

保安湖大型水生植物在碳循环中的作用

潘文斌 蔡庆华

(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)

摘要:通过全年的生物量调查的方法,对保安湖的优势种水草生产量进行调查;并进行两个月的优势种水草的分解实验,同时结合各优势水草的含碳量和保安湖的湖水溶解有机碳(DOC)和颗粒有机碳(POC)的动态,阐明大型水生植物在保安湖生态系统碳循环中的作用。同时在整个湖泊范围内,运用分形几何学对水草中的含碳量格局进行分析。

关键词: 大型水生植物;保安湖;碳循环;生产量;分解;分形几何;格局

中图分类号: Q148 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3207(2000)05-0418-08

温室气体 CO₂ 的源和汇的问题正成为全球研究的重点。在淡水湖泊中,碳作为一个相当活跃的元素在水生态系统的各个营养级间被传递。但其循环的具体生物学过程和确切的统计量度,在湖泊这个复杂环境中难以准确描述。本文通过对保安湖的优势种水草生产量和水草分解释放碳量的研究以定量地评价大型水生植物在淡水湖泊碳循环中的作用。

1 材料与方法

保安湖(114°23' E, 30°15' N)位于湖北黄石的大冶市西北,为长江中游南岸的一个浅水草型湖泊。它东接三山湖,西隔梁子湖,南邻保安镇,北濒长江,属于梁子湖湖群。常年平均气温为 20℃ 左右,无霜期达 280d。湖表面积为 39.3 km²,由主体湖区(26.7 km²)、桥墩湖(8.0 km²)、扁担塘(3.3 km²)和肖四海(1.3 km²)等四个湖区组成,平均水深为 1.5—2.5m,最大深度为 3.7m,常年水位 17.5m。年均降水量 1283mm。

大型水生植物是保安湖的主要生物类群^[1],其中又以沉水植物为主。从保安湖大型水生植物周年动态中可以看出:黄丝草 *Potamogeton maackianus* A. Benn 是保安湖的主要优势种,其周年生物量变化较小;而菹草 *Potamogeton crispus* L. 为冬、春两季的优势种;苦草 *Vallisneria spiralis* L. 为夏、秋两季的优势种;聚草 *Myriophyllum spicatum* L. 和金鱼藻 *Ceratophyllum oryzetorum* Kom. 为扁担塘湖区的优势种。

在全湖设置 12 个断面,每个断面 10 个采样点。采用生物量调查的方法,每月采样一次。进行两个月的优势种水草的分解实验。每星期用 Dorhmann DC-180 碳分析仪进行

收稿日期:1999-10-15;修订日期:2000-05-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(39670150)

作者简介:潘文斌(1973—),男,浙江临安人,博士,从事系统生态学及流域生态学方面的研究

滤液的总碳、无机碳、溶解性有机碳(DOC)的分析。同时收集未分解的水草(烘干并称重)和测定分解产生的颗粒有机碳(POC)。同样用上述设备分析各优势水草的含碳量。每月采集湖水,测定保安湖的湖水溶解性有机碳(DOC)和颗粒有机碳(POC)浓度。最后用地统计学的 Krige 插值法和分形几何学的研究方法对大型水生植物的总碳量进行全湖尺度上的分析^[2-9]。

2 结果

2.1 各优势种水草的单位质量和含碳量

各优势种水草单位质量的含碳量是评价其在碳循环中作用的基本参数,由此亦有助于估计全湖的水草固定了多少碳量。利用 Dorhmann DC-180 碳分析仪对单位质量的水草进行分析得到表 1。

表 1 四种优势种水草的单位质量的含碳量(mg/g 干重)

Tab. 1 The carbon weight in a gram of four dominant macrophyte species

水草种名 Specific name of macrophytes	菹草 <i>Potamogeton</i> <i>maackianus</i>	黄丝草 <i>Potamogeton</i> <i>crispus</i> L.	聚草 <i>Myriophyllum</i> <i>spricatum</i> L.	苦草 <i>Vallisneria</i> <i>spiralis</i> L.
含碳量 Carbon concentration	504	511	513	502

