

doi: 10.6046/gtzyyg.2015.03.16

引用格式: 刘蕾,臧淑英,邵田田,等. 基于遥感与 GIS 的中国湖泊形态分析[J]. 国土资源遥感,2015,27(3):92-98. (Liu L, Zang S Y, Shao T T, et al. Characterization of lake morphology in China using remote sensing and GIS[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2015, 27(3):92-98.)

基于遥感与 GIS 的中国湖泊形态分析

刘蕾^{1,2,3}, 臧淑英², 邵田田¹, 魏锦宏¹, 宋开山¹

(1. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130102; 2. 哈尔滨师范大学黑龙江省普通高等学校地理环境遥感监测重点实验室, 哈尔滨 150025; 3. 黑龙江第三测绘工程院, 哈尔滨 150025)

摘要: 基于 2010 年 Landsat TM/ETM 数据, 结合 Google Earth 影像和其他资料, 采用面向对象的分类方法, 以 30 m 的分割尺度对图像进行分割, 并通过比值指数、归一化差值水体指数及谱间关系等指数来提取水体信息, 将水体分为河渠、湖泊及水库坑塘 3 类, 并对分类结果进行精度验证, 最终得到中国湖泊空间分布信息; 以此为基础, 计算出反映湖泊形态的景观指数(如形状指数、近圆形指数及分维数等), 并结合湖泊的面积和湖泊岸线长度来说明湖泊的基本状况及其形状的复杂程度。结果表明: 利用面向对象分类方法可以得到较高的分类精度, 3 种类型水体分类的总精度为 93%, 湖泊分类精度达到 90% 以上; 在中国内陆, 面积大于 1.0 km² 的自然湖泊 2 477 个, 总面积约 77 934.72 km²; 在 5 个湖区中, 青藏高原湖区的湖泊面积最大, 占湖泊总面积的 54.34%, 其形状指数和分维数均值为最小, 湖泊形态比较简单; 东部平原湖区降雨充沛, 水系发达, 其形状指数和分维数均值最大, 湖泊岸线更加曲折, 形态复杂多变; 通过分析得出, 形状指数与分维数有明显的相关性($R^2 = 0.95$), 湖泊岸线分维数值越高, 其形状指数越大, 岸线越复杂。

关键词: 湖泊形态; 形状指数; 分维数; 湖区; 遥感

中图法分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-070X(2015)03-0092-07

0 引言

湖泊是陆地上水圈的重要组成部分, 同时与自然界中的水分循环关系密切。湖泊空间分布情况在一定程度上反映了内陆水资源的存储和利用情况^[1]。它的波动或变化也体现了气候变化和人类活动等对水体循环、物质迁移以及生态系统变化的影响。湖泊的形态特征变化是在多种因素作用下形成的, 过程比较复杂。在湖泊的发展过程中, 其形态也不断变化^[2]。因此, 分析湖泊形态特征, 不仅对研究湖泊水文、湖泊中物质的输入输出以及湖泊理化性质变化有重要意义, 同时也可以为开发、利用和保护湖泊资源提供理论依据。

目前对湖泊形态的研究最主要集中在面积动态变化和湖泊岸线形态这 2 方面。有学者对典型湖泊动态变化及其成因进行了分析^[3-6]; 还有学者应用分形理论对湖泊岸线变化进行分析, 描述了湖泊岸线的动态变化, 分别计算了湖泊岸线发育系数和湖泊岸线分维数, 用以表明湖泊形态的动态变化^[7-8]; 还有部分学者研究了湖泊的面积及湖岸线长度, 并

准确特征化了这 2 个物理性质, 研究了影响湖泊岸线变化的环境因素及人为因素, 分析了湖泊岸线变化与湖泊生物的关系^[9]; 此外还有一些研究通过计算湖泊形态指数与水质的关系, 分析湖泊形态对湖泊水质的影响^[10-11]。这些研究大都针对某一地区典型湖泊, 很少进行大范围不同区域湖泊形态特征的定量研究及对比分析。

卫星遥感具有覆盖范围广、监测频次高、人力和物力成本低等优势, 为大范围水体实时动态监测提供基础。本文结合遥感影像数据, 利用面向对象分类方法提取中国湖泊空间分布信息。基于 GIS 技术计算反映湖泊形态的景观指数, 对比不同区域湖泊形态指数间的关系, 分析中国不同地区湖泊形态上的差异。为定量刻画内陆水体的形态特征提供参考, 对分析湖泊中物质能量的流动有指导意义。

