

## 近 30 年来太湖流域湖泊岸线形态动态变化\*

李新国<sup>1,2</sup>, 江南<sup>1</sup>, 王红娟<sup>1,2</sup>, 刘新<sup>1,2</sup>

(1: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

(2: 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要** 湖泊的岸线特征是表征湖泊形态特征的一项重要内容. 本文应用分形理论中的计盒维数, 基于岸线长度与面积关系的分形维数及岸线发育系数, 对太湖流域主要湖泊的湖泊岸线变化进行了研究. 结果表明, 分形维数可以更好的对湖泊岸线进行量化描述, 太湖流域主要湖泊的岸线具有自相似性. 近 30 年来, 太湖流域湖泊的岸线曲折度降低, 岸线长度减少, 岸线结构趋于单调.

**关键词**: 分形维数; 湖泊岸线; 太湖流域; 动态变化

## Dynamic Changes of Lake Shorelines Morphology in the Taihu Basin during the Past 30 Years

LI Xinguo<sup>1,2</sup>, JIANG Nan<sup>1</sup>, WANG Hongjuan<sup>1,2</sup> & LIU Xin<sup>1,2</sup>

(1: Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P. R. China)

(2: Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, P. R. China)

**Abstract** The characteristic of lake shoreline is one of morphological features of lakes. Based on the two physical properties of lake, perimeter and area, applying the shoreline development index, the box-dimension and the fractal dimension based on shoreline length-area, the dynamic changes of the lake shorelines in Taihu Basin are studied. The results show that fractal dimension quantitatively describes the lake shoreline exactly, and the major lake shorelines take on self-similarity. The sinuosity of shorelines and the perimeters reduced, and the structure of the shorelines became monotonous during the past 30 years.

**Keywords**: Fractal dimension; lake shoreline; Taihu Basin; dynamic changes

湖泊的形态特征是指湖泊的湖盆结构及其大小的概念, 湖盆一般是由沿岸带、亚沿岸带和湖心敞水带三部分组成<sup>[1]</sup>. 湖泊的形态特征是多因素综合作用的产物, 是在内、外营力以及人为因素长期相互作用下的综合反映, 其形成过程是一个错综复杂的过程. 湖泊的形态特征可以用形态度量指标表示, 常用的形态度量指标有湖泊面积、湖岸线长度、湖长、湖宽、平均水深、容积等. 其各项指标参数值的大小反映了湖泊及流域地质、地貌、水文等各种内、外作用力相互作用的强度和发展过程, 并随着湖泊的演变过程呈现动态变化. 湖泊的形态度量指标在很大程度上又决定了湖水的理化性质和水生生物的分布规律. 研究湖泊的形态特征及其动态变化, 不仅是表征湖泊发展演变过程、水情变化和水动力学特性不可或缺的基础资料, 具有重要的理论意义, 而且对于湖泊中各种资源的开发利用和保护等方面, 也具有重要的现实意义<sup>[2]</sup>.

用分形理论来描述自然界中一些不规则和具有高度复杂结构的现象, 可以用少量信息来重现原来的研究对象, 具有指定信息少、计算容易和重现精度高的特点, 已经收到良好的效果, 并且这些应用不仅促进了分形理论本身的发展, 并且深化了对纷繁复杂地理现象特征及其内在成因机制的认识<sup>[3–6]</sup>. 湖泊的岸线长度是表征湖泊形态特性的一项重要指标, 分形理论的产生和发展, 为描述复杂的湖岸形态变化提供了有力的工具. 本文应用分形理论对近三十年来太湖流域主要湖泊的岸线长度进行研究, 由此可以对湖泊岸线的动态变化进行准确的描述.

\* 中国科学院知识创新项目(KZCX3-SW-331)和(INF105-SDB-1-22)联合资助. 2005-04-03 收稿, 2005-06-08 收修改稿. 李新国, 男, 1971 年生, 博士研究生, E-mail: lxgonline@yahoo.com.cn.