从结果来看,其含碳量基本上一致,在 50% 左右。也就是说一克水草(干重)的一半是碳。

2.2 各优势种水草被微生物分解的速率特性

从为期两个月的优势种水草分解实验来看,分解 56d 后,黄丝草等四种水草的干重损失达到始重的 22% 到 35% 之间。根据 $W_t = W_0 e^{-kt}$ (W_t 是水草在 t 时间的重量, W_0 是水草初始时的重量, t 是分解天数, K 是速度常数)来计算实验的结果,列于表 2。Peterson 认为: $K > 0.01/d$ 为快组, $K < 0.005/d$ 为慢组,因此从 56d 的 K 的平均值来看,四种水草都是属于快组^[10,11]。从 K 的变化来看,其值有逐渐减少的趋势,这主要是由于难分解物质(纤维素和木质素等)在其中的比例愈来愈大的缘故。根据四种水草分解的 K 值的平均值推算得到的分解时间和理论干重损失列于表 3。

表 2 优势种水草分解的速度常数

Tab. 2 The decomposition speed parameters of dominant macrophyte species

速度常数 K Speed parameters K	苦草 <i>Vallisneria</i> <i>spiralis</i>	金鱼藻 <i>Ceratophyllum</i> <i>oryzetorum</i>	聚草 <i>Myriophyllum</i> <i>spricatum</i>	黄丝草 <i>Potamogeton</i> <i>crispus</i>
21	0.02103	0.01604	0.01538	0.01858
28	0.01759	0.01661	0.01471	0.01452
35	0.01117	0.01079	0.01299	0.00991
42	0.01094	0.00873	0.01367	0.00941
49	0.00942	0.00679	0.01484	0.0084
56	0.00655	0.00463	0.02009	0.00774
K 的平均值 mean of K	0.01279	0.0106	0.01528	0.01142

表 3 水草分解时间和理论干重损失对应值

Tab. 3 The theoretic loss percents of macrophyte dry weight versus decomposition time

分解时间(d) Decomposition time	0	8.4	17.8	28.5	40.8	55.4	73.2	96.2	128.5	183.9
理论干重损失(%) Theoretic loss percents of macrophyte dry weight	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90

2.3 分解产物与分解时间和温度的关系

在衰亡水草分解的过程中,会释放出许多产物。在实验中测定的指标有总氮、总磷、溶解性有机碳 DOC 和颗粒有机碳 POC。分析结果表明,除金鱼藻外,其它三种水草的分解产物和时间及分解时的温度都有较好的对数关系($p < 0.05000$),金鱼藻的结果也接近 $p < 0.10$ 的显著性水平。具体结果列于表 4 和表 5。从表 3 可以看出,一般情况下,死亡的水草要经过约半年的时间才能分解完全。

表 4 各因子和分解时间对数(用 LN (Time) 表示)之间的相关关系

Tab. 4 The correlation coefficient between some factors and LN (decomposition time)

各因子名称 Names of the factors	黄丝草 <i>Potamogeton</i> <i>cri</i>	聚草 <i>Myriophyllum</i> <i>spricat</i>	苦草 <i>Vallisneria</i> <i>spiral</i>	金鱼藻 <i>Ceratophyllum</i> <i>oryzetor</i>
总磷降解率(%)和 LN(Time) 相关系数(r)				
The correlation coefficient between decomposition ratio of TP and LN(Time)	.6974 *	.8234 *	.6766 *	.6125
p 值 p value	.037	.006	.045	.080
总氮降解率(%)和 LN(Time) 相关系数(r)				
The correlation coefficient between decomposition ratio of TN and LN(Time)	.3578	.5824	.6631	.8018 *
p 值 p value	.344	.100	.052	.009
总碳降解率(%)和 LN(Time) 相关系数(r)				
The correlation coefficient between decomposition ratio of TC and LN(Time)	.7353 *	.9037 *	.8440 *	.5963
p 值 p value	.024	.001	.004	.090
DOC 浓度(ppm)和 LN(Time) 相关系数(r)				
The correlation coefficient between concentration of DOC and LN(Time)	.7251 *	.8862 *	.6848 *	.4139
p 值 p value	.027	.001	.042	.268
POC 浓度(mg/L)和 LN(Time) 相关系数(r)				
The correlation coefficient between concentration of POC and LN(Time)	.5067	.4263	.3600	.6877 *
p 值 p value	.164	.253	.341	.041