1 数据与方法

1.1 湖泊信息提取

使用的数据主要以空间分辨率为 30 m 的 Landsat TM/ETM 为主, 图像时相是 2010 年, 尽量选择

春、秋季节的图像。每景图像平均云量尽量小于10%,个别地方受云量影响较大,不能获得规定季节图像的,则选用2011或2009年的合适数据。根据该规则,在美国地质调查局的地球资源观测与科学(USGS/EROS)中心共获取了覆盖中国的Landsat TM和ETM图像545景。

基于面向对象分类方法,利用多尺度分割得到影像对象,并建立对象主要的层次结构特征,计算获得对象几何、光谱及拓扑特征等。利用对象特征来建立分类规则,再根据不同对象间信息相互传递与合并完成影像分类,可以有效地克服基于像元层次的不足^[12]。多尺度分割是从一个像元开始,依据影像的异质性采取从下到上区域合并的方法得到对象,是内部优化的过程^[13]。影像的异质性则是通过对象形状及光谱的差异来确定的,形状异质性由紧凑度及光滑度来衡量。设置较大的分割尺度,就有较多像元被合并,最后得到较大面积对象;分割尺度越小,对象面积就越小,越有利于小面积的地物提取^[14]。

确立解译影像的地物类型,即分类系统。可以采用其他现有的分类系统,也可以根据自己研究的具体对象来规划分类系统。本文主要研究湖泊形态的变化,因此先提取水体,然后划分为3类:河渠、湖泊及水库坑塘。根据影像的纹理特征、光谱特征、形状、密度、大小、空间分布及色调等信息建立以面向对象分类方法的解译标志。本文主要选择了TM5(R)4(G)3(B)和TM4(R)3(G)2(B)波段合成,综合进行遥感解译。该波段组合对水的反应比较强烈,有利于分辨不同类型水体信息。表1为各类型在TM图像上较为明显的解译标志。

表1 TM遥感影像解译标志

Tab.1 Signs of classification on TM remote sensing imageries

类型	解译标志	影像 TM5(R)4(G)3(B)
河渠	天然形成或人工开挖的河流及主干渠,包括人工渠(堤岸)。自然弯曲或局部明显平直	
湖泊	天然形成积水区	
水库坑塘	人工修建蓄水,有堤坝	

应用面向对象 eCognition8.64 分类软件对 TM 图像进行多分辨率分割,经过反复实验,确定分割中输入的参数,即尺度(scale)为30,形状(shape)为0.1,光滑度(smoothness)为0.5,紧凑度(compactness)为0.5。根据水体的光谱特征,利用归一化差值水体指

数(normalized difference index, NDWI) ($(TM2 - TM4)/(TM2 + TM4)$)、波段比值 $TM4/TM2$ 及谱间关系 $(TM2 + TM3) > (TM4 + TM5)$ 等指数^[15-18]。分类过程中,用以上2个或者多个指数结合其他波段信息和空间信息构建隶属函数,更好地提取水体信息^[19-20]。根据提取对象的长宽比和面积等信息,区分湖泊、河渠及水库坑塘。在完成解译基础上,对错分或者漏分的对象进行手工编辑。此外,对由于阴影的影响而无法区分的水体,则用手工分类方法将其区分出来^[21]。

由于覆盖研究区的是多景 TM 图像,因此对于每一景图像的分类结果,需要进行拼接和检查拓扑关系等。在 eCognition8.64 软件中完成解译工作,导出矢量文件。在 ArcGIS 中对每种类型进行编码,并对结果进行拼接及拓扑检查,得到水体分类结果,从中提取最终的湖泊空间分布信息。

1.2 精度评价

精度评价是遥感图像分类的重要步骤^[22]。目前,最常用的精度评价方法是误差矩阵统计法。在 Google Earth 上随机选择验证样本,样本均匀分布,并确定其类型。一共选择了300个样本检验图像的解译结果,以评价解译精度^[23]。

1.3 景观指数计算

景观指数可以对景观格局信息高度综合,定量反映其空间配置和组成结构等特征^[24]。基于遥感与GIS技术,利用中国湖泊分布信息计算景观指数,分析中国湖泊形态特征。

1) 湖泊面积(area, A)是计算其他指数的基础。对湖泊作为聚集地的物种数量、丰富度及食物链等有制约作用。区域大小间的差异可以反映营养,种类和能量等信息的差别。

