124°22'48"E, 44°38'10"~45°18'57"N, 其总面积为 3 426.5 km<sup>2</sup>, 年降水量仅 292 mm, 80% 集中 6~9 月, 年蒸发量 1 874 mm, 蒸发量远大于降水量, 导致该地干旱化严重。研究区内有大量湖泊-乾安湖群, 湖泊面积均较小, 一般水深 1~2 m。湖泊丰富的水资源成为维持该区生态环境重要水源, 对周围生态环境、区域小气候发挥巨大调节作用<sup>[14,15]</sup>。由于自然和人为因素影响, 近几十年来乾安湖群面积逐渐减小, 甚至萎缩消失<sup>[16]</sup>。

## 2 研究方法

### 2.1 数据源

选取覆盖乾安县两景 Landsat5 TM 影像作为实验数据, 轨道号为 119/029, 成像时间分别为 1989 年 8 月 2 日和 2001 年 8 月 11 日。通过选取同名点将两幅影像进行几何配准, 残差控制在 0.5 个像元以内, 使用乾安县界进行裁切处理, 得到

收稿日期: 2008-11-10 修订日期: 2009-04-09

基金项目: 中国科学院东北地理与农业生态研究所青年博士基金项目(O8H2031001)、国家自然科学基金项目(40871188)资助。

作者简介: 李晓峰(1978-), 男, 黑龙江讷河人, 博士, 助理研究员, 主要从事遥感图像处理、湿地遥感等方面的研究。E-mail: lxi-

aofeng1228@gmail.com

图 1。直接使用原始影像数据进行湖群分割, 所以不必对两时相影像作辐射进行归一化处理。实验中选取 TM 1~5 和 TM 7 波段, 空间分辨率为 28.5 m。

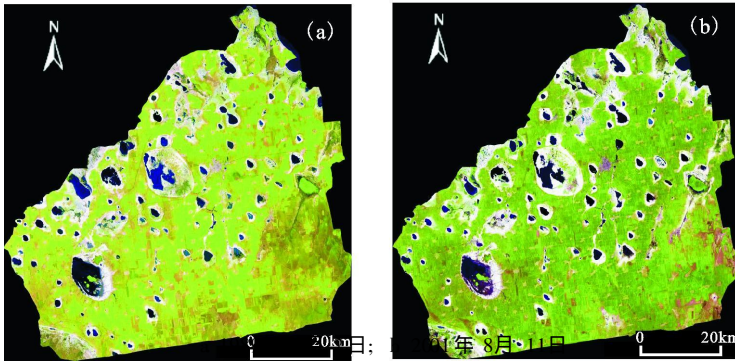


图 1 乾安县 TM 假彩色合成影像

Fig. 1 Pseudo-color composition TM images of Qian'an County

(shape) 差异确定的, 形状异质性由其光滑度 (smoothness) 和紧凑度 (compactness) 来衡量<sup>[17, 18]</sup>。

我们应用面向对象分类软件 eCognition 4.0 分别对乾安县两个时期的 TM 多光谱影像进行多分辨率分割, 经反复实验, 确定分割中输入的参数如下, scale parameter 40, shape 0.15, compactness 0.6, smoothness 0.5。对初步分割结果进行相应后处理, 去除噪声带来的误分割对象和面积较小对象 (图 2a, b)。在研究区 TM 影像上随机采样并经过实地考察验证, 湖群分割的制图精度为 96.6%, 用户精度为 94.7%。

