

湖泊岸线分形特征及其生态学意义

潘文斌^{1,2}, 黎道丰¹, 唐 涛¹, 蔡庆华^{1*}

(1. 中国科学院水生生物研究所, 淡水生态与生物技术国家重点实验室, 武汉 430072; 2. 福州大学环境与资源学院, 福州 350002)

摘要:应用分形理论中的计盒维数、岸线长度与面积关系对保安湖及江汉平原一些湖泊的湖岸线长度和湖泊面积进行研究, 借以对上述两个物理性质进行准确的特征化。此外还运用 Korcak 法则对湖北省湖泊面积分布进行研究。结果可用于预测湖泊岸线长度如何随着湖泊面积而变化, 以及预测不同大小的湖泊面积分布。探讨了湖岸形态和大型水生植物生物量间的关系, 并讨论环境和人为因素对湖泊岸线的影响, 以及湖泊岸线变化对湖泊生物的影响。

关键词:分形; 湖泊岸线; 大型水生植物; 生物量

The fractal character of lake shoreline and its ecological implication

PAN Wen-Bin^{1, 2}, LI Dao-Feng¹, TANG Tao¹, CAI Qing-Hua¹ (1. State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China; 2. College of Environment and Resources, Fuzhou University, Fuzhou 350002, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23 (12): 2728~2735.

Abstract: Based on the two physical properties lake perimeter and area, Baoan Lake and 30 other lakes in the Jiangnan plain were studied, applying the shoreline development index (SDI), the box-dimension, the equation for shoreline length-area and its transform. The shoreline box-dimension (SBD) was applied to each lake, while equation for shoreline perimeter-area (SPA_N) and its transform (SPA_T) treated 31 lakes altogether. We also used Korcak's Law to all the lakes in Hubei Province. The results showed that the average of SDI of the 31 selected lakes was 4.50, with a standard deviation of 2.088; the Shangjin Lake had the highest SDI of 11.33, and the Wangmu Lake had the smallest SDI of 1.68. The average of SBD

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)资助项目(2002CB412310); 国家自然科学基金资助项目(30070153, 39670150); 中国科学院知识创新工程重大资助项目(KZCX1-SW-12); 中国科学院知识创新工程重要方向资助项目(KSCX2-SW-111); 中国科学院水生所领域前沿资助项目(K220208); 湖北省涝渍灾害与湿地农业重点实验室基金资助项目(HNKFJ2002A02); 福建省科学技术厅资助项目(2001J054)和福州大学校基金资助项目(XJY-0110)

收稿日期: 2003-05-22; 修订日期: 2003-10-25

作者简介: 潘文斌(1973~), 男, 浙江人, 博士, 主要从事淡水生态学与流域生态学研究。E-mail: wenbinpan@sina.com

* **通讯作者,** Author for correspondence, E-mail: qhcai@ihb.ac.cn

Foundation item: This work was jointly supported by the State Basic Research and Development Plan (No. 2002CB412310), the National Natural Science Foundation of China (No. 30070153, No. 39670150), Key project of CAS' knowledge innovative project (No. KZCX1-SW-12), the important directional item of CAS' knowledge innovative project (No. KSCX2-SW-111), the frontier project of Institute of Hydrobiology (No. K220208) and the foundation from the Hubei Province' key laboratory of waterlogging and wetland agriculture (No. HNKFJ2002A02), and the foundation from department of science and technology of Fujian Province (No. 2001J054) and the Fuzhou University (No. XJY-0110)

Received date: 2003-05-22; **Accepted date:** 2003-10-25

Biography: PAN Wen Bin, Ph. D. Research on freshwater ecology and watershed ecology. E-mail: wenbinpan@sina.com

of the 31 lakes was 1.219, with a standard deviation of 0.078; the Shangiin Lake had the highest SBD of 1.419, and the Dachang Lake had the smallest SBD of 1.096. By using the equation of perimeter-area ($\ln P=c+b\ln A$, and $SPA_N=2b$) and its transform ($\ln A=c+b\ln P$, and $SPA_T=2/b$), the 31 lakes had a SPA_N of 1.3998 and a SPA_T of 1.6956 with equations regression coefficients (R^2) higher than 0.80. This indicates that the shoreline of these lakes exhibited a self-similarity. The value of SPA_N was close to the mean of SBD of 31 lakes (1.219), and it can be used to forecast how the shoreline length varies according to the changes of lake area. Based on Korcak's Law and the area distribution of lakes in Hubei Province, the integrated fractal dimension of area distribution for lakes was 1.52, which showed that the lakes in Hubei Province had a higher self-similarity and more complex shorelines during the 1980s. By a stepwise regression analysis between macrophyte biomass in some lakes of Hubei Province and four morphological indexes (SDI , SBD , Area, Perimeter), we found that SDI and SBD are the influencing factors of the biomass. The result showed that the higher the shoreline complexity of a lake is, the higher the SBD of a lake gets. In order to protect the biodiversity of lake ecosystems, it is essential to keep the shoreline in a natural status.

