

长江中游若干湖泊水生植物体内 C、N、P 及 $\delta^{13}\text{C}$ 分布

黄亮¹⁾ 吴莹¹⁾ 张经^{1,2)} 李伟³⁾ 周菊珍¹⁾ P33 A

(1)华东师范大学河口海岸国家重点实验室,上海,200062;

2)青岛海洋大学化学化工学院,山东 青岛,266003;3)中国科学院武汉植物研究所,湖北 武汉,430074)

摘要 本文就长江中游9个湖泊10种水生植物的C、N、P和稳定C同位素进行了测定,水生植物C元素的平均含量为 $33.2 \pm 5.46\%$,N、P分别为 $1.58 \pm 0.90\%$ 和 $0.30 \pm 0.13\%$, $\delta^{13}\text{C}$ 组成变化在 -27.91% — -17.16% 之间。从水生植物的生长区域来看,叶子中的C、N和 $\delta^{13}\text{C}$ 值与其所处的水环境有密切的关系。对于沉水植物,由于受到无机碳的限制,其叶子中C和N含量显著低于挺水植物及浮水植物;而同时由于水体中无机碳 $\delta^{13}\text{C}$ 组成较高,使得沉水植物叶子的 $\delta^{13}\text{C}$ 大于挺水植物和浮水植物。

关键词 长江中游 水生植物 营养元素 稳定C同位素

Distribution of C, N, P and $\delta^{13}\text{C}$ in Aquatic Plants of Some Lakes in the Middle Yangtze Valley

HUANG Liang¹⁾ WU Ying¹⁾ ZHANG Jing^{1,2)} LI Wei³⁾ ZHOU Juzhen¹⁾

(1)State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai, 200062;

2) College of Chemistry and Chemical Engineering, Qingdao University of Oceanography, Qingdao, Shandong, 266003;

3) Wuhan Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei, 430074)

Abstract An analysis of three sorts of elements(C, N, P) in ten kinds of aquatic plants from nine lakes in the middle Yangtze valley reveals that the concentrations of C, N and $\delta^{13}\text{C}$ in leaves of aquatic macrophytes depend on their living environment. The concentrations of C and N in leaves of submerged macrophytes are significantly lower than those of leaves from floating and emergent macrophytes due to the limitation of inorganic carbon. In addition, as the concentration of $\delta^{13}\text{C}$ in organic carbon of water is higher than that of CO_2 in air, the $\delta^{13}\text{C}$ concentration of leaves of submerged macrophytes is higher than that of leaves of floating and emergent macrophytes.

Key words middle Yangtze valley aquatic macrophytes nutrient elements stable carbon isotopic composition

生活在浅水湖泊中的水生植物,作为湖泊生态系统的-一个重要组成部分和主要的初级生产者之一,对湖泊生态系统的物质和能量的循环起着重要的作用(Blindow等,1993),水生植物的生长会固定水中各种溶解性、悬浮性和沉积性的营养物,降低营养物的周转,所以很多人认为水生植物是很好的治理湖泊富营养化的工具(乔建荣等,1996;吴振斌等,2001)。水生高等植物在典型的草型湖泊中的分布通常呈现3个同心环湖的带,由沿岸向湖心依次为挺水植物带、浮水植物带和沉水植物带。三类植物分别处在不同的水环境中,迫使它们的组织向不同

的方向进化,以适应各自的环境。沉水植物叶子的叶肉组织无海绵和栅栏组织的分化,通气组织发达;浮水植物漂浮在水面,一般成针形或丝状(初敬华等,2001)。

C、N和P三元素是植物生命活动中不可缺少的重要元素,其组成反映植物的生长特点,也是生长环境的写照,因而植物的元素组成是植物分类的重要依据(McJannet等,1995)。遗传因素和环境因子同时决定了植物稳定C同位素组成,因而通过对植物叶子中稳定C同位素的测定,可以反映植物碳代谢的基本类型(O'Leary,1981),植物与环境的基本

本文由国家重点基础研究项目(G1999043705)、教育部骨干教师资助项目、中国科学院“百人计划”项目和上海市重点学科资助。

责任编辑:宫月萱。

第一作者:黄亮,男,1978年生,硕士研究生,主要研究海洋生物地球化学;E-mail:huangliang2002@hotmail.com。

关系(冯虎元等,2000)。Brooks 等人测定了北半球生态系统中的优势种的 C 同位素组成,主要以下列顺序排列:常绿林<落叶林=常绿灌木=落叶灌木=常绿草本植物<落叶草本植物=苔藓(Brooks 等,1997)。