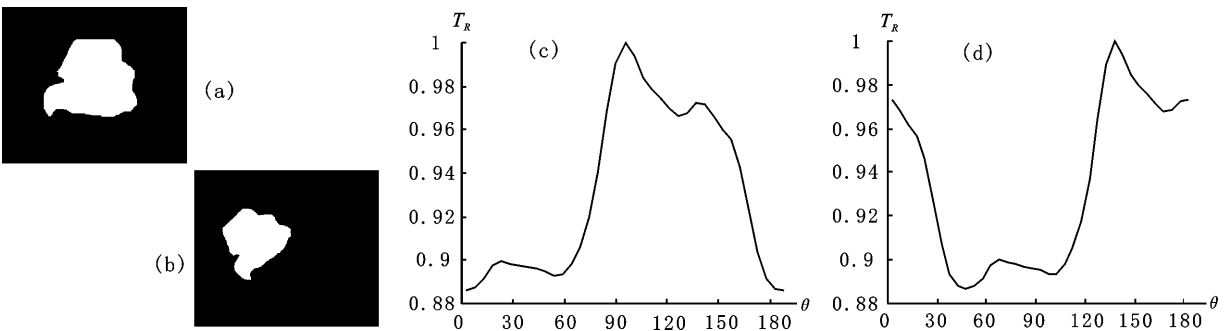
## 2.2 图像多尺度分割

多尺度影像分割可以理解为一个局部优化过程, 而异质性则是由对象的光谱 (spectral) 和形状

准确地分割所得到的两个时期湖泊对象是下一步进行定量化信息提取基础。图 2c 可看到湖泊大面积退化和减少, 发现大部分减小后的湖泊和原来湖泊形态上有相似性。为定量描述这种现象, 将分割结果进行二值化处理, 通过 Radon 变换和距离变换构造的 Radon 域描绘子提取每个湖泊对象的形态特征向量, 并通过计算相似度指数研究各个湖泊自 1989~2001 年的形态变化特征。

## 2.3 Radon 域描绘子与相似度指数

1) Radon 变换。首先由 Johann Radon 提出<sup>[19]</sup>, 定义为:



黑色表示消失的水域; 白色表示增长的水域

图 2 乾安湖泊群 1989 年 (a) 和 2001 年 (b) TM 影像多尺度分割结果、(c) 两个年代的变化检测图

Fig. 2 The multi-scale segmentation results for 1989 (a) and 2001 (b) TM images of Qian'an

Lakes Group, and change detection between two decades (c)

$$R_f(\theta, \rho) = \int_R f(x) \delta(x_1 \cos\theta + x_2 \sin\theta - \rho) dx \quad (1)$$

其中,  $\delta$  为 Dirac 函数 (当  $x = 0$  时,  $\delta(x) = 1$ ,  $x$  取其他值时,  $\delta(x) = 0$ )。

图像的 Radon 变换实质上是图像在不同角度

沿直线  $L_{\theta}: x_1 \cos\theta + x_2 \sin\theta = \rho$  的投影。对于二值图像数据, 每个非零的图像点被投影到 Radon 矩阵。对象的几何性质, 如直线和曲线, 其在 Radon 矩阵中会有明显的体现。于是, Radon 矩阵可以作为特征量区分具有不同几何形状的对象<sup>[20]</sup>。

2) Radon域描绘子。寻找图像的具有几何不变性的形态特征描绘子一直是计算机视觉和图像识别领域的研究热点。与大多数形态指数一样, 虽然 Radon变换可以作为对象的形状特征描述二维对象, 但是它并不具有几何不变性<sup>[21]</sup>。文献 [13] 利用 Radon 变换的特性构造了  $T_R$  变换, 并通过加入尺度因子 (区域的面积) 和进行 Fourier 变换获得了具有几何不变性的 Radon 域描绘子。  $T_R$  变换的

定义如下:

$$T_{Rf}(\theta) = \int_{-\infty}^{\infty} R_f^2(\theta, \rho) d\rho \quad (2)$$

其中,  $R_f(\theta, \rho)$  是  $f$  的 Radon 变换。

图象的旋转变换会使其  $T_R$  变换进行模  $\pi$  的平移。图 3 给出了两个二值面目标, 其中图 3b 是图 3a 经过平移、旋转 (逆时针旋转  $46^\circ$ ) 和尺度变换得到。图 3c、d 给出 2 个目标对象的  $T_R$  变换曲线图。曲线除因为图像的旋转平移了  $46^\circ$  外, 其形状完全相同。为消除图像旋转对于  $T_R$  变换影响, 对变换后的曲线进行 Fourier 变换, 取其幅值, 获得具有几何不变性的 Radon 域形态描绘子。