2.4 各优势种水草的生产量

大型水生植物参与水生态系统的碳循环主要体现:1)它们能够通过光合作用利用水中的无机碳合成有机物和放出氧气;2)它们在光合作用的同时将部分碳以碳酸钙的形式沉积到叶的表面;3)它们分泌溶解性有机化合物到其生长的周围环境中;4)它们可被鱼类

表 5 各因子和累计温度对数(用 $\text{LN}(\Sigma(\text{Temprature}))$ 表示)之间的相关关系Tab. 5 The correlation coefficient between some factors and $\text{LN}(\Sigma(\text{Temprature}))$

各因子名称 Names of the factors	黄丝草 <i>Potamogeton crispus</i> L.	聚草 <i>Myriophyllum spicatum</i> L.	苦草 <i>Vallisneria spiralis</i> L.	金鱼藻 <i>Ceratophyllum oryzetorum</i> Kom
总磷降解率(%)和 $\text{LN}(\Sigma(\text{Temprature}))$ 相关系数(r) The correlation coefficient between decomposition ratio of TP and $\text{LN}(\Sigma(\text{Temprature}))$	.7015*	.6954*	.7169*	.5819
p 值 p value	.035	.038	.030	.100
总氮降解率(%)和 $\text{LN}(\Sigma(\text{Temprature}))$ 相关系数(r) The correlation coefficient between decomposition ratio of TN and $\text{LN}(\Sigma(\text{Temprature}))$	.5189	.7000*	.6314	.7504*
p 值 p value	.152	.036	.068	.020
总碳降解率(%)和 $\text{LN}(\Sigma(\text{Temprature}))$ 相关系数(r) The correlation coefficient between decomposition ratio of TC and $\text{LN}(\Sigma(\text{Temprature}))$	.7235*	.8844*	.8470*	.6237
p 值 p value	.028	.002	.004	.073
DOC 浓度(ppm)和 $\text{LN}(\Sigma(\text{Temprature}))$ 相关系数(r) The correlation coefficient between concentration of DOC and $\text{LN}(\Sigma(\text{Temprature}))$	.7407*	.8792*	.7163*	.4771
p 值 p value	.022	.002	.030	.194
POC 浓度(mg/L)和 $\text{LN}(\Sigma(\text{Temprature}))$ 相关系数(r) The correlation coefficient between concentration of POC and $\text{LN}(\Sigma(\text{Temprature}))$	4338	.3914	.3296	.5985
p 值 p value	.243	.398	.386	.089

或螺类等取食;5)它们死亡后的分解产物形成碎屑或沉积物。生产量是它们每年能从大气和水体中得到碳量的量度。它可以根据一年中大型水生植物的月生物量最大值来推算。考虑主体湖的面积最大,谨将主体湖各优势种水草的生产量列于表 6。

表 6 主体湖各优势种水草的年生产量

Tab. 6 The annual production of four dominant macrophyte species in the main lake region

水草种名 Specific name of macrophyte	金鱼藻 <i>Ceratophyllum oryzetoru</i>	黄丝草 <i>Potamogeton cris</i>	聚草 <i>Myriophyllum spicat</i>	苦草 <i>Vallisneria spira</i>
年生产量(g 湿重/ m^2) Annual production(g wet weight/ m^2)	61.5	5281.875	362.5	346.875

从中可以看出黄丝草是主体湖的绝对优势种,而且其年产量较大。将总的水草年生产量转化成干重则每平方米有 576.45g 干物质,即每年在每平方米的面积中有约 288g 的碳进入大型植物的碳库。每年仅在主体湖约有 7690t 碳被水草固定过。因此大型水生植物是一个很大的碳库。

2.5 大型植物在保安湖生态系统碳循环中的作用

已经知道大型植物的分解速率依赖几个环境因子,尤其是温度、氧浓度和氮浓度。从

生态系统的观点来看,其分解的重要效应在于溶解性有机物质的释放,脱氧作用,沉积物的增长。溶解性有机碳的释放很快,尤其在大型水生植物的分解早期阶段。分解中的大部分物质为周围细菌所利用,并且很快地周转。但木质化的成份则周转很慢,这对周围的浮游植物会产生一定的影响。分解中的大型水生植物需要消耗大量的溶解氧,因此极可能在这些衰亡的大型植物占据的地区产生局部的缺氧现象。这对于沉积物和衰亡植物中的营养再循环具有一定的效应。随着分解的进行,大型水生植物的分解速率下降,这主要是由于难分解物质在其中的比例愈来愈大的缘故。从分解实验得到单位体积水中单位质量的水草(g/L)与分解物质产量之间的关系,列于表 7。