2) 湖泊周长(perimeter, P)是计算得到其他指数的基础。

3) 近圆形指数(related circumscribing circle, RCC)表示湖泊形状的指数,是与湖泊面积及其最小外接圆面积的比较值有关。其数值越大,表示湖泊越显狭长。其计算公式为

$$RCC = 1 - \frac{A}{A_s}, \quad (1)$$

式中: A 为湖泊面积; A_s 为湖泊最小外接圆的面积。

4) 形状指数(shape index, SI)是将湖泊形状与相同面积的圆比较的值,即湖泊的紧凑度,有时也称岸线的发育系数(shoreline development index, SDI)。它代表了湖泊岸线的不规则性。岸线越不规则,其湖泊岸线越曲折多变,岸线的发育系数越大,越有利

于种植水生植物及养殖鱼类的开发。岸线的发育系数能够将其岸线长度与输入的营养物质联系起来，是描述湖泊岸线范围的形态指数。在区分不同湖泊和评价湖泊的沿岸带重要程度等方面运用广泛^[9]。其计算公式为

$$SI = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}}, \quad (2)$$

式中 P 为湖泊周长。

5) 分维数(fractal dimension, FD) 是表明湖泊形态复杂程度的指数^[25]。分形维数在 $[1, 2]$ 范围内，其值越接近 1，湖泊的相似性越强，形状也越整齐，几何形态越简单，说明有较大的干扰；相反，分形维数越趋于 2，湖泊的相似性越差，形状越不规则，几何形态越为复杂，说明有较小的干扰。分维数 FD 计算公式为

$$FD = \frac{2\ln P/4}{\ln A} \quad (3)$$

1.4 中国湖泊分区

结合自然环境和地理区域等特征，将中国分成 5 个湖泊区^[26]：①青藏高原湖区(包括西藏和青海)；②蒙新高原湖区(包括新疆、内蒙古、宁夏、甘肃、陕西及山西)；③云贵高原湖区(包括四川、云南及贵州)；④东北平原与山地湖区(包括吉林、黑龙江、辽宁及内蒙古东四盟)；⑤东部平原湖区(湖南、湖北、江西、重庆、河南、安徽、江苏、山东、上海、河北、天津、北京、浙江、香港、台湾、澳门、广东、福建、海南及广西)。5 个湖区突出了我国地貌和气候特点，同时也反映了湖泊的区域特点。结合 5 大湖区的区域特征，便于分析中国湖泊形态的分布特点。

2 结果与分析

2.1 分类精度

根据精度评价，得到 3 种类型水体分类结果(表 2)。3 种类型水体的分类精度都较高，总精度为 93.00%， $Kappa$ 为 0.89。由于影像时相等问题，

表 2 分类精度评价

Tab.2 Classification accuracy assessment

类型	河渠	湖泊	水库坑塘	总样本数	制图精度/%
河渠	72	3	2	77	93.51
湖泊	4	116	4	124	93.55
水库坑塘	2	6	91	99	91.92
总样本数	78	125	97	300	
用户精度/%	92.31	92.80	93.81		
总精度/%			93.00		
$Kappa$			0.89		

分类过程中会出现错分、漏分误差，自动提取后已经进行了人工修改。湖泊提取的用户和制图精度也达到 90% 以上。能够较精确地反映中国湖泊的分布情况。

2.2 数量与面积

中国湖泊面积大于 1.0 km² 天然湖泊共 2 477 个，总面积 77 934.72 km²，约占全国土地面积的 0.8%，分别分布在我国的五大湖区，如图 1 所示。

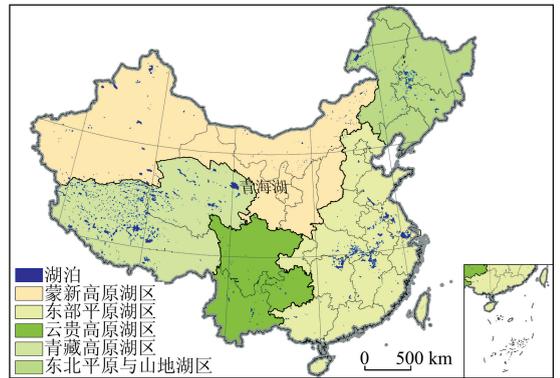


图 1 中国湖泊分布(湖泊面积 > 1 km²)

(国界引用马荣华等^[27])