Radon 域形态描绘子作为描述湖泊形态的特

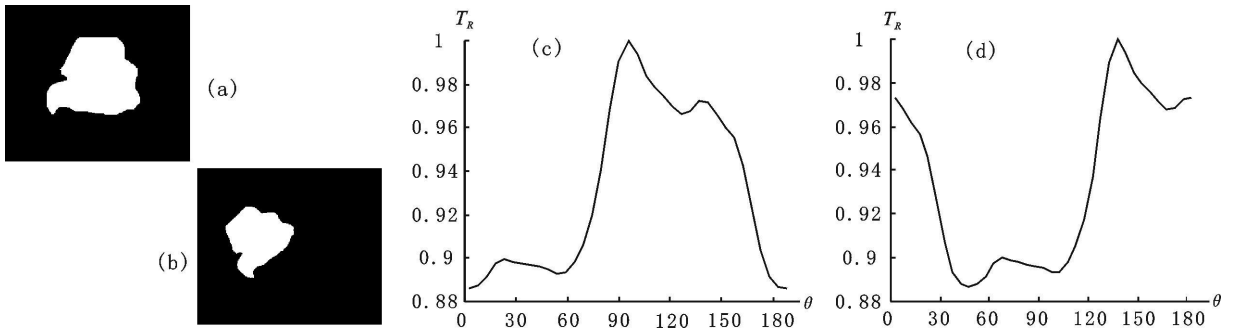


图 3 a 一幅二值面状图像; b 图像 a 经过平移、旋转和尺度变换后的图像; c、d 图 a 和 b 的  $T_R$  变换曲线

Fig 3 (a) A binary image; (b) the obtained image via rotation scale and translation of image (a); (c)& (d) transform curve of (a) and (b)

征向量, 其几何不变性, 尤其是其中的尺度不变性, 使得湖泊对象的形状特征向量只与湖泊形态有关, 不受湖泊方位和面积变化的影响, 这对于通过地面常规监测进一步深入揭示湖泊退化的驱动力和退化机理起到重要的参考和指示作用。

3) 相似度指数。为避免由于形状的微弱差别 (如边界毛刺等) 导致的  $T_R$  变换较大变化, 即控制  $T_R$  变换过于敏感性, 先对图像进行距离变换后的不同级别进行分割, 再对每个分割对象提取 Radon 域描绘子。距离变换是对二值图像的一种操作运算, 它将像素点不同的位置信息转化为不同的灰度信息, 即将一幅二值图像转化为一幅灰度图像。在这幅灰度图像中每个像素的灰度级是该像素与其最近背景间的距离 (图 4)。

对各个图像实施  $T_R$  变换, 提取 Radon 域描绘子, 得到湖泊对象形态特征向量:

$$V = \begin{bmatrix} \frac{F_R^0(1)}{F_R^0(0)}, \dots, \frac{F_R^0(\pi)}{F_R^0(0)}, \dots \\ \frac{F_R^l(1)}{F_R^l(0)}, \dots, \frac{F_R^l(\pi)}{F_R^l(0)} \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中,  $E_R^m(n)$ ,  $m \in \{0, 1, \dots, l\}$ ,  $n \in \{0, 1, \dots, \pi\}$  表示距离变换第  $m$  级分割图形, 且角度为  $n$  时的  $T_R$  变换曲线的 Fourier 变换, 式中用每个级别图像的 0 时的 Fourier 向量对每个元素进行正规化。

对每个湖泊对象, 提取 Radon 域形态特征向量  $V$  后, 按光谱角距离定义两个湖泊对象相似度指数:

$$S = \left[ \frac{V_1 \cdot V_2}{|v_1| |v_2|} \right] \quad (4)$$

两个向量的光谱角距离又称为余弦相似度, 数值介于 0~1 之间, 当两个向量越接近时, 所得的余弦距离越接近于 1, 两个湖泊的形态越相似; 反之, 则越接近于 0 即湖泊形态相差越大。

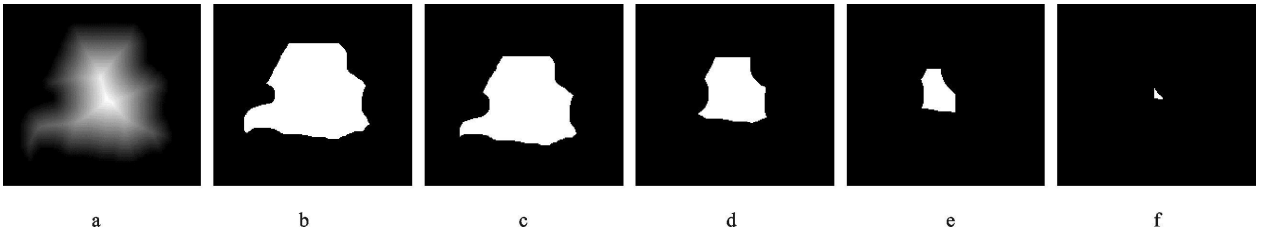


图 4 a 二值图像的距离变换; b~ f 由距离变换得到的不同级别分割图像

Fig 4 (a) The distance transform of a binary image; (b~ f) segmented images for different levels of the distance transform