到目前为止,关于湖泊水生植物元素及稳定 C 同位素分布国内很少见到报道,林清等(2001)分析了沉水植物龙须眼子菜(*Potamogeton pectinatus*)与环境之间的关系;陆毅凤等(2001)对贵州草海湖泊系统的研究表明,水生植物的光合-呼吸作用和有机质的降解对整个湖泊体系的稳定 C 同位素组成具有决定性作用,但是对于长江流域附近的湖泊水生植物的元素特征并没有见到报道。笔者测定了长江中游 9 个湖泊水生植物体内 C、N、P 及 $\delta^{13}\text{C}$ 组成,探讨这些元素在水生植物中分布以及与所处水环境的关系。

1 取样与分析

湖北省武湖、太白湖、梁子湖、长湖、斧头湖、西凉湖、涨度湖,江西省赤湖以及位于湖北安徽交界的龙感湖均位于长江中游(图 1),芦苇、苦草、菱等水生植物是这个区域的优势种。2000 年 7~9 月间笔者在武湖、太白湖、梁子湖、长湖、斧头湖、西凉湖、涨度湖、赤湖和龙感湖采集了 10 种水生植物(表 1)。

将采来的植物清洗干净,风干,放入塑料袋中,带回实验室后将根、茎、叶分开。放入烘箱中在 70℃ 下干燥后,粉碎,混合均匀。样品经无机酸淋洗对无机碳进行清除,然后在 Carlo Erba 元素分析仪上测定 C 和 N 含量;同位素的测定在 Finnigan MAT 公司 DELTAplus/XL 型稳定同位素比值质谱计上进行,C 同位素以 PDB 国际标准报道,实验室的测



图 1 采样湖泊位置

Fig. 1 Location of sampling

表 1 采样湖泊与所采水生植物

Table 1 The sampling lakes and sampled aquatic macrophytes

湖泊	样品名称
涨度湖	菱(<i>Trapa bispinosa</i>)
长湖	竹叶眼子菜(<i>P. malaianus</i>)、微齿眼子菜(<i>P. maackianus</i>)、苦草(<i>Hydrilla verticillata</i>)、菰(<i>Zizania latifolia</i>)、鳊齿眼子菜(<i>P. pectinatus</i>)
斧头湖	菱(<i>Trapa bispinosa</i>)、菰(<i>Zizania latifolia</i>)
武湖	菱(<i>Trapa bispinosa</i>)
西凉湖	芦苇(<i>Phragmites communis</i>)
太白湖	苦草(<i>Hydrilla verticillata</i>)
梁子湖	苦草(<i>Vallisneria spiralis</i>)、金鱼藻(<i>Ceratophyllum demersum</i>)、黑藻(<i>Hydrilla verticillata</i>)
赤湖	微齿眼子菜(<i>P. maackianus</i>)
龙感湖	菰(<i>Zizania latifolia</i>)、苦草(<i>Hydrilla verticillata</i>)、黑藻(<i>Hydrilla verticillata</i>)

定精度是 $\pm 0.2\%$ 。准确称取样品,用 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ 混酸消化后,在 ICP-AES 上测定 P 的含量,回收率在 85% 以上。

2 分析结果

为便于研究,将不同湖泊同种植物归为一类做平均,如表 2 所示,在水生植物各组织中,C 元素占到植物干重的 1/3 以上,平均含量为 $33.2 \pm 5.46\%$; 营养元素 N、P 在植物含量很低,分别为 $1.58 \pm 0.90\%$ 和 $0.30 \pm 0.13\%$ 。从水生植物的生长区域来看,叶子中 C 元素的含量按下列顺序排列:挺水植物>浮水植物>沉水植物,N 元素也有类似的顺序,但是 P 元素无明显的规律。对挺水植物和浮水植物来说,叶子中 C 和 N 元素的含量要高于茎和根,如芦苇的叶子和茎中 C 元素相差 5%; 而沉水植物却有所不同,叶子中 C 元素的含量却低于茎、根的元素含量,除了金鱼藻以外;氮元素依然为叶子中浓度最高。从有限的几种植物来看,P 在根部的浓度更高。从水生植物的生长区域来看,叶子中 C 元素的含量按下列顺序排列:挺水植物>浮水植物>沉水植物,N 元素也有类似的顺序,但是 P 元素无明显的规律。

表 3 显示了 7 种水生植物叶子的 $\delta^{13}\text{C}$ 组成情况。从分析的结果看,这些水生植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 组成变化在 -27.9% ~ -17.2% 之间,平均值为 -22.4% ,其中黑藻的 $\delta^{13}\text{C}$ 值最大,菰的 $\delta^{13}\text{C}$ 值最小;并且,沉水植物(4 种)的 $\delta^{13}\text{C}$ 值平均为 $-20.1 \pm 2.28\%$,挺水植物和浮水植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值相近,平均为