## 1 太湖流域湖泊的形态特征

地处长江三角洲南缘的太湖流域,地势西高东低。由于受到自然和人为因素的影响,太湖流域湖泊主要分布在高程为 4-5 m 以下的低洼区,湖盆形态大致相似,都是浅水碟形湖盆,湖底地形平坦,平均水深 1-2.5 m,湖泊蓄水容比较小,湖泊水位变化具有缓涨缓落的特性。流域内水网密布,大小湖泊星罗棋布,其中面积小于 5 km<sup>2</sup> 的湖泊有 164 个,面积为 5-10 km<sup>2</sup> 的湖泊有 16 个,面积大于 10 km<sup>2</sup> 的湖泊有 9 个,即太湖、滆湖、阳澄湖、淀山湖、洮湖、澄湖、昆承湖、元荡和独墅湖,合计湖泊面积 2839 km<sup>2</sup>,占流域内湖泊总面积 89.8%<sup>[7]</sup>。

## 2 分形理论概述

分形(Fractal)与分维(Fractal dimension)的概念是由法裔美国科学家曼得尔布罗特(Mandelbrot B. B.)在 20 世纪 70 年代中期提出的,其原义是“不规则的、分数的、支离破碎的”<sup>[8]</sup>。Mandelbrot 仅给出了简单的分形数学定义,即分形是其豪斯道夫维( $D_f$ )严格大于拓扑维数( $D_t$ )的集合。经众多研究者的修正,英国数学家肯尼思·法尔科内给出了较为全面而恰当的分形定义,该定义认为分形是具有下列性质的集合  $F^{[9]}$ : (1)  $F$  具有精细结构,即在任意小的比例尺下,都可呈现出更加精致的细节; (2)  $F$  的不规则性,使其在整体和局部均不能用传统的几何语言加以描述; (3)  $F$  具有某种自相似的形式,但不是完全数学意义上的自相似性,这可能是近似或统计意义下的自相似性; (4) 一般  $D_f > D_t$ ,即豪斯道夫维严格大于拓扑维数; (5)  $F$  常可以用极简单的方法来定义,可以由迭代法产生;分形维数是定量表征分形特征的参数,已成为研究分形的主要工具。通过分形理论,同时结合其他湖泊形态特征,可以对湖泊沿岸带进行更好的量化描述<sup>[10]</sup>。

## 3 资料收集与数据处理

本文选用不同年代的地形图以及遥感影像两类信息源进行数字化来求得湖泊的面积和岸线周长数据。根据收集到的资料和分析的需要,采用 1971 年总参测绘局出版的 1:100000 江苏省地形图,遥感影像选用研究区的 2000 年 5 月 4 日的 Landsat TM 影像,合成方案为 5 4 3。由于选用的资料时间跨度较长,因此能够很好的反映太湖流域湖泊岸线的动态变化。

在 ERDAS 软件中,首先对 TM 影像进行几何精纠正,配准后的象元误差不大于 1 个象元。为了突出湖泊岸线的轮廓,对经过几何纠正后的 TM 影像,再进行边缘增强和灰度变换等处理,通过人机交互式目视解译来完成湖泊岸线的勾绘,并形成矢量格式的 Coverage 文件。对于地形图,首先扫描形成 TIF 格式文件,经过投影设定与配准,在 ERDAS 软件中,目视解译勾绘出湖泊的岸线,形成 Coverage 文件。利用 ARC/INFO 的 Pat 文件所提供的信息,统计各个湖泊的面积和周长数据。

## 4 研究方法

对湖泊岸线的形态进行描述,运用下列方法确定湖泊岸线的形态参数<sup>[10,14]</sup>:

(1) 岸线发育系数:

$$D_L = \frac{L}{2\sqrt{\pi A}} \quad (1)$$

式中  $L$  是湖泊的岸线长度,  $A$  是湖泊面积。

岸线发育系数(Shoreline Development Index, SDI)  $D_L$  反映岸线的不规则程度。湖泊岸线愈不规则,  $D_L$  值越大。岸线发育系数  $D_L$  在确定湖泊营养物质时,具有较大的意义。两个除了岸线发育系数  $D_L$  不同,其余均相同的情况下,  $D_L$  值较高的湖泊具有较多的生产量,而且其物理、化学和生物特性的分布也愈不规则。湖岸曲折多变,则其岸线发育系数较大,这对于发展湖泊鱼类养殖和水生植物种植是一有利条件。岸线发育系数可以将湖泊的外源营养物的输入和湖泊岸线的长度联系起来,作为常用的湖泊几何形态学指标用于简单的描述湖泊沿岸带范围,广泛运用于对不同湖泊的分类以及评价其沿岸带的重要性。