Key words: fractal; lake shoreline; macrophytes; biomass

文章编号:1000-0933(2003)12-2723-08 中图分类号:Q178.3 文献标识码:A

湖泊的外部形态特征,即湖盆结构及其大小,千差万别。湖盆结构通常由沿岸带(littoral zone)、亚沿岸带(sublittoral zone)和湖心敞水带(open water area)或深水带3部分组成。诸多的湖沼学过程影响着水生植物的种类与分布,同时水生植物也对湖泊或水库物理、化学、生物特征产生影响,特别是在沿岸带区域。通常,沿岸带是指岸边到水生植物可以生长最大深度。影响水生植物丰度和分布的主导因素是光的可获得性,湖泊营养状况,沉积物特征和风。而湖泊形态、大小与流域特征,均与上述因素相关,特别是沿岸带形态。一般情况下,随着湖泊年龄的增长,其沿岸带不断扩大。任何湖泊的湖岸和湖水界面,都是风浪能量的承受者。湖泊表面积和形态均会显著地影响着风对波浪和水流强度的作用,并最终影响着沉积物迁移运动趋势。沉积物中的营养物质对于根生水生植物特别重要,大量研究表明根生水生植物主要从沉积物中获得氮磷。风浪对湖湾的影响较小,这使得具有许多湖湾的湖泊能够形成更多的沿岸带面积,有利于水生植物在这些区域生长。因此,湖泊形态可以看作是一个影响水生植物的综合因子^[1~5]。

湖泊岸线和沿岸带的性质在湖泊的生物学关系中具有重要的预测价值。简单描述沿岸带范围的经验指数已被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。最常用的形态学指数是湖岸线发育系数 $D_L(SDI)$:

$$D_L = \frac{S_L}{2\sqrt{\pi A_0}} \quad (1)$$

式中, S_L 是湖泊的岸线长度, A_0 是湖泊面积。岸线发育系数将湖泊的外源营养物的输入和湖泊岸线的长度联系起来^[6]。Mandelbrot 认为长度不是湖泊岸线较好的定量特征,因此引入分维概念以描述湖泊岸线特征。对于处于同一气候带的同样面积湖泊,如果湖泊岸线分维值越高,则其岸线越复杂,相对能够提供的沿岸带生境多样性高。同时相应的沿岸带面积也较高,这就有可能支持更高的湖泊初级生产力。

国内外诸多学者对我国一些湖泊的形态测量学参数先后做了不少工作^[6],并提出了一些利用和保护湖泊的建议。本工作应用分形理论对江汉平原的一些湖泊的湖岸线长度和湖泊面积进行研究,由此可以对湖泊的这两个物理性质进行准确的特征化。得到的结果可以用来预测湖泊的岸线长度如何随着湖泊的面积而变化。它们之间的关系同样可以用来预测不同大小分类的湖泊的分布。研究岸线分维另一个目的是了解湖岸形态究竟在多大程度上影响湖泊的初级生产力,本文主要探讨湖岸形态和大型水生植物生物量之间的关系。

万方数据

1 研究地点概况

湖北素有“千湖之省”之称,这些密集的浅水湖泊,集中分布在江汉平原与鄂东长江两岸,统称为“江汉湖群”,是我国著名的淡水湖群之一。湖北省的湖泊首先是受长江、汉江干流所控制,许多湖泊沿着江河干流两岸天然堤下展开,在两岸小支流入汇口附近发育。这种现象在长江沿岸表现最为明显。这类湖泊的分布基本是以江河为纽带,呈串珠状排列。另一类则是在平原腹地发育的湖泊。这类湖泊受平原腹地微地貌控制,分布上的特点是以 1~2 个大湖为核心,密集成团的分布,如洪湖湖群。这类湖泊的空间分布格局与上述串珠状分布形成鲜明的对照。除了上述两大类型以外,还有一些零星分布的湖泊,一般是平原上江河湖淤塞改道后的产物或是人工筑堤以后的形成的湖泊。以上 3 种类型构成了江汉平原的湖群空间格局基本框架^[2,3]。

2 研究方法

为更好地对湖泊的形态进行描述,主要运用下列方法确定湖泊岸线的分形特征^[7~11]:

(1) 周长-面积关系 该公式运用于对多个湖泊的岸线的分形维数的获取:

$$P_c = c_3 A^\alpha \quad (2)$$

c_3 是系数, α 是一个推绎指数,它的值是岸线分维的一半,即 $\alpha = D_{bc}/2$ 。

(2) 容量维数 D_{cap} 该维数用来刻画单个湖泊岸线的分形特征,公式为:

$$N(r) \propto r^{-D_{cap}} \quad (3)$$

这里的 $N(r)$ 是用边长为 r 的正方形来覆盖岸线时,所需要的正方形的数量。分维 D_{cap} 在分形理论里的又被叫做计盒维数(Box dimension),维数 D_{cap} 在地形学上的运用最为广泛,当其用于描述湖泊岸线分形特征时,称之为 SBD 。

(3) 分维还可以依据 Korcak 法则进行计算:

$$F(A) = kA^{-D/2} \quad (4)$$

$F(A)$ 表示在一个区域内面积大于 A 的多个湖泊,具有分维 D 的多个湖泊应该满足上述公式。

对于江汉湖群和保安湖的湖泊形态,在下面的研究中,主要运用上述方法,它们不仅可以对一个湖泊的形态进行测度,也可以对多个湖泊的形态进行推绎。所用湖泊地图均来源于湖北省水利厅和湖北省水利勘测设计院编的《湖北省湖泊变迁图集》中 20 世纪 80 年代的湖泊形状。由于该区域内的湖泊形态不可避免的受到人类活动的干扰,如围湖造田等,所以在选择湖泊的时候尽量选择受到人为干扰少,湖区面积的减少基本上是由于自然萎缩引起的湖泊。本研究共选择了 31 个湖泊。本文中水生植物生物量的数据来自中国科学院水生生物研究所近年来对大型水生植物运用断面法进行全湖调查得到结果(均为单位面积湿重)。该区域湖泊均为浅水湖泊,沉水植物占大型水生植物生物量大部,其余为浮叶根生植物和挺水植物^[3,12~14]。

3 结果分析

3.1 单个湖泊岸线的几何学研究

利用 GIS 软件 MAPINFO 将 31 个湖泊的形态数字化,并提取其中的一些形态信息。将 31 个湖泊的水位,以及对应的面积和周长列于表 1。从表中可以看出,面积和周长最大的湖泊是梁子湖,分别为 309.02 km², 361.54 km。面积和周长最小的湖泊是大长湖,分别为 1.54 km², 9.81 km。

根据公式(1)和方法(2),计算得到 31 个湖泊的岸线发育系数和计盒维数,结果列于表 1。表中的相关系数和 F 值是用计盒维数软件分析岸线形状时得到的。由于在使用计盒软件划分图像的时候,从 2⁰(一个 1 像素)到 2⁹(512 个像素),共有十对数据(即在每一个尺度下有一个非空正方形个数)。故用回归显著性的方差分析来对拟合结果进行检验时,只要 F 值大于 $F_{0.01(1,8)} = 11.26$,便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。从得到的结果来看,31 个湖泊回归分析的拟合结果都具有极其显著的水平 and 较高的相关系数。31 个湖泊岸线发育系数平均为 4.50,标准差为 2.088;计盒维数的平均值为 1.219,标准差为 0.078。从标准差值可以看出,不同湖泊的岸线发育系数离散程度较大,而岸线计盒维数离散程度较小。

3.2 多个湖泊岸线的几何学研究

结合方法(1)及其变形,可得到两种计算多个湖泊分维的方法。方法(1)的公式可表述为:

$$\ln P = c + b \ln A \quad (5)$$

即 $\ln P$ 是 $\ln A$ 的线性函数, c 为该直线在 $\ln P$ 上的截距, b 为该直线的斜率, 分维 $D=2b$ 。

其变形公式可以表述为:

$$\ln A = c + b \ln P \quad (6)$$

其中, $\ln A$ 是 $\ln P$ 的线性函数, c 为该直线在 $\ln A$ 上的截距, b 为该直线的斜率, 分维 $D=2/b$ 。

表 1 31 个湖泊的若干形态指标与计盒维数

Table 1 Some morphological indexes and Box-dimensions of 31 lakes

湖泊名称 Name of lakes	地点 Location	水位(m) Water level	面积(km ²) Area	周长(km) Perimeter	岸线发育系数 SDI	岸线计盒维数 SBD	相关系数 Correlation coefficient	F 值 F
白潭湖 ^①	黄冈	18.5	3.65	21.37	3.16	1.280	0.9959	840.68
保安湖 ^②	大冶	20.0	46.91	85.60	3.53	1.174	0.9967	1066.49
长湖 ^③	荆门	30.5	152.23	244.59	5.59	1.269	0.9967	1050.81
大长湖 ^④	石首	30.1	1.54	9.81	2.23	1.096	0.9964	967.82
东湖 ^⑤	武汉	21.5	34.22	121.05	5.84	1.277	0.9956	797.03
东西汉湖 ^⑥	应城市	24.0	25.94	50.52	2.80	1.129	0.9957	814.87
斧头湖 ^⑦	武昌县	21.5	168.30	204.64	4.45	1.245	0.9972	1250.94
海口湖 ^⑧	阳新	15.5	8.84	24.98	2.37	1.118	0.9973	1272.88
后官湖 ^⑨	汉阳县	21.2	39.89	153.36	6.85	1.315	0.9944	621.18
花家湖 ^⑩	鄂州	18.0	8.50	33.91	3.28	1.144	0.9963	941.72
黄家湖 ^⑪	武汉	20.5	7.47	22.78	2.35	1.116	0.9957	807.55
借粮湖 ^⑫	荆门	30.5	15.87	51.22	3.63	1.201	0.9946	642.87
梁子湖 ^⑬	鄂州	19.0	309.02	361.54	5.80	1.292	0.9957	807.73
龙赛湖 ^⑭	应城市	24.5	15.24	25.16	1.82	1.248	0.9972	1240.35
马湖 ^⑮	鄂州	18.0	15.56	85.44	6.11	1.292	0.9953	742.45
牛浪湖 ^⑯	公安	33.0	22.79	127.43	7.53	1.256	0.9963	929.55
牛山湖 ^⑰	武昌县	19.0	64.29	148.46	5.22	1.154	0.9949	681.81
青菱湖 ^⑱	武汉	20.5	9.83	31.58	2.84	1.113	0.9946	648.39
三湖连江 ^⑲	嘉鱼	28.0	12.54	69.49	5.54	1.287	0.9959	853.33
三菱湖 ^⑳	石首	30.1	4.84	22.44	2.88	1.150	0.9969	1110.70
三山湖 ^㉑	鄂州	19.0	31.10	72.92	3.69	1.186	0.9971	1210.30
上津湖 ^㉒	石首	28.6	19.77	178.58	11.33	1.419	0.9967	1058.36
宋湖 ^㉓	石首	30.1	3.64	24.65	3.65	1.241	0.9936	537.88
汤逊湖 ^㉔	武昌县	20.5	43.08	113.32	4.87	1.244	0.9944	622.44
王母湖 ^㉕	孝感	22.5	8.89	17.76	1.68	1.121	0.9930	492.25
西凉湖 ^㉖	咸宁	21.5	97.95	253.78	7.23	1.323	0.9967	1066.97
小湖 ^㉗	汉阳县	20.0	8.16	33.57	3.31	1.180	0.9939	564.40
严东湖 ^㉘	武汉	20.4	6.37	26.71	2.99	1.177	0.9957	815.67
严西湖 ^㉙	武汉	20.4	15.90	69.33	4.90	1.250	0.9957	814.67
淤泥湖 ^㉚	公安	32.0	19.30	117.74	7.56	1.287	0.9978	1611.76
中湖 ^㉛	石首	30.1	7.68	42.62	4.34	1.209	0.9967	1066.45
平均 Mean					4.50	1.219		

①Baitanhu Lake ②Baoan Lake ③Changhu Lake ④Dachanghu Lake ⑤Donghu Lake ⑥Dongxichahu Lake ⑦ Futouhu Lake ⑧Haikouhu Lake ⑨Houguanhu Lake ⑩Huajiahu Lake ⑪Huangjiahu Lake ⑫Jielianghu Lake ⑬ Liangzi Lake ⑭Longsaihu Lake ⑮Mahu Lake ⑯Niulanghu Lake ⑰Niushanhu Lake ⑱Qinglinghu Lake ⑲ Sanhulianjiang Lake ⑳Sanlinghu Lake ㉑Sanshanhu Lake ㉒Shangjinhu Lake ㉓Songhu Lake ㉔Tangxunhu Lake ㉕Wangmuhu Lake ㉖Xilianghu Lake ㉗Xiaozhahu Lake ㉘Yandonghu Lake ㉙Yanxihu Lake ㉚Yunihu Lake ㉛Zhonghu Lake

根据 31 个湖泊的面积和周长,结合上述公式计算得到图 1 和 2。根据图 1 得到 31 个湖泊的岸线形状的分维是 1.3998;由图 2 可以得到 31 个湖泊的岸线形状的分维是 1.6956。后者的分维值高于前者。

和前面的计盒维数平均值 1.219 相比较,可以看出图 1 得到推断与之较为接近。从图中的 R^2 的值均大于 0.80,可以看出得到的两个线性关系是比较显著的,说明这些湖泊的岸线具有自相似性。