Fig.1 Map of the lakes distribution (lake area > 1 km²) in China

其中大于 1 000 km² 的大型湖泊有 8 个(平均 2 065.84 km²/个)，青海湖为我国面积最大的湖泊；面积在 $[1, 10]$ km² 之间的湖泊 1 785 个(平均 3.11 km²/个)； $(10, 50]$ km² 的湖泊 436 个(平均 22.85 km²/个)； $(50, 100]$ km² 的湖泊 108 个(平均 69.60 km²/个)； $(100, 500]$ km² 的湖泊 123 个(平均 208.22 km²/个)； $(500, 1 000]$ km² 的湖泊 17 个(平均 750.70 km²/个)；湖泊的面积和数量并不成正比关系(图 2)。

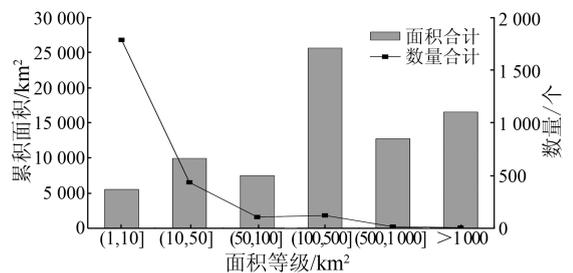


图 2 不同级别湖泊面积和数量对比

Fig.2 Contrast of different level of lake area and number

在 5 个湖区中，青藏高原湖区拥有湖泊面积和数量最多，累积面积 42 357.96 km²，共有 1 056 个，分别占全国湖泊总面积及数量的 54.35% 和 42.63%，其中大于 10 km² 的湖泊 374 个，累积面积 40 095.26 km²。其次是东部平原湖泊区，累积面积

19 054.93 km²,共有 759 个,占其总面积及数量的 24.45% 和 30.64%,其中大于 10 km² 的湖泊 170 个,累积面积 17 231.07 km²。蒙新高原湖泊区湖泊共 255 个,总面积 8 513.54 km²,大于 10 km² 的 68 个,面积 7 943.09 km²。东北平原和山地湖区湖泊共 348 个,总面积 6 674.86 km²,大于 10 km² 的 61 个,面积 5 892.73 km²。云贵高原湖泊区的数量最少,仅 59 个,累积 1 333.43 km²,其中大于 10 km² 的 19 个,面积 1 219.02 km²(表 3)。

表 3 五大湖区湖泊面积和数量对比

Tab.3 Statistics of lake area and number in five lake districts

	数量/个	面积/km ²	>10 km ² 数量/个	>10 km ² 面积/km ²
青藏湖区	1 056	42 357.96	374	40 095.26
东部湖区	759	19 054.93	170	17 231.07
蒙新湖区	255	8 513.54	68	7 943.09
东北湖区	348	6 674.86	61	5 892.73
云贵湖区	59	1 333.43	19	1 219.02
总计	2 477	77 934.72	692	72 381.17

2.3 分布特点

由于自然地理环境的影响,我国 5 个湖区出现了不同的湖泊空间分布特征^[27]。从湿热多雨的南部到寒冷干燥的北部,从东部沿海地区到高海拔的青藏高原地区,都分布着湖泊,甚至在干旱少雨的沙漠地区也有部分湖泊,湖泊呈不均匀的空间分布特征(图 1)。青藏高原与东部平原湖区湖泊总面积为 61 412.89 km²,共有 1 815 个湖泊,占全国湖泊总面积及数量的 78.80% 和 73.27%。2 个湖区的湖泊分布最集中,为东西 2 大湖群。蒙新高原、东北平原与山地、云贵高原湖区仅有 662 个湖泊,总面积 16 521.83 km²。尤其是云贵高原湖区,是我国湖区中湖泊的面积最小、数量最少的湖区。