(2) 计盒维数:

$$N(r) \propto r^{-D} \quad (2)$$

式中  $r$  为网格的长度,  $N(r)$  为覆盖有被测湖泊岸线的网格数目,  $D$  为被测湖泊岸线的分形维数, 对等式两边同时取自然对数有:

$$\ln N(r) = -D \ln r + C \quad (3)$$

式中  $C$  为待定常数,  $D$  为被测湖泊岸线的分形维数. 该维数用来描述单个湖泊岸线的分形特征, 称为 SBD. 湖泊岸线是二维空间的曲线, 湖泊岸线的岸线计盒维数应该介于 1 和 2 之间, 可以用来描述岸线复杂程度的变化情况. 其值越趋近于 1, 则岸线的自我相似形越强, 岸线形状越有规律, 岸线的几何形状趋于简单. 其值越大, 反映岸线的几何形状越复杂.

(3) 基于周长 - 面积关系的分形维数:

$$P = kA^\alpha \quad (4)$$

式中  $P$  为湖泊的周长,  $A$  为湖泊的面积,  $k$  为待定系数,  $\alpha$  为推绎指数, 对等式两边同时取自然对数有:

$$\ln P = \alpha \ln A + C \quad (5)$$

式中  $C$  为待定常数, 分形维数值  $D$  可通过斜率乘以 2 求得, 即  $D$  等于  $2\alpha$ . 基于周长 - 面积关系的分形维数, 用于对多个湖泊的岸线分形维数进行计算, 其值在 1 到 2 之间, 当  $D$  等于 1.5 时, 表明其处于布朗随机运动状态, 越接近该值, 表明稳定性越差.

## 5 结果与分析

根据公式 (1) 计算得到太湖流域的九个主要湖泊的岸线发育系数. 对提取的湖泊岸线在 ArcView 中进行网格分析, 从  $2^0$  像元到  $2^9$  像元依次划分图像中的湖泊岸线, 统计每一个尺度下的非空正方形个数, 依据公式 (3) 并在统计软件 SPSS 中进行回归分析, 得到太湖流域的九个主要湖泊的岸线计盒维数值, 表中的相关系数和  $F$  值是在计算岸线计盒维数值时得到的, 结果列于表 1. 对表 1 中的岸线发育系数和岸线计盒维数进行统计, 结果列于表 2.

表 1 两个时期太湖流域主要湖泊的若干形态指标与岸线计盒维数(SBD)

Tab. 1 Some morphological indexes and Box-dimensions of major lakes in Taihu Basin during the two periods

湖泊名称	年	面积( km <sup>2</sup> )	周长( km )	SDI	SBD	相关系数	$F$ 值
太湖	1971	2511.02	542.27	3.05	1.294	0.996	1861.78
	2000	2417.74	529.40	3.04	1.282	0.993	1038.65
溇湖	1971	194.93	81.94	1.66	1.280	0.997	1007.21
	2000	141.91	77.74	1.84	1.230	0.999	5832.92
阳澄湖	1971	122.64	172.30	4.39	1.357	0.999	17461.93
	2000	116.46	152.49	3.98	1.327	0.999	14275.55
洮湖	1971	87.76	61.36	1.85	1.282	0.999	10146.03
	2000	81.21	49.15	1.54	1.239	0.996	2175.92
淀山湖	1971	63.56	54.81	1.94	1.261	0.999	22933.45
	2000	61.43	52.96	1.91	1.242	0.999	18848.84
澄湖	1971	45.73	37.98	1.58	1.258	0.998	7113.48
	2000	40.62	36.30	1.61	1.240	0.999	9045.70
昆承湖	1971	18.25	22.89	1.51	1.269	0.998	7859.94
	2000	17.99	22.21	1.48	1.246	0.998	11477.38
元荡	1971	15.54	37.39	2.67	1.250	0.998	5376.72
	2000	12.59	21.78	1.73	1.243	0.999	19401.26
独墅湖	1971	10.65	17.79	1.54	1.237	0.999	11877.94
	2000	9.35	16.10	1.48	1.222	0.997	2454.91

表 2 两个时期太湖流域主要湖泊的岸线发育系数(SDI)和岸线计盒维数(SBD)统计

Tab.2 The statistics of SDI and SBD of major lakes in Taihu Basin during the two periods