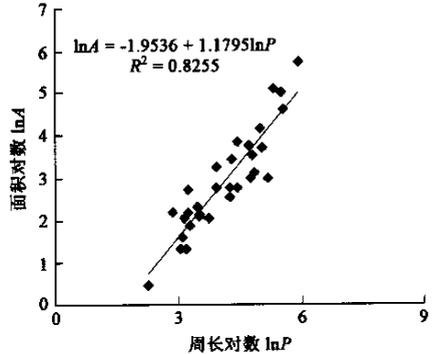
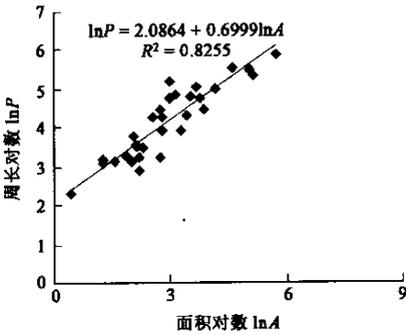


图 1 31 个湖泊得到的周长和面积之间的关系

Fig. 1 The relationship between area (A) and perimeter (P) for 31 lakes

图 2 31 个湖泊得到的面积和周长之间的关系

Fig. 2 The relationship between perimeter (P) and area (A) for 31 lakes

3.3 湖泊面积的分布

从《湖北省湖泊变迁图集》的湖北省湖泊统计表可以得到不同区域内介于 $0.067(666.7 \times 100\text{m}^2)$ 和 $3.335\text{km}^2(666.7 \times 5000\text{m}^2)$ 之间, 3.335km^2 以上湖泊的数目。依据 Korcak 法则,用以下公式进行计算:

$$\log_{10}\{(F(A_1) - F(A_2))/(F(A_2) - F(A_{\max}))\} = D/2 \tag{7}$$

其中 $F(A_1)$ 表示介于 0.067 和 3.335km^2 之间湖泊数, $F(A_2)$ 为 3.335km^2 以上湖泊数目, A_{\max} 为该区域的最大湖泊面积。计算得到得到表 2 的结果。在上节计算得到 31 个湖泊的分维值为 1.3998 和 1.6956,这 31 个湖泊分布在湖北省的 15 个县市。表中 20 世纪 80 年代的湖北省的湖泊面积分布分维是 1.52,介于上述两个值之间。这说明了两种方法的结果是较为吻合的。注意到 20 世纪 80 年代的面积分布分维除了孝感地区,基本上介于 1 和 2 之间,但 20 世纪 50 年代有 4 个区域的面积分布分维小于 1。因此这个公式更适用于 20 世纪 80 年代的湖泊面积分布的分析。

3.4 湖泊形态与大型水生植物生物量间的关系

由于江汉平原大多数湖泊是浅水湖泊,湖泊岸线对湖泊生产力有显著影响,同时也是调控整个湖泊生态系统的主要因子^[1,2]。整理得到湖北省境内的江南部分湖泊的形态数据和大型水生植物的生物量数据(表 3)。以生物量为应变量,其他四项形态指标为自变量,进行逐步回归(统计软件 STATISTICA Version5.0)。得到下面的逐步回归方程:

$$\text{Biomass} = 45625.0 + 2746.0 \cdot \text{SDI} - 46277.2 \cdot \text{SBD} \tag{8}$$

逐步回归方程的 R^2 为 0.6024, $F(2,5) = 3.7876, p < 0.1$ 。SDI 的 $p = 0.0409$ 。SBD 的 $p = 0.0658$ 。从上面的方程可以看出,岸线发育系数和岸线计盒维数都是影响生物量的因子,但是岸线发育系数更加显著(其 p 值比岸线计盒维数的 p 值要小)。

4 讨论

4.1 岸线分维的优势

岸线发育系数的意义在于它反映了沿岸带群落在整个湖泊容积中占有更大比例的潜在能力。但 Hutchinson 也指出岸线的长度决定于使用地图细节的精细程度,从不同比例尺的地图上得到的长度多少会有所不同。因此,岸线发育系数在很大程度上受到长度测量中不确定性的影响^[7]。通过运用分形测量理论,可较好地克服上述缺陷,同时结合其他形态特征,便可对湖泊沿岸带可以进行更好的量化描述。