### 3 结果分析

在图 2a b所示的乾安湖泊群的每个分割对象上实施 - 变换, 提取 R adon 域描绘子, 得到湖泊对

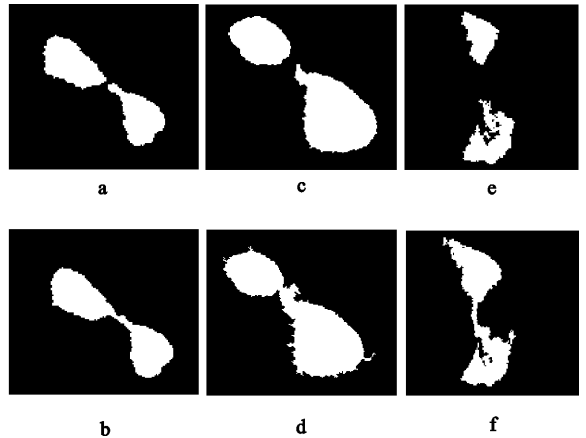
象的形态特征向量, 并建立乾安湖泊群面向对象数据库, 对每个分割所得的 1989年栅格湖泊对象建立唯一标识, 存储该对象 1989年和 2001年的形态特征向量 (表 1)。

表 1 乾安湖泊群各个湖泊对象 1989年和 2001年的形态相似度指数

Table 1 Shape similarity indices of lake objects in Qan' an Lakes Group from 1989 to 2001

湖泊对象标识号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
形态相似度指数	0.95	0.93	0.68	0.72	0.92	0.92	0.83	0.91	0.88	0.87	0.94	0.94	0.95	0.93
湖泊对象标识号	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
形态相似度指数	0.94	0.90	0.95	0.92	0.85	0.75	0.95	0.94	0.94	0.95	0.77	0.94	0.95	0.87
湖泊对象标识号	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42
形态相似度指数	0.75	0.93	0.64	0.86	0.92	0.95	0.79	0.51	0.52	0.55	0.72	0.73	0.91	0.90
湖泊对象标识号	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56
形态相似度指数	0.88	0.95	0.91	0.93	0.93	0.95	0.52	0.95	0.59	0.56	0.93	0.50	0.95	0.92
湖泊对象标识号	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70
形态相似度指数	0.94	0.76	0.95	0.72	0.74	0.89	0.92	0.95	0.94	0.95	0.92	0.94	0.93	0.95

由表 1 可见, 71. 4% 湖泊形态相似度指数在 0. 85 以上, 说明湖泊在变化过程中形态上有很高相似性, 也有部分湖泊对象形态相似度指数较小 (如, 36、38、49、51、52、54 的湖泊), 为探究原因, 我们可利用面向对象数据库对于栅格湖泊对象的索引功能, 给出这部分湖泊的可视化图像 (图 5)。图 5 可看到, 1989 年编号为 36 和 38、49 和 52、51 和 54 的湖泊已经连通为 2001 年一个湖泊对象, 这使连通前后的形状相似度降低。研究发现, 部分形态相似度较小湖泊是由于其周围人工修建水渠使湖泊与线状水渠相连所致, 如标号为 37 的湖泊。



上行 1989年; 下行 2001年

图 5 利用面向对象数据库查询得到的形状相似度较小的湖泊栅格图

Fig 5 Raster images of lakes with smaller similarity by query via object-oriented database. The above row are the lakes in 1989 and the below row are the corresponding lakes in 2001 and the right are the corresponding lakes in 2001

为了进行湖泊对象变化的关联分析, 也可将湖泊面积变化作为湖泊对象的一个属性特征存储于面向对象数据库中, 进行形态相似度指数和面积变化比例的联合查询。例如, 图 6 就给出了乾安湖群在 1989 年至 2001 年相对面积变化 (即变化的面积占原湖泊面积的百分比) 小于 10%, 而形态相似度小于 0. 8 (即形态变化较大) 的所有湖泊对象统计图。这部分湖泊虽然面积变化不大, 但形态发生了一定变化, 这也是传统的湖泊面积变化遥感监测所