2.4 湖泊形态特征

根据景观指数公式(1)–(3),计算湖泊的形态指数(近圆形指数、形状指数、分维数),得到湖泊形

态的分布情况(图 3)。

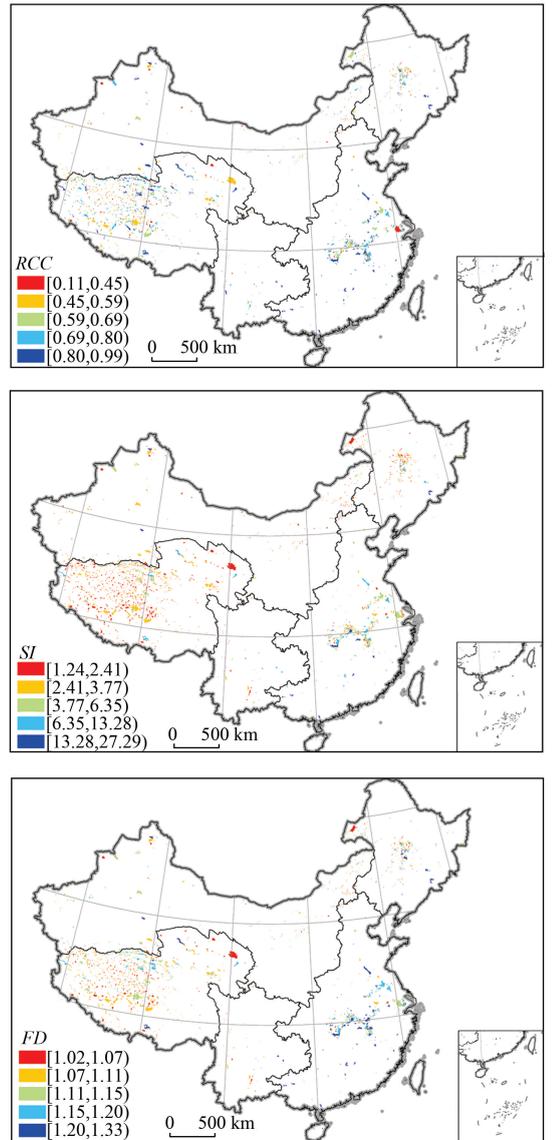


图 3 中国湖泊近圆形指数(上)、形状指数(中)及分维数(下)分布

Fig.3 Distribution of related circumscribing circle(above), shape index(middle) and fractal dimension(below) in China

统计对比 5 个湖区湖泊形态指数的差异(图 4)。

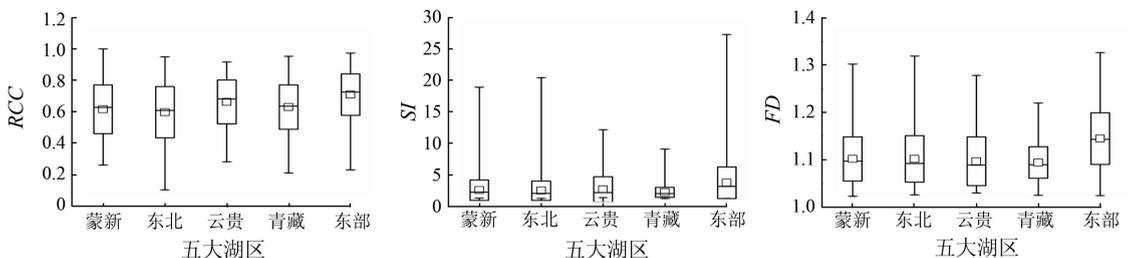


图 4 五大湖区各形态指数箱型图

Fig.4 Box-whisker plots of each morphological index in five lake districts

部分面积较大湖泊(如青海湖和太湖等)的近圆形指数相对较小,这些湖泊在形态上更接近圆形。在中国 2 477 个湖泊中,近圆形指数小于 0.6 的湖

泊共有 882 个,占 35.61%,这些湖泊形态上基本趋近于圆形。东北平原湖区近圆形指数小于 0.6 的湖泊占该区湖泊总数的 48.28%,蒙新湖区 44.71%,青

藏高原湖区 41%，形态上接近圆形的湖泊相对较多；而云贵高原湖区和东部平原湖区近圆形指数小于 0.6 的湖泊相对较少，仅分别占 28.81% 和 19.76%。

形状指数和分维数表明了湖泊岸线的复杂程度，青藏高原湖区湖泊形状指数小于 3.77 的湖泊数量占该区湖泊总数的 96.02%，分维数小于 1.11 的湖泊数占 69.89%，湖泊形态上多表现为简单。而东部平原湖区湖泊形状指数小于 3.77 的湖泊数量占该区湖泊总数的 65.35%，分维数小于 1.11 的湖泊数占 27.4%，与青藏高原区相差较大，该区湖泊形态更加复杂多变。青藏高原湖区基本上属于内流区，在干旱半干旱的气候条件下，湖泊多为封闭的咸水湖或者盐湖。其形状指数均值为 2.24，分维数均值为 1.09，相对其他湖区最小，该区湖泊在形态上比较简单。而东部平原湖区处于亚洲季风气候区，属于外流区，降水较充沛，湖泊表现为外流淡水湖。其形状指数均值为 3.77，分维数均值为 1.14。随着岸线分维数值的增加，湖泊岸线越曲折，几何形态也越复杂。东部平原湖区水系比较发达，也造成其湖泊形态复杂多变。而蒙新湖区、东北湖区及云贵湖区湖泊形态差异并不明显。