表 2 湖北省湖泊面积分布:Korcak 法则的应用尝试

Table 2 Area distribution of lakes in Hubei Province: a test of Korcak's Law

年代 Time	20 世纪 50 年代 The fifties of the twentieth century			20 世纪 80 年代 The eighties of the twentieth century		
区域 Region	面积在 0.067 与 3.335km ² 间湖泊数 Number of Lakes with the area between 0.067 and 3.335 km ²	面积大于 3.335km ² 湖泊数 Number of Lakes with the area with the area 3.335 km ² above	面积分 布分维 Fractal of Area distribution	面积在 0.067 与 3.335km ² 间湖泊数 Number of Lakes with the area between 0.067 and 3.335 km ²	面积大于 3.335km ² 湖泊数 Number of Lakes with the area with the area 3.335 km ² above	面积分 布分维 Fractal of Area distribution
湖北省 ^①	1010	322	0.99	719	125	1.52
武汉 ^②	116	35	1.04	126	30	1.25
孝感 ^③	36	38	-0.05	16	7	0.72
荆州 ^④	611	164	1.14	269	46	1.53
荆门 ^⑤	8	8	0.00	16	3	1.45
黄冈 ^⑥	115	20	1.52	108	11	1.98
鄂州 ^⑦	42	9	1.34	29	8	1.12
咸宁 ^⑧	56	39	0.31	141	16	1.89
宜昌 ^⑨	23	7	1.03	11	2	1.48

* 计算得到分维值应该介于 1 和 2 之间,表中小于 1 的分维在理论上没有;①Hubei Province;②Wuhan City;③Xianggan City;④Jingzhou City;⑤Jingmen City;⑥Huanggang City;⑦Ezhou City;⑧Xianning City;⑨YiChang City

表 3 部分湖泊形态数据和大型水生植物生物量数据

Table 3 The morphological indexes and macrophyte biomass in some lakes

湖名 Name of lakes	生物量(g/m ²) Biomass	岸线计盒维数 SBD	岸线发育系数 SDI	面积(km ²) Area	周长(km) Perimeter
东湖 ^①	144.800	1.277	5.840	34.220	121.050
牛山湖 ^②	6522.000	1.154	5.220	64.290	148.460
黄家湖 ^③	1702.000	1.116	2.350	7.470	22.780
青菱湖 ^④	183.000	1.113	2.840	46.910	85.600
保安湖 ^⑤	2636.000	1.174	3.530	46.910	85.600
梁子湖 ^⑥	797.000	1.292	5.800	309.020	361.540
西凉湖 ^⑦	6410.000	1.323	7.230	97.950	253.780
三湖连江 ^⑧	1359.500	1.287	5.540	12.540	69.490

① Donghu Lake;② Niushanhu Lake;③ Huangjiahu Lake;④ Qinglinghu Lake;⑤ Baoan Lake;⑥ Liangzi Lake;⑦ Xilianghu Lake;⑧ Sanhulianjiang Lake

4.2 岸线的自相似性

随着岸线分维值的增加,湖泊岸线愈加曲折,形态也愈加复杂。31 个湖泊的岸线计盒维数介于 1.096 和 1.419 之间。从表 1 的数据可知,这 31 个湖泊岸线发育系数介于 1.68 和 11.33 之间,与岸线计盒维数的相关关系较为显著($p < 0.001$)。对 31 个湖泊整体分维的计算来看,由方法 1 及其变形公式得到分维值分别是 1.3998 和 1.695。从两种方法的相关分析中可以看出,它们之间具有极强的正线性关系,表明 31 个湖泊的岸线具有自相似性。上述两种方法可互相替换使用,但不可混和使用。因前种方法较后一种具有更多的优点,故以往的文献中一般都使用前一种方法,由于湖泊岸线是二维空间中的曲线,因此其分维值应该介于 1 和 2 之间^[15]。

4.3 湖泊分维的生态学意义

最近在国内外生态学方面研究中,分形理论有较多运用^[7,10~11,16~21]。分形理论在湖泊测量中应用的意义在于得到的分形指数可以很好地量化沿岸带的作用,湖泊岸线分形性质和近岸面积使我们能够更好地

地了解受岸线形态影响的沿岸带初级生产力^[1~3]。当两个湖泊面积、水深和坡度近似相等,且处于同一区域,理论上,岸线相对复杂的那个湖泊,其岸线分维值相应较高,并能够支持相对高的生物多样性和初级生产力。而对于同一个湖泊而言,当湖泊的沉积物增加时,其岸线分维虽然不变,但其沿岸带也会增加。我们知道大多数的湖泊鱼类在湖泊沿岸带产卵。其次,在这个区域内,重要营养物质周转特别快,增加了浅水区域内的生产力。最后,沿岸带对于湖泊生物多样性具有十分重要的意义,例如在长江中游湖泊存在“湖湾效应”现象且其对水生植物多样性有影响^[22]。