表 2 水生植物各组织 C、N 和 P 的分布特征
Table 2 Distribution of carbon, nitrogen and phosphorus in every tissue of aquatic macrophytes

类型	名称	部位	C/%	N/%	P/%
挺水植物	菰	叶	39.06 ± 2.53	2.03 ± 0.59	0.19 ± 0.05
		黄实	34.4	2.10	0.35
	芦苇	叶	41.67	2.77	0.21
		叶	36.49	0.43	0.17
浮水植物	菱	叶	35.47 ± 1.72	1.84 ± 0.04	0.22 ± 0.06
		茎	29.52 ± 4.43	1.18 ± 0.39	0.25 ± 0.11
		根	29.87 ± 0.49	1.50 ± 0.45	0.33 ± 0.13
沉水植物	鳊眼子菜	叶	31.67	1.74	0.53
		叶	30.06 ± 0.84	1.29 ± 1.20	0.44 ± 0.13
	黑藻	茎	30.45 ± 0.87	0.99 ± 0.74	0.32 ± 0.11
		根	31.24 ± 3.01	1.20 ± 0.26	n. d.
	金鱼藻	叶	35.61	1.07	0.40
		茎	34.39	0.50	0.52
	苦草	根	30.50	0.39	0.51
		叶	30.22 ± 1.66	1.82 ± 1.04	0.42 ± 0.15
	微齿眼子菜	叶	33.40 ± 7.78	1.68 ± 0.47	0.18 ± 0.02
		茎	35.08 ± 0.22	1.52 ± 0.65	0.23 ± 0.10
竹叶眼子菜	叶	35.30	1.92	0.21	
	茎	36.18	1.50	0.21	

注:n. d. 代表由于样品量不足,未测定

表 3 7 种水生植物叶子中 C、N、P 和 $\delta^{13}\text{C}$ 组成
Table 3 Composition of carbon, nitrogen, phosphorus and $\delta^{13}\text{C}$ in leaves of seven aquatic macrophytes

湖泊	植物	C/%	N/%	P/%	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$
长湖	菰	40.45	2.68	0.14	-27.91
斧头湖	黄实	34.44	2.10	0.35	-24.37
涨渡湖	菱	35.47	1.53	0.27	-24.29
长湖	苦草	31.15	2.74	0.43	-22.32
长湖	鳊眼子菜	31.67	1.74	0.53	-19.59
梁子湖	金鱼藻	35.61	1.07	0.40	-21.44
梁子湖	黑藻	29.46	0.44	0.34	-17.16

-25.52 ± 2.07‰。沉水植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 要显著大于挺水植物和浮水植物(P 小于 0.05)。和文献相比,水生植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值一般在 -11‰ ~ -50‰ (Keely 等, 1992), 长江中游这几个湖泊水生植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 都在这个范围之内,但是由于 9 个湖泊的气温、降雨量等环境因子基本相似,因此各个湖泊之间的差别不大。

3 讨论

3.1 叶子中 C 和 N 分布与环境的关系

C 元素占植物干物质重量的 30% ~ 40%, 属于含量最多的元素之一,同时植物体内与 C 元素结合的化合物占植物干物质重量的 90% 以上。在高等

植物中,光合作用固定 C 元素是植物体内主要的代谢过程之一(宋健民等,1998)。

浮水植物、挺水植物与沉水植物生长的环境是 2 个绝然不同的环境——前二者的叶子在水面之上,而后者生长在水面之下。由于 CO_2 在水中的扩散仅是在空气中的 10^{-4} , 而且浓度也比空气低(在 15 °C 为 6 μM)。因而对沉水植物来讲,水中 CO_2 的供给相对不足。大多数沉水植物不仅发育了良好的表面扩散边界层,而且还具有如 CAM 暗反应来固定无机碳、 C_4 过程增加对二氧化碳亲和力的体系或者能有效利用溶解 HCO_3^- 作为光合作用碳源的体系,这和挺水植物及浮水植物完全暴露在空气的生长环境有根本的不同(Madsen 等,1995)。总的来说,对于沉水植物来说,光合作用受无机碳的限制非常明显。这些导致了沉水植物叶子中的 C 含量显著低于浮水植物与挺水植物。