表 7 单位体积水中单位质量的水草(g/L)分解产生的物质

Tab. 7 The weight of matter produced from macrophyte decomposition in a liter water

指标 Some Indices	总磷(mg/L) TP	总氮(mg/L) TN	总碳(ppm) TC	DOC(ppm)	POC(ppm)
浓度值 Concentration	0.3906	16.9743	38.353	31.999	6.354

根据表 7 和保安湖扁担塘的水草生物量的变动可列成得到表 8。从表 8 可以看出水草分解产生的溶解性有机碳 DOC 的在分解产生的总碳中有较大的比例。应该说其对湖水中的溶解性有机碳 DOC 的影响也较大,但由于藻类和细菌的作用(将 DOC 迅速的转化为自身的物质),使湖水的溶解性有机碳 DOC 值的变化不大。而分解产生的颗粒有机碳和湖中 POC 相比,其值较小,作用也不明显。因此可以说大型水生植物群落地段是颗粒物质的汇聚点,是溶解性有机碳的来源。关于大型植物对于碳循环的影响评价应考虑研究的时空尺度范围,在其生长期,它们是颗粒性有机物的汇聚点,但在衰亡期则成为颗粒性有机物的来源。由于大型植物固定的碳中 95% 以上是从根部进入体内的,因此在年度规模上,大型植物群落地段是颗粒性有机物和溶解性有机碳的净来源^[12]。另一个要考虑的因素是大型植物的取食和人为干扰(打草等)。对大型植物的取食者是一些草食性鱼类和螺类。因此这些取食者对于大型水生植物的营养周转及数量,以及进入沿岸带碎屑库的衰亡大型植物的生物量有一定的影响。以往的研究表明这些取食者对大型水生植物的利用率较小,为 5~10% 左右^[13~15]。但当地渔民打草所带来的影响无法准确估计。

表 8 扁担塘水草分解对湖水的影响(1996)

Tab. 8 the influence of macrophyte decomposition to water of Biandantang district in 1996

月份 Month	单位体积水草 生物量的减少值 (g/L) Decrease of macrophyte biomass per volume	分解产生 DOC 理论值(ppm) Theoretic value of DOC by decomposition	实测湖水中 DOC(ppm) True value of DOC of the lake	分解产生 POC 理论值(ppm) Theoretic value of POC by decomposition	实测湖水中 POC(ppm) True value of POC of the lake	分解产生的总 碳(ppm) Total carbon by decomposition	实测湖水体 总碳(ppm) True value of total carbon of the lake
6	—	—	9.1	—	4.5	—	13.6
7	0.031307	1.001787	10.1	0.198924	7.9	1.20071	17.78885
8	—	—	10.5	—	5.9	—	17.5724
9	0.08647	2.766968	12.5	0.549433	7.8	3.3164	19.71679
10	0.233319	7.465982	9	1.48251	4.1	8.94849	11.52636

注: — 表示水草的生物量在增长, 所以无法推算各理论值

2.6 运用地统计学和分形几何学对全湖尺度下的大型水生植物中的总碳含量格局进行分析

大型水生植物是生产者,它们将碳固定下来,同时又将部分固定的碳以有机碳的形式释放,所以作出水生植物中总碳的全湖分布图对于了解全湖尺度下的碳固定和释放有积极的意义。

将得到的野外和实验室数据汇总并输入计算机,应用等值线软件 WIN-SURFER 和自编的分形维数的计算软件进行处理。得到各月的大型水生植物中碳量浓度二维格局分布图(图 1)。由于九月的浓度比其它各月明显高,所以它的浓度尺度不同于其它几个月的浓度尺度。将各月的特征浓度值范围对应的轮廓图提取出来,用自编的软件将其转化成对应于该浓度下的分维值(计盒维数)。最后将结果用统计软件作图,得到图 2。

从图 1,可直观地看到保安湖大型水生植物中碳浓度的逐月变动及其变动的方向。碳量的各月最大浓度变动在 $39 - 160\text{g/m}^2$ 之间。而且最大浓度的发生区域也从桥墩湖转移到主体湖区。九月时生