Kent 和 Wong 认为在描述湖泊沿岸带生产力时,岸线分维要比岸线发育系数更为出色^[7]。但从本文对大型水生植物生物量与湖泊形态间关系的研究结果来看,逐步回归方程中的岸线发育系数要比岸线分维更具显著性,说明在本例研究中岸线发育系数要比岸线分维更为有效。Kent 和 Wong 的研究对象是深水湖泊,而且那些湖泊受到人为干扰较少。文中涉及的湖泊均为长江中下游浅水湖泊,受人为干扰较重。20 世纪 50 年代和 80 年代面积分布研究中面积分布分维的变化就表明这一点,以湖北省为例,20 世纪 50 年代岸线分维接近 1,但是在 80 年代岸线分维为 1.52,这种变化是由在此期间所进行的大量围垦所导致的,这些围垦使得介于 0.067 和 3.335km² 之间湖泊数和 3.335km² 以上湖泊数目大量减少。这也说明在当前开展江汉平原湖泊群的生物学调查对于淡水生物多样性保护具有重要意义。

需要指出的是由于历史数据的限制,如为了和 20 世纪 80 年代以后的湖泊岸线数据匹配,使用的数据均为 20 世纪 80 年代以后的水生植物的全湖调查数据,所以既有岸线形态指标又有大型水生植物生物量数据的湖泊数量不多,这对结果有一定影响。因此以后的工作应借鉴在景观生态学研究中的经验,着重于不同湖区的湖泊形态特征的比较,同时建立包含空间信息(土壤、水文、植被和地形等)的江汉湖群资源数据库,以期为湖区的经济发展和环境保护提供科学依据。

4.4 对围湖造田的思考

随着人口的增长和农业发展,长江中下游的浅水湖泊大量地被开垦为农田,仅近 40 a,围湖造田的面积就超过 10000km²。保安湖从 20 世纪 70 年代以来,由于围湖垦殖,湖泊面积不断缩小,至今仍有围湖的现象发生。围湖造田往往减少了岸线的复杂性,特别是一些湖湾往往容易遭到围垦,这使得湖泊的岸线分维值减少。从整体上看江汉湖群的大多数湖泊岸线较为曲折多变,湖岸线曲折,营养物质来源多,湖水较肥沃,湖中生物丰富。因此在充分发挥其调蓄、水运、工农业用水功能的基础上,协调区域内的渔业、禽畜业的发展,保证对湖区环境和资源的可持续利用。其次是尽量维持现有的湖泊面积。围湖造田不仅破坏了湖泊的环境异质性,还直接导致了湖泊生物多样性的丧失,同时其防洪蓄水能力大大下降。以保安湖为例,50 年代到 80 年代高、中、低水位对应的容积,分别减少了 322.1×10⁶m³,159.7×10⁶m³,86.7×10⁶m³^[3]。因此需要在湖区周围植树造林,以防流域内水土流失过于严重,这样便可以达到延长湖泊的寿命、持续利用湖区丰富资源以及发挥生态系统服务功能之目的^[23,24]。

References:

- [1] Horne AJ and Goldman CR. *Limnology*, 2nd ed. New York: McGraw-Hill, Inc., 1994.
- [2] Liu JK. Lakes of the middle and lower basins of the Chang Jiang (China). In: Taub FB ed. *Lakes and Reservoirs*, Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1984. 331~355.
- [3] Liu JK. *Ecological research of Donghu Lake (I)*. Beijing: Science Press, 1995.
- [4] Wang SM, Dou HS. *Monograph of Chinese Lakes*. Beijing: Science Press, 1998.
- [5] Shi CX. *A general outline of Chinese lakes*. Beijing: Science Press, 1989.
- [6] Guan ZH. Morphometric parameters of Baoan Lake and their limnological implications. In: *Resources, environment and fisheryecological management of macrophytic lakes* (Liang YL and Liu HQ, Eds), Beijing: Science Press, 1995. 3~15.
- [7] Kent C and Wong J. An index of littoral Zone complexity and its measurement. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1982, **39**: 847~853.
- [8] Mandelbrot BB. *The Fractal Geometry of Nature*. San Franciscos: W. H. Freeman, 1983.
- [9] Hastings HM and Sugihara G. *Fractals-A user's guide for the natural science*. Oxford: Oxford University Press, 1993.
- [10] Nikora VI, Pearson CP and Shankar U. Scaling properties in landscape patterns: New Zealand Experience.