N 元素的代谢是植物的另一主要代谢过程。研究表明,在照光条件下,绿色植物叶绿体内 C、N 代谢同时进行,二者相互依赖相互制约,一方面,二者都要利用 C 代谢过程中缠身的有机碳和能量相互竞争;另一方面,由于 NO_2^- 为光合电子传递链提供了第二电子供体,因而有利于光反应的进行,但对 CO_2 同化有时则会有抑制作用(宋健民等,1998),因此,Field 等(1986)认为叶子中的 N 含量是光合速率良好的指示物。因而植物叶子中 C 和 N 含量之间存在显著的相关性(图 2)。而对于沉水植物来说,水体环境中无机碳的缺乏,限制了其光合反应,使之对 N 元素的同化大大下降。

3.2 水生植物叶子中 $\delta^{13}\text{C}$ 组成与环境的关系

一般说来,影响植物稳定 C 同位素组成除遗传因素外,生长环境的条件也会改变其 $\delta^{13}\text{C}$ 组成,主要包括 CO_2 的浓度等。 CO_2 是植物光合作用的原料,低浓度的 CO_2 是光合作用的限制因子,这时,植物细胞因 CO_2 供应不足来不及分馏重 C 同位素,从而使叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 增大(O'leary, 1981)。细胞间隙

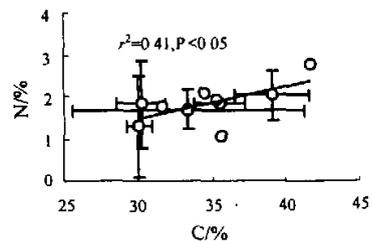


图 2 水生植物叶子中 C 和 N 关系
Fig. 2 The relationship between carbon and nitrogen concentrations in leaves of aquatic macrophytes

的 $\text{CO}_2(C_i)$ 和周围大气 $\text{CO}_2(C_a)$ 的浓度比 (C_i/C_a) 是反映植物气孔的开张程度、光合作用强度及其他过程的重要参数。Farquhar 等(1982)发现该比值与 C_3 植物稳定 C 同位素组成之间有如下关系:

$$\delta^{13}\text{C}_{\text{net}} = \delta^{13}\text{C}_a - a - (b - a) \frac{C_i}{C_a}$$

其中, $\delta^{13}\text{C}_{\text{net}}$ 为植物叶的稳定 C 同位素组成; $\delta^{13}\text{C}_a$ 为 CO_2 中的 $\delta^{13}\text{C}$ 值, 约为 -7.8‰ ; a 为气孔扩散二氧化碳时对 $\delta^{13}\text{C}$ 分馏作用, 约为 -4.4‰ ; b 为 RuBPCase 对 $\delta^{13}\text{C}$ 分馏值, 约为 -29‰ 。

暴露在大气中的挺水植物和浮水植物, 大气 CO_2 其中的 $\delta^{13}\text{C}$ 的是影响其组成的关键因素之一。一般说来大气 $\delta^{13}\text{C}$ 组成大约保持在 -7.8‰ 左右且变化不大, 因而挺水植物、浮水植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化较小。生长在水面以下的沉水植物, 其在进行光合作用时, 游离 CO_2 是最容易利用的碳源 (Winter, 1978)。由于水中主要存在的无机碳离子形态为 HCO_3^- , 游离 CO_2 低, 因而生长在其中的沉水植物可能会较多地利用 HCO_3^- (Sand-Jensen, 1983)。业已证明, HCO_3^- 比溶解 CO_2 更能富集 ^{13}C (Mook 等, 1974), 因此生长在水面以下的沉水植物比暴露在空气中的挺水植物及浮水植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 要高。并且由于沉水植物所处环境 $\delta^{13}\text{C}$ 组成变化极大, 这也可从沉水植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 看出, 林清等观察到龙须眼子菜的 $\delta^{13}\text{C}$ 为 $-22.07\text{‰} \sim -10.92\text{‰}$ (林清等, 2001)。

4 结论

生长在水面以下的沉水植物, 由于受无机碳的限制, 光合效率低下, 其叶子中 C 和 N 的含量均低于挺水植物和浮水植物。而同时水体中无机碳的 $\delta^{13}\text{C}$ 要高于空气, 其叶子中 $\delta^{13}\text{C}$ 反而要高于挺水植物和浮水植物。总而言之, 不同的生长环境, 不仅迫使其器官向适应环境的方向进化, 同时也反映在其元素组成上。