统计值	1971 年				2000 年			
	SDI	SBD	面积 (km <sup>2</sup> )	周长 (km)	SDI	SBD	面积 (km <sup>2</sup> )	周长 (km)
最大值	4.39	1.357	2511.02	542.27	3.98	1.327	2417.74	529.40
最小值	1.51	1.237	10.65	17.79	1.48	1.222	9.35	16.10
平均值	2.24	1.276	341.12	114.30	2.07	1.252	322.14	106.46
标准方差	2.74	0.0986	2307.71	472.57	2.44	0.0919	2226.60	464.03

用回归显著性的方差分析对拟合结果进行检验时,只要  $F$  值大于  $F_{0.01(1,8)} = 11.26$ ,可以认为双对数直线拟合具有极其显著的水平 and 较高的相关系数。从表 1 的数据来看,通过回归分析拟合的湖泊岸线计盒维数值都具有极其显著的水平 and 较高的相关系数,回归效果是显著的。

从表 1 和表 2 总体上可以看出 2000 年太湖流域主要湖泊的总面积和岸线周长总和比其 1971 年的总面积和岸线周长总和分别减少了 170.78 km<sup>2</sup>和 70.60 km。就单一湖泊而言,对同一湖泊,2000 年的岸线发育系数与 1971 年的岸线发育系数相比,虽然从整体表现出下降趋势,但一些湖泊岸线发育系数呈现不规则的变化,这主要是由于岸线发育系数在很大程度上受到长度测量中不确定的影响<sup>[14]</sup>。但是对同一湖泊而言,2000 年的岸线计盒维数与 1971 年的岸线计盒维数相比,呈现下降的趋势,表明岸线的几何形状趋于简单,岸线形状的复杂程度趋于下降,并且从标准方差可以看出,数据的离散程度很小。从表 2 可以看出,岸线发育系数变化范围比岸线计盒维数的变化范围要大,可以大于岸线计盒维数的上限值 2,从标准方差的对比也可以看出,数据的离散程度相对较大。从两个时期数据表明的趋势来看,岸线计盒维数比岸线发育系数更有效。

对两个时期的湖泊岸线的动态变化,根据 9 个湖泊的面积和岸线周长数据,依据公式(5)计算的数据,得到图 1 和图 2。

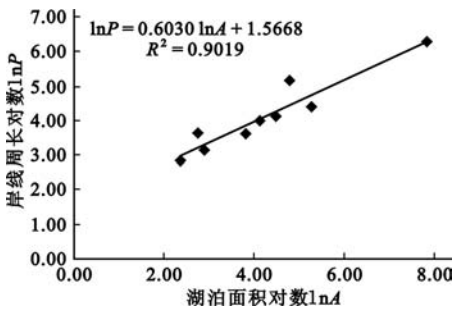


图 1 1971 年岸线周长与湖泊面积之间的关系

Tab.1 The relationship of between area(A) and perimeter(P) in 1971

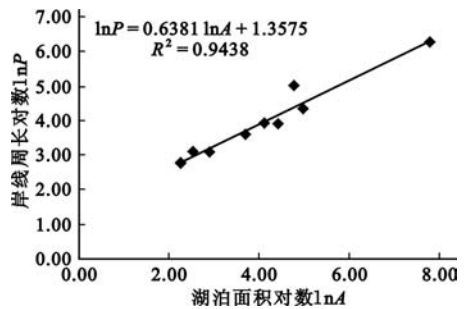


图 2 2000 年岸线周长与湖泊面积之间的关系

Tab.2 The relationship of between area(A) and perimeter(P) in 2000

从图 1 和图 2 可以看出,  $R^2$  值均大于 0.90,表明不同时期湖泊的岸线周长对数与湖泊面积对数确实存在着显著的线性回归的关系。通过查相关系数检验表( $T$  分布表)相关系数都通过了  $\alpha = 0.01$  的显著性水平检验,二者都表明计算的分形维数值是有一定理论基础的,表明这些湖泊的岸线具有自相似性。