将湖泊的形状指数和分维数进行指数拟合(图 5)，二者高度相关($R^2 = 0.95$)，表明湖泊的形状指数与分维数有明显的相关性。湖泊形状指数越大，湖泊岸线分形维数越高，岸线越复杂多变，湖泊沿岸带的物种多样性越高。湖泊形态越复杂，其相应沿岸的面积也较大，与其他地物类型的接触面也越大，湖泊中物质能量流动越频繁，可以支持更大的湖泊初级生产能力的增长^[5]。

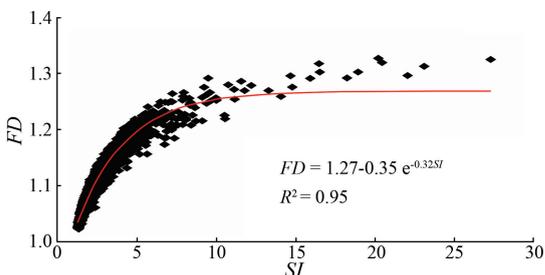


图 5 形状指数与分维数关系

Fig. 5 Relationship of shape index and fractal dimension

3 结论

本文将遥感与 GIS 手段相结合，突破了以往湖泊形态研究的困难，能够更加有效快速地提取地物信息，来定量分析大范围区域内的湖泊形态特征。结果表明：

1) 基于面向对象分类方法，得到水体分类精度较高，3 种类型水体分类总精度为 93.00%，其中湖泊分类精度达 90% 以上。

2) 湖泊空间分布不均匀。5 个湖区中，拥有湖泊面积最大和数量最多的湖区均是青藏高原湖区，其次是东部平原湖区，而云贵高原湖区的湖泊数量最少和面积最小。

3) 湖泊形态特征表现出明显的区域特点。拥有湖泊最多的青藏高原和东部平原 2 大湖区，湖泊形态上表现出不同趋势，青藏高原湖区湖泊形态相对简单，湖泊岸线平滑，而东部平原湖区临海，河流水系发达，湖泊岸线更加曲折。

4) 湖泊的分维数与形状指数相关性较高($R^2 = 0.95$)，湖泊岸线分维数值越高，形状指数越大，岸线越复杂。湖泊形态越复杂，与沿岸带的接触范围越大，营养物质来源越多，湖泊中物质能量的流动也越频繁，湖水较肥沃，湖中生物更丰富。

5) 本文的相关研究成果将为进一步深入分析湖泊中物质能量的输入输出及湖泊的营养状况提供理论依据，并为湖泊形态变化监测提供技术支持。

参考文献 (References):

- [1] 中国环境科学研究院. 湖泊生态安全调查与评估[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 1 - 19.
Chinese Research Academy of Environmental Sciences. Investigation and Evaluation of Lake Ecological Security[M]. Beijing: Science Press, 2012: 1 - 19.
- [2] 霍雨. 鄱阳湖形态特征及其对流域水沙变化响应研究[D]. 南京: 南京大学, 2011.
Huo Y. Poyang Lake Morphological Characteristics and Its Response to Runoff and Sediment of Poyang Lake Basin[D]. Nanjing: Nanjing University, 2011.
- [3] 闫强, 廖静娟, 沈国状. 近 40 年乌兰乌拉湖变化的遥感分析与水文模型模拟[J]. 国土资源遥感, 2014, 26(1): 152 - 157. doi: 10. 6046/gtzyyg. 2014. 01. 26.
Yan Q, Liao J J, Shen G Z. Remote sensing analysis and simulation of change of Ulan UI Lake in the past 40 years[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2014, 26(1): 152 - 157. doi: 10. 6046/gtzyyg. 2014. 01. 26.
- [4] 纪鹏, 郭华东, 张露. 近 20 年西昆仑地区冰川动态变化遥感研究[J]. 国土资源遥感, 2013, 25(1): 93 - 98. doi: 10. 6046/gtzyyg. 2013. 01. 17.
Ji P, Guo H D, Zhang L. Remote sensing study of glacier dynamic change in West Kunlun Mountains in the past 20 years[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2013, 25(1): 93 - 98. doi: 10. 6046/gtzyyg. 2013. 01. 17.
- [5] 黄卫东, 廖静娟, 沈国状. 近 40 年西藏那曲南部湖泊变化及其成因探讨[J]. 国土资源遥感, 2012, 24(3): 122 - 128. doi: 10. 6046/gtzyyg. 2012. 03. 22.