无法获取的信息。事实上, 这种湖泊形态的改变可能是各种因素特别是人为因素与湖泊相互作用、相

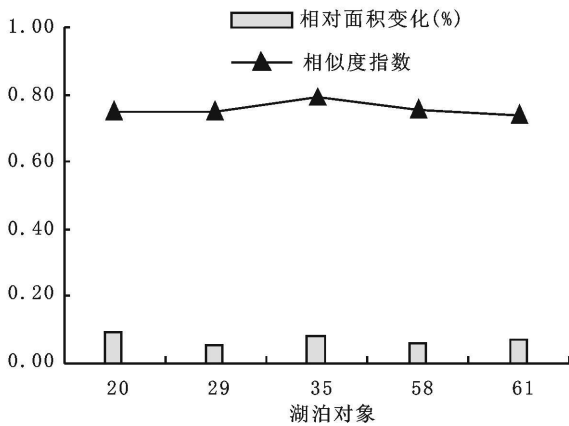


图 6 乾安湖群 1989~2001 年相对面积变化 < 10%, 形态相似度 < 0.8 的湖泊对象统计

Fig. 6 The statistics of all lakes with relative area change of smaller than 10% and the shape similarity of smaller than 0.8 in Qian'an Lakes Group from 1989 to 2001

互影响的结果。自然条件下,湖泊的平面形态影响了沿岸湖流和波浪的移动方向,在波浪和潮流的冲击作用下,湖岸遭受侵蚀作用和淤积作用将使湖泊形态发生变化。同时,气候变化、泥沙淤积、河流改道引起的入湖水量减少等自然因素,则可能在很短的时期内使湖泊水面缩小,形态发生一定的改变。而人为因素的影响,如江河改造、农业开发、湖泊填占、围湖造田等人类活动因素,同样可以改变湖泊的形态特征,更能够加速湖泊的发展演化过程<sup>[22]</sup>。乾安湖泊群作为松嫩平原典型的湖泊群,其生态环境十分脆弱<sup>[15]</sup>,这种不易被察觉的面积变化不大而形态却发生一定变化的湖泊,在保护工作中更应引起充分的重视。

通过面向对象数据库中形态相似度指数的提取和湖泊图像的索引,并与面积变化属性等联合查询分析,能挖掘出更多湖泊形态变化的相关信息,为进一步分析湖泊形态变化规律提供定量化依据。

## 4 结论和讨论

本文首先在乾安县 1989 和 2001 年的 TM 图像上应用面向对象方法进行湖泊的多尺度分割,然后引入具有平移、尺度、旋转不变性的 Radon 域描绘子在不同尺度下提取湖泊形状特征向量,并给出了两个时期各个湖泊对象的形态相似度指数,同时建立了湖泊群的面向对象数据库。通过对数据库的查询可以实现形态相似度与其他属性以及栅格

图像的联合检索,使我们获取了比湖面遥感变化检测更丰富的信息。对于形状各异的湖泊而言,其形成的原因是多种的,变化的原因亦是复杂的,从遥感影像上提取湖泊的 Radon 域形态描绘子和形态相似度指数只是客观地描述了湖泊形态上的变化,为确定重点关注的湖泊对象提供定量化依据。若要探究其变化的具体原因,则需要结合各个湖泊的同步地面调查来进行监测。另外,由于遥感影像获取的瞬时性,选取的影像时间以及相应的气候、水文等因素均会对湖泊形态信息提取产生影响,可采用本文的方法选取多时相遥感数据进行湖泊形态变化信息的提取,以进一步提高结果的可靠性。

作为具有几何不变性的形状指数在湖泊形态遥感信息提取中的应用,本文只利用了 Radon 域形态描绘子的尺度不变性。其旋转和平移不变性在多源遥感信息提取中也将发挥重要作用,如对不同时相、不同数据源的研究对象的形状变化检测,无需几何配准的分类结果也不会影响其指数提取的结果,这就能够实现目标的快速、有效的形态信息提取与动态变化检测。进一步,具有几何与仿射不变性的形状指数在湖泊形态遥感信息提取中的应用也将是我们下一步所要研究的内容。

## 参考文献:

- [1] 段洪涛,张柏,宋开山,等.长春市南湖叶绿素 a 浓度高光谱估测模型研究[J]. 水科学进展, 2006 17(3): 323~328
- [2] 殷立琼,江南,杨英宝.基于遥感技术的太湖近 15 年面积动态变化[J]. 湖泊科学, 2005 17(2): 139~142
- [3] 刘瑞霞,刘玉洁.近 20 年青海湖湖水面积变化遥感[J]. 湖泊科学, 2008 20(1): 135~138
- [4] Guinguis S K. Multi-temporal change of Lake Burullus, Egypt from 1983 to 1991[J]. International Journal of Remote Sensing 1996 17(15): 2915~2921
- [5] Zhang S Q, Zhang J Y, Li F, et al. Vector analysis theory on landscape pattern (VATLP) [J]. Ecological Modelling 2006, 193: 492~502
- [6] Li J, Nanyan R M. Shape-based Change Detection and Information Mining in Remote Sensing[C]. Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2002 IGARSS 02 IEEE International 2002, 2: 1035~1037
- [7] Copeland A C, Ravichandran G, Trivedi M M. Localized Radon transform-based detection of ship wakes in SAR images[J]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing 1995, 33(1): 35~45
- [8] Zilan G, Zapolski A, Maron M. The speed and beam of a ship from its wake's SAR images[J]. IEEE Transaction on Geosci-