从分形维数值的变化情况来看,2000 年的分形维数值( $D = 1.2762$ )较 1971 年的分形维数值( $D = 1.2060$ )大,更接近于 1.5,表明其稳定性变差。这与近三十年来太湖流域湖泊的滩地围垦、水利建设等强烈的人类经济活动对湖泊形态的改变是有密切关系的。由于人为垦殖,对太湖流域进行围垦的湖泊数量达到 239 个,仅 20 世纪 70 年代,建圩 68 座,建圩面积 341.01 km<sup>2</sup>,占原有湖泊面积的 8.8%,严重破坏了湖泊岸线的结构和形态<sup>[15]</sup>。在自然状态下,岸线曲折多变,湖岸结构和物质组成均为自然演化的结果。在沿岸带

浅滩的围垦和筑堤建坝等人为因素的影响下,使湖泊岸线多呈顺直或折线的几何形态,湖岸结构多为浆砌块石或水泥板块构筑,极大地改变湖泊自然滩地特征,致使湖泊岸线长度不断减少,湖岸结构趋于单调,使得湖泊岸线的复杂度在降低,稳定性变差。

## 6 结论

分析表明计算的分形维数值是可靠的,太湖流域主要湖泊的岸线具有自相似性。从两个时期湖泊的岸线计盒维数表明,2000年的太湖流域湖泊岸线的几何形状趋于简单,岸线的形状复杂程度已下降,从两个时期基于湖泊周长对数与面积对数的关系得出的分形维数表明,2000年的太湖流域湖泊岸线的稳定程度已降低,反映出近三十年来人类经济活动对湖泊岸线的干扰程度加大。

湖泊岸线的自然演变,在本质上虽然是入湖泥沙冲淤平衡的结果,但近三十年来,沿湖兴修水利工程,联圩并圩以及围湖垦殖等人类经济活动对太湖流域湖泊岸线的演变起到了不可低估的作用,极大地加速了湖泊岸线的演化过程,导致湖泊岸线的计盒分形维数值降低。应用分形理论对于同一气候带同样面积的湖泊岸线特征进行研究,特别是长江中下游区域的湖泊,具有十分重要的意义。

致谢:本文修改过程中,得到了中国科学院南京地理与湖泊研究所窦鸿身研究员和王洪道研究员的悉心指导,谨此致谢。

## 7 参考文献

- [1] 施成熙. 中国湖泊概论. 北京: 科学出版社, 1989: 7-10.
- [2] 窦鸿身, 姜加虎. 中国五大淡水湖. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2003: 11-13.
- [3] 赵锐, 赵宏, 何隆华. 地理现象的分形研究. 地理科学, 1994, 14(1): 9-15.
- [4] 何隆华, 赵宏. 水系的分形维数及其意义. 地理科学, 1996, 16(12): 124-128.
- [5] 赵锐, 何隆华. 中国水系湖泊分形研究. 地球信息, 1997(增刊1): 50-54.
- [6] 赵宏, 赵安. 中国湖泊分形特征初探. 湖泊科学, 1997, 9(3): 279-283.
- [7] 黄漪平等. 太湖水环境及其污染控制. 北京: 科学出版社, 2001: 1-5.
- [8] Mandelbrot B B. How long is the coast of Britain? Statistical self-similarity and fractional dimension. *Science*, 1967, 150(3775): 636-638.
- [9] 肯尼思·法尔科内著, 曾文曲等译. 分形几何——数学基础及其应用. 辽宁, 沈阳: 东北大学出版社, 1991: 9-12.
- [10] 潘文斌, 黎道丰, 唐涛等. 湖泊岸线分形特征及其生态学意义. 生态学报, 2003, 23(12): 2729-2725.
- [11] 崔广柏. 湖泊水库水文学. 南京: 河海大学出版社, 1990: 20-21.
- [12] Nikora V I, Pearson C P & Shankar U. Scaling properties in landscape patterns: New Zealand experience. *Landscape Ecology*, 1999, 14: 17-33.
- [13] Sapozhnikov V & Foufoula-Georgiou E. Study of self-similar and self-affine objects using logarithmic correlation integral. *Journal of Physics A: Math Gen*, 1995, 28: 559-571.
- [14] Kent C & Wong J. An index of littoral Zone complexity and its measurement. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1982, 39: 847-853.
- [15] 窦鸿身, 马武华, 张圣照等. 太湖流域围湖利用的动态变化及其对环境的影响. 环境科学学报, 1988, 8(1): 1-9.