- Landscape Ecology*, 1999, **14**: 17~33.
- [11] Sapozhnikov V and 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.
- [12] Jin G. State of submersed vegetation resources in Lake Liangzi, Lake Niushan and Lake Bao'an. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1999, **23**(1): 87~89.
- [13] Su ZG, Zhang TL and Cai QH. On the aquatic vascular plants in Xiliang Lake. In: *Resources, Environment and Fishery Ecological Management of Macrophytic Lakes*. Liang YL and Liu HQ, eds, Beijing: Science Press, 1995. 160~171.
- [14] Su ZG, Zhang TL and Cai QH. On change of aquatic vegetation in Baoan Lake with remarks on its fishery utilization. In: *Resources, Environment and Fishery Ecological Management of Macrophytic Lakes*. Liang YL and Liu HQ, eds, Beijing: Science Press, 1995. 147~159.
- [15] Liu CR, Chen LZ. Landscape scale fractal analysis of patch shape in the vegetation of the Beijing region. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, **24**(2): 129~134.
- [16] Pan WB and Cai QH. Studies on macrophytes community pattern in a bay of Baoan Lake, Hubei. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2000, **24**(5): 412~417.
- [17] Cai QH and Wu G. Growth pattern of reed in Caogang Lake, Huanghuaihai Plain, China. *Journal of Environmental Sciences*, 1999, **11**(1): 100~105.
- [18] Cai QH, Zhao B and Pan WB. Preliminary study on fractal character of growth pattern of reed. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1998, **22**(2): 123~127.
- [19] Fu BJ. Landscape diversity analysis and mapping. *Acta Ecologica Sinica*, 1995, **15**(4): 345~350.
- [20] Wu JG. *Landscape ecology: pattern, process, scale and hierarchy*. Beijing: Higher Education Press, 2000.
- [21] Xiao DN. *Landscape ecology: theory, method and application*. Beijing: China Forestry Press, 1993.
- [22] Yu D, Kang H, Chen YY. Lake bend effect and its influence on the specific diversity of aquatic plants in the lakes of middle basins of Changjiang River. *Acta Ecologica Sinica*, 1996, **16**(5): 476~483.
- [23] Pan WB, Tang T, Deng HB and Cai QH. Lake ecosystem services and their ecological valuation—a case study of Baoan Lake in Hubei Province. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, **13**(10): 1315~1318.
- [24] Cai QH, Tang T and Deng HB. Discussion on freshwater ecosystem services and its evaluation index system. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, **14**(1): 135~138.

参考文献:

- [3] 刘建康. 东湖生态学研究(二). 北京: 科学出版社, 1995.
- [4] 王苏民, 襄鸿身. 中国湖泊志. 北京: 科学出版社, 1998.
- [5] 施成熙. 中国湖泊概论. 北京: 科学出版社, 1989.
- [6] 官子和. 保安湖形态测量学参数及其在湖沼学上的意义. 草型湖泊资源、环境与渔业生态学管理(一). 梁彦龄, 刘伙泉主编. 北京: 科学出版社, 1995. 3~15.
- [12] 金刚, 梁子湖、牛山湖和保安湖沉水植被资源现状. 水生生物学报, 1999, **23**(1): 87~89.
- [13] 苏泽古, 张堂林, 蔡庆华. 西凉湖水生维管束植物. 草型湖泊资源、环境与渔业生态学管理(一). 梁彦龄, 刘伙泉主编. 北京: 科学出版社, 1995. 160~171.
- [14] 苏泽古, 张堂林, 蔡庆华. 保安湖水生植被的演变与渔业利用的研究. 草型湖泊资源、环境与渔业生态学管理(一). 梁彦龄, 刘伙泉主编. 北京: 科学出版社, 1995. 147~159.
- [15] 刘灿然, 陈灵芝. 北京地区植被景观斑块形状的分形研究. 植物生态学报, 2000, **24**(2): 129~134.
- [16] 潘文斌, 蔡庆华. 保安湖—湖湾大型水生植物群落格局的研究. 水生生物学报, 2000, **24**(5): 412~417.
- [18] 蔡庆华, 赵斌, 潘文斌. 芦苇生长格局分形特征的初步研究. 水生生物学报, 1998, **22**(2): 123~127.
- [19] 傅伯杰. 景观多样性分析及其制图研究. 生态学报, 1995, **15**(4): 345~350.
- [20] 邬建国. 景观生态学——格局、过程、尺度与等级. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [21] 肖笃宁. 景观生态学: 理论、方法及应用. 北京: 中国林业出版社, 1993.
- [22] 于丹, 康辉, 陈宜瑜. 湖湾效应对长江中游湖泊水生植物多样性的影响. 生态学报, 1996, **16**(5): 476~483.
- [23] 潘文斌, 唐涛, 邓红兵, 等. 湖泊生态系统服务功能评估初探——以湖北保安湖为例. 应用生态学报, 2002, **13**(10): 1315~1318.
- [24] 蔡庆华, 唐涛, 邓红兵. 淡水生态系统服务及其评价指标体系的探讨. 应用生态学报, 2003, **14**(1): 135~138.