- Huang W D, Liao J J, Shen G Z. Lake change in past 40 years in the southern Nagqu District of Tibet and analysis of its driving forces[J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2012, 24(3): 122 - 128. doi:10.6046/gtzyyg. 2012. 03. 22.
- [6] 曾光, 高会军, 朱刚. 近32年塔里木盆地与准噶尔盆地湿地演化遥感分析[J]. *国土资源遥感*, 2013, 25(3): 118 - 123. doi: 10.6046/gtzyyg. 2013. 03. 20.
- Zeng G, Gao H J, Zhu G. Analysis of wetlands evolution process between Tarim Basin and Junggar Basin in the past 32 years[J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2013, 25(3): 118 - 123. doi:10.6046/gtzyyg. 2013. 03. 20.
- [7] 李新国, 江南, 王红娟, 等. 近30年来太湖流域湖泊岸线形态动态变化[J]. *湖泊科学*, 2005, 17(4): 294 - 298.
- Li X G, Jiang N, Wang H J, et al. Dynamic changes of lake shorelines morphology in the Taihu Basin during the past 30 years[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2005, 17(4): 294 - 298.
- [8] 王红娟, 姜加虎, 李新国. 岱海湖泊岸线形态变化研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2006, 15(5): 674 - 677.
- Wang H J, Jiang J H, Li X G. Study on changes of lake shoreline morphology in Daihai Lake[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2006, 15(5): 674 - 677.
- [9] 潘文斌, 黎道丰, 唐涛, 等. 湖泊岸线分形特征及其生态学意义[J]. *生态学报*, 2003, 23(12): 2728 - 2735.
- Pan W B, Li D F, Tang T, et al. The fractal character of lake shoreline and its ecological implication[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(12): 2728 - 2735.
- [10] Moses S A, Janaki L, Joseph S, et al. Influence of lake morphology on water quality[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2011, 182(1/4): 443 - 454.
- [11] Thierfelder T. The morphology of landscape elements as predictors of water quality in glacial/boreal lakes[J]. *Journal of Hydrology*, 1998, 207(3/4): 189 - 203.
- [12] 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): 317 - 320.
- Chen Y H, Feng T, Shi P J, et al. Classification of remote sensing image based on object oriented and class rules[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2006, 31(4): 317 - 320.
- [13] 林川, 宫兆宁, 赵文吉. 基于中分辨率TM数据的湿地水生植被提取[J]. *生态学报*, 2010, 30(23): 6460 - 6469.
- Lin C, Gong Z N, Zhao W J. The extraction of wetland hydrophytes types based on medium resolution TM data[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(23): 6460 - 6469.
- [14] 沈金祥, 杨辽, 陈曦, 等. 面向对象的山区湖泊信息自动提取方法[J]. *国土资源遥感*, 2012, 24(3): 84 - 91. doi:10.6046/gtzyyg. 2012. 03. 16.
- Shen J X, Yang L, Chen X, et al. A method for object-oriented automatic extraction of lakes in the mountain area from remote sensing image[J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2012, 24(3): 84 - 91. doi:10.6046/gtzyyg. 2012. 03. 16.
- [15] 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.
- [16] Jiang Z L, Qi J G, Su S L, et al. Water body delineation using index composition and HIS transformation[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2012, 33(11): 3402 - 3421.
- [17] Xu H Q. Modification of normalized difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, 27(14): 3025 - 3033.
- [18] Verpoorter C, Kutser T, Tranvik L. Automated mapping of water bodies using Landsat multispectral data[J]. *Limnology and Oceanography: Methods*, 2012, 10(12): 1037 - 1050.
- [19] Feysa G L, Meilby H, Fensholt R, et al. Automated water extraction index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 140: 23 - 35.
- [20] Sheng Y W, Shan C A, Smith L C. Automated image registration for hydrologic change detection in the lake-rich arctic[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2008, 5(3): 414 - 418.
- [21] 宋开山, 刘蕾, 吕冬梅, 等. 基于Landsat-TM和MODIS的非洲水体分布格局研究[J]. *热带地理*, 2014, 34(3): 302 - 307.
- Song K S, Liu L, Lü D M, et al. Distribution pattern of African surface water based on Landsat-TM and MODIS imagery[J]. *Tropical Geography*, 2014, 34(3): 302 - 307.
- [22] 刘蕾, 臧淑英, 那晓东, 等. 兼容光学雷达影像及地形辅助数据的扎龙湿地遥感分类[J]. *地理与地理信息科学*, 2013, 29(1): 36 - 40.
- Liu L, Zang S Y, Na X D, et al. Wetland mapping in the Zhalong natural reserve using optical and Radar remotely sensed data and ancillary topographical data[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2013, 29(1): 36 - 40.
- [23] Stehman S V. Estimating the Kappa coefficient and its variance under stratified random sampling[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1999, 62(4): 401 - 407.
- [24] 傅伯杰, 陈利顶. 景观多样性的类型及其生态意义[J]. *地理学报*, 1996, 51(5): 454 - 462.
- Fu B J, Chen L D. Landscape diversity types and their ecological significance[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1996, 51(5): 454 - 462.
- [25] 邬建国. 景观生态学——格局、过程、尺度与等级[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- Wu J G. *Landscape Ecology: Pattern, Process, Scale and Level* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000.
- [26] 王苏民, 窦鸿身. 中国湖泊志[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- Wang S M, Dou H S. *The Lakes of China* [M]. Beijing: Science Press, 1998.
- [27] 马荣华, 杨桂山, 段洪涛, 等. 中国湖泊的数量、面积与空间分布[J]. *中国科学: 地球科学*, 2011, 41(3): 394 - 401.
- Ma R H, Yang G S, Duan H T, et al. China's lakes at present: Number, area and spatial distribution[J]. *Science China Earth Sciences*, 2011, 54(2): 283 - 289.