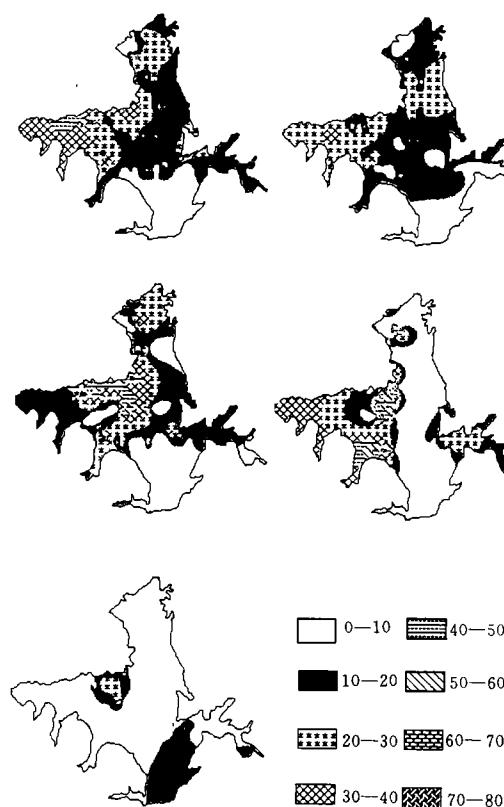


图 1 由 Krige 插值法计算得到的各月大型水生植物中碳量浓度二维格局分布图(g/m^2)

Fig. 1 The pattern of carbon concentration in macrophytes of Baoan Lake by Kriging from Jun. to Oct. in 1996 (g/m^2)

物量达到最大值,故其中的碳量也达到最大值。桥墩湖和主体湖区交界的区域是大型水生植物生物量最高的区域。但随着时间的推移,其区域范围有不断缩小趋势。将上面的各图中的特征浓度轮廓图提取出来,并用自编的软件分析得到图 2。

从图 2 可知浓度范围对应的分维值基本上随浓度的上升而下降,到一定浓度后,有一个急速的跌落;但也有个别的情况不是如此。各月的总碳优势浓度也各不相同。六月的 $0 - 40\text{g/m}^2$ 浓度占有较大的优势;七月的 $0 - 30\text{g/m}^2$ 浓度占有较大的优势;八月的 $0 - 40\text{g/m}^2$ 浓度占有较

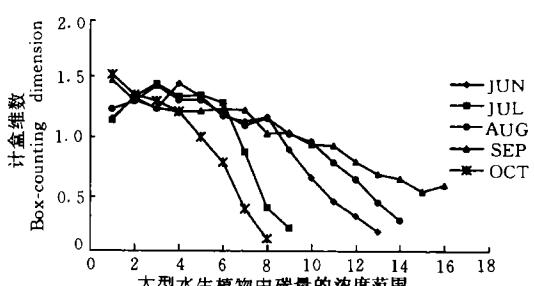


图 2 1996 年 6—10 月大型水生植物中碳量的不同浓度范围(g/m^2)轮廓图的计盒维数

Fig. 2 The Box - counting dimension of images corresponding to different carbon concentration spans in macrophyte of Baoan Lake from June to October in 1996 (g/m^2)

*图上的 x 轴的 1 表示碳量范围为 $0 - 5\text{g/m}^2$, 2 表示 $5 - 10\text{g/m}^2$, 依次类推。y 轴表示对应于各碳量范围的分维。

大的优势;九月的 $0-45\text{g}/\text{m}^2$ 浓度占有较大的优势,十月的 $0-25\text{g}/\text{m}^2$ 浓度占有较大的优势。值得注意的是,对应于 $0-5\text{g}/\text{m}^2$ 范围的分维值随着时间的推移不断增加,表明其占有空间格局不断缩小;同时对应 $5-10\text{g}/\text{m}^2$ 的各月的分维值基本相同,但是愈往高浓度方向,各个月份对应的分维值就愈有分化的趋势。根据以上的分析,对保安湖的大型水生植物在碳循环中的动态作用就会有一个定量的概念。