- ence and Remote Sensing 2004 42(10): 2335–2343
- [9] Zhang Q. Couloigner I Accurate centerline detection and linewidth estimation of thick lines using the radon transform [J]. IEEE Transactions on Image Processing 2007 16(2): 310–316
- [10] Cui P L, Li J H, Pan Q, et al Rotation and scaling invariant texture classification based on Radon transform and multiscale analysis [J]. Pattern Recognition Letters 2006 27 408–413
- [11] Jafari-Khouzani K, Soltanian-Zadeh H. Radon transform orientation estimation for rotation invariant texture analysis [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2005 27(6): 1004–1008.
- [12] Leavers V F. Use of the Radon transform as a method of extracting information about shape in two dimensions. Image and Vision Computing 1992 10(2): 99–107.
- [13] Tabbone S, Wendling L, Sahnou J P. A new shape descriptor defined on the Radon transform [J]. Computer Vision and Image Understanding 2006 102 42–51.
- [14] 吕金福, 李志民, 冷雪天, 等. 松嫩平原湖泊的分类与分区 [J]. 地理科学, 1998 18(6): 524–530
- [15] 张艳红, 邓伟, 翟金良. 松嫩平原西部湖泊水环境问题、成因与对策 [J]. 干旱区地理与环境, 2001, 15(1): 31–36
- [16] 刘殿伟, 宋开山, 王丹丹, 等. 近 50 年来松嫩平原西部土地利用变化及驱动力分析 [J]. 地理科学, 2006 26(3): 277–283.
- [17] 陈云浩, 冯通, 史培军, 等. 基于面向对象和规则的遥感影像分类研究 [J]. 武汉大学学报信息科学版, 2006, 31(4): 316–320
- [18] 孙志英, 赵彦锋, 陈杰, 等. 面向对象分类在城市地表不透水度提取中的应用 [J]. 地理科学, 2007, 27(6): 837–842.
- [19] Radon J. Über die Bestimmung von Funktionen durch ihre Integralwerte längs gewisser Mannigfaltigkeiten (On the determination of functions from their integrals along certain manifolds) [J]. Mathematisch-Physikalische Klasse, 1917, 69: 262–277. (English translation of the paper in Deans (1983)).
- [20] Manuela Alexandra S. Pereira Vasconcelos. On the Radon transform of sampled functions [D]. Engineering and Applied Sciences Department Harvard University, 2003
- [21] 丁险峰, 吴洪, 张宏江, 等. 形状匹配综述 [J]. 自动化学报, 2001, 27(5): 678–694.
- [22] 韩美, 张维英, 李艳红, 等. 莱州湾南岸平原古湖泊的形成与演变 [J]. 地理科学, 2002 22(4): 430–435

## Shape Change Remote Sensing Information Extraction of Lakes in Qian'an Group Lakes Based on Radon Descriptor

LIXiao-feng<sup>1</sup>, ZHANG Shu-qing<sup>1</sup>, NAXiao-dong<sup>1,2</sup>, YUHuan<sup>1,2</sup>, PAN Xin<sup>1,2</sup>

(1. Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy Sciences Changchun, Jilin 130012; 2. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences Beijing 100039)

**Abstract** Remote sensing technology is introduced by many related research as an efficient method to monitor dynamic change of lakes. But most of them only pay attention to lake area change, less to the information extraction of lake shape. In this paper, Qian'an Group Lakes are taken as the study objects, and lake objects of two periods are obtained by the segmentation of TM images in 1989 and 2001, then shape character vectors of each object are extracted using geometric invariance Radon descriptor. Similarity indices of each lake object between two periods are also computed according to the definition, so shape spatial-temporal variation of lake objects can be quantitatively described. Through information mining for object-oriented database in which shape character vector and similarity indices are saved, the obtained information is more abundant and efficient than that by traditional area change detection of lakes. These provide quantitative base for devising effective conservation measures to prevent lake drying up further.

**Keyword:** Radon descriptor; similarity index; shape character vector; object-oriented database