Characterization of lake morphology in China using remote sensing and GIS

LIU Lei^{1,2,3}, ZANG Shuying², SHAO Tiantian¹, WEI Jinhong¹, SONG Kaishan¹

(1. *Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, China*; 2. *College of Heilongjiang Province, Key Laboratory of Remote Sensing Monitoring of Geographic Environment, Harbin Normal University, Harbin 150025, China*; 3. *The Third Surveying and Mapping Engineering Institute of Heilongjiang, Harbin 150025, China*)

Abstract: Based on 2010 Landsat TM/ETM⁺ satellite remote sensing imagery data and referring to Google Earth imageries and other historical documents, the authors used object-oriented classification method to extract inland water bodies across China. The authors set imagery segmentation scale at 30 m, and extracted water bodies with ratio index, Normalized Difference Water Index (NDWI) and spectral relation. There are three types of water, i. e., rivers, lakes, and reservoirs. Finally, the spatial distribution of lakes in China was obtained. Using ArcGIS software package, lake area, shoreline length, shape index (SI), related circumscribing circle (RCC), fractal dimension (FD) and other landscape indices, the authors conducted calculation, and divided China into five lake districts according to previous researches. The differences of lake morphology were comparatively analyzed in the five lake districts. The results show that the object-oriented classification method has better classification accuracy. The overall accuracy of the three types of water is 93%, and the classification accuracy of the lake is over 90%. Statistically, the number of lakes with area greater than 1.0 km² is 2 477, totaling 77 934.72 km². The Qinghai-Tibet Plateau Lake District (QTPLD) has the largest lake area, accounting for 54.34% of the total lake area in China. The averages of SI and FD are the minimum, thus the lake morphology is simple in the QTPLD. However, the rainfall is abundant and the water system is well developed in Eastern Plain Lake District (EPLD). Its averages of SI and FD are the maximum among all the sub-lake regions. The lake shoreline is more zigzag, and hence the lake morphology is more complex in the EPLD. In addition, SI and FD have significant correlation ($R^2 = 0.95$). The higher the FD of the lake, the greater the observed SI.

Keywords: lake morphology; shape index; fractal dimension; lake district; remote sensing

第一作者简介: 刘蕾(1989-),女,硕士研究生,主要研究方向为遥感与生态环境。Email: liulei19890105@163.com。

通信作者: 宋开山(1974-),男,研究员,主要研究方向为水环境遥感。Email: songks@neigae.ac.cn。

(责任编辑: 邢宇)