3 讨论

从速度常数 K 的平均值来看,四种水草都是属于快组。从 K 的变化来看,其值有逐渐减小的趋势。除金鱼藻外,其它三种水草的分解产物和时间及分解时的温度都有较好的对数关系($p<0.05$)。大型水生植物是一个很大的碳库,每年在每平方米的面积里有约 288 克的碳进入大型植物的碳库。在生长期,大型水生植物是颗粒性有机物的汇聚点,但在衰亡期则成为颗粒性有机物的来源。在年度规模上,大型植物群落地段是颗粒性有机物和溶解性有机碳的净来源。对于大型水生植物的分解需要作进一步调查,主要是对沉积速率进行野外测定,估计大型植物的分解产生的沉积可了解对于湖盆形态会产生多大影响和由此产生的湖泊演替方向。通过对大型水生植物中的总碳的全湖尺度上分布的探讨,以及对不同浓度的分形维数的分析,可以对其在保安湖的碳循环中的作用有了进一步的了解。应该对全湖其它生物类群在碳循环中的作用进行较好的评价,如藻类和光合细菌等。关于生长的水生植物的含碳物质释放对于水体以及其与附生植物或动物的相互影响的研究也需要进一步加强,这将有助于对整个生态系统碳循环过程的认识。

参考文献:

- [1] 金刚. 梁子湖、牛山湖和保安湖沉水植被资源现状[J]. 水生生物学报, 1999, 23(1):87—89
- [2] 蔡庆华, 赵斌, 潘文斌. 芦苇生长格局分形特征的初步研究[J]. 水生生物学报, 1998, 22(2):123—127
- [3] 邓红兵, 周永斌, 王庆礼, 等. 三峡库区次生柏木林中物种分布格局的分形特征[J]. 应用生态学报 1999, 10(5): 518—520
- [4] 纪发华, 熊琦华, 张一伟, 等. 地质统计学在油藏描述中的应用[C]. 北京:石油大学出版社, 1992
- [5] 祖元刚, 马克明, 张喜军. 植被空间异质性的分形分析方法[J]. 生态学报, 1997, 17(3):333—337
- [6] Burrough P A. Fractal dimensions of landscapes and other environmental data [J]. Nature, 1981, 294:240—242
- [7] Mandelbrot B. B. The Fractal Geometry of Nature [M]. NY: W. H. Freeman, 1982
- [8] Morse D. R, et al. Fractal dimension of vegetation and the distribution of arthropod body lengths [J]. Nature 1985, 314:731—733
- [9] 黄真理, 常剑波. 鱼类体长与体重关系中的分形特征[J]. 水生生物学报, 1999, 23(4):330—336
- [10] 林婉莲, 刘鑫洲. 武汉东湖浮游植物各种成份分析与沉淀物中浮游植物活体碳、氮、磷的测定[J]. 水生生物学报, 1985, 9(4):359—364
- [11] 刘建康. 东湖生态学研究(一)[M]. 北京:科学出版社, 1990
- [12] 李伟, 钟杨. 水生植被研究的理论与方法[M]. 武汉:华中师范大学出版社, 1992
- [13] 胡传林, 黄祥飞. 保安湖渔业生态和渔业开发技术研究文集[C]. 北京:科学出版社, 1991
- [14] 陈宜瑜, 许蕴环, 陈受忠. 洪湖水生生物及其资源开发[M]. 北京:科学出版社, 1995
- [15] 梁彦龄, 刘伙泉. 草型湖泊资源、环境与渔业生态学管理(一)[M]. 北京:科学出版社, 1995

THE FUNCTION OF THE MACROPHYTE IN THE CARBON CIRCULATION OF BAOAN LAKE

PAN Wen-bin and CAI Qing-hua

(*Institute of Hydrobiology, The Chinese Academy of Sciences; State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology, Wuhan 430072*)

Abstract: By carrying out the macrophyte biomass investigation in 1996, we got the annual production of dominated species in Baoan Lake. The Decomposition experiment of dominated species had been done in the lab. On the basis of considering carbonaceous content in the dominated species and the dynamic of DOC and POC in the water, we elucidated the function of macrophyte in the carbon circulation of Baoan Lake. We also use the fractal geometry and geostatistical analysis to study the pattern of carbon in the macrophyte on a lake scale.

Key words: Macrophyte; Baoan Lake; Carbon circulation; Production, Decomposition; Fractal geometry; Fractal pattern