参考文献

- 陈毅风, 张军, 万国江. 2001. 贵州草海湖泊系统碳循环简单模式. 湖泊科学, 13(1): 15~19.
- 初敬华, 高晨光, 朱秋广等. 2001. 三种水生植物营养器官的比较解剖学研究. 松辽学刊(自然科学版), (2): 47~49.
- 冯虎元, 安黎哲, 王勋陵. 2000. 环境条件对植物稳定同位素组成的影响. 植物学通报, 17(4): 312~318.
- 林清, 王绍令. 2001. 沉水植物稳定同位素组成及影响因素分析. 生态学报, 21(5): 806~809.
- 金送笛, 李水涵, 倪彩虹. 1994. 菹草对水中氮、磷的吸收及若干影响因素. 生态学报, 14(2): 168~173.
- 乔建荣, 任长久, 陈艳卿等. 1996. 常见沉水植物对草海水体总磷去除速率的研究. 北京大学学报(自然科学版), 32(6): 785~789.
- 宋健民, 田纪春, 赵世杰. 1998. 植物光合作用碳和氮代谢之间的关系

- 及其调节. 植物生理学通讯, 34(3): 230~238.
- 吴振斌, 邱东茹, 贺峰等. 2001. 水生植物对富营养化水质净化作用研究. 武汉植物学研究, 19(4): 99~303.

References

- Blindow I, Andersson G, Haregy A et al. 1993. Long term pattern of alternative stable states in two shallow eutrophic lakes. Freshw Biol, 30(1): 159~167.
- Chen Yifeng, Zhang Jun, Wan Guojiang. 2001. A simple carbon cycle model of Lake Caohai, Guizhou province. Journal of lake science, 13(1): 15~19 (in Chinese with English abstract).
- Chu Jinghua, Gao Chenguang, Zhu Jiuguang et al. 2001. A contrast anatomy study of nutrient organs of three types of hydrophyte. Songliao Journal (Natural Science Edition), (2): 47~49 (in Chinese with English abstract).
- Farquhar G D, O'Leary M H, Berry J A. 1982. On the relationship between carbon isotope discrimination and the intercellular carbon dioxide concentration in leaves. Aust. J. Plant. Physiol, 9: 121~137.
- Feng Huyuan, An Lizhe, Wang Xunling. 2000. A review on effect of environment factors on stable carbon isotope composition in plants. Chinese Bulletin of Botany, 17(4): 312~318 (in Chinese with English abstract).
- Field C, Mooney H A. 1986. The photosynthesis-nitrogen relationship in wild plants. On The Economy of Plant Form and Function (Ed. T. J. Givnish), Cambridge University Press, Cambridge, 25~55.
- J R Brooks, L B Flanagan, N Buchmann et al. 1997. Carbon isotope composition of boreal plants: functional grouping of life forms. Oecologia, 110: 301~311.
- Jin Songdi, Li Yonghan, Ni Caihong et al. 1994. Uptake by Potamogeton Crispus of nitrogen and phosphorus from water and some affective factors. Acta Ecologica Sinica, 14(2): 168~173 (in Chinese).
- Keely J E, Sandquist D R. 1992. Carbon: Freshwater plants. Plant Cell Environment, 15: 1021~1035.
- Lin Qing, Wang Shaoling. 2001. The composition of stable carbon isotope and some influencing factors of submerged plant. Acta Ecologica Sinica, 21(5): 806~809 (in Chinese with English abstract).
- Madsen T V, Breinholt M. 1995. Effects of air contact on growth, inorganic carbon sources and nitrogen uptake in an amphibious freshwater macrophyte. Plant Physiology, 107: 149~154.
- Mejannet C L, Keddy P A, Pick F R. 1995. Nitrogen and phosphorus tissue concentrations in 41 wetland plants: a comparison across habitats and functional groups. Functional Ecology, 9: 231~238.
- Mook W G, Bommerson J G, Staverman W H. 1974. Carbon isotope fraction between dissolved bicarbonate and gaseous carbon dioxide. Earth and Planetary Science Letters, 22: 169~176.
- O'Leary M H. 1981. Carbon isotope fractionation in plants. Phytochemistry, 20: 553~566.
- Sand-Jensen K. 1983. Photosynthetic carbon source of stream macrophytes. Journal of Experimental Botany, 29: 1169~1172.
- Song Jianmin, Tian Jichun, Zhao Shijie. 1998. Relationship between carbon and nitrogen metabolism in plants and its regulations. Plant Physiology Communications, 34(3): 230~238 (in Chinese with English abstract).
- Tian Jichun, Wang Xuechen, Liu Guangtian. 2001. The coupling and regulation between photosynthesis and nitrogen, carbon metabolism in plant. Chinese Bulletin of life sciences, 13(4): 144~146.
- Winter L. 1978. Short-term fixation of ^{14}C Carbon by the submerged aquatic angiosperm Potamogeton pectinatus. Journal of Experimental Botany, 29: 1169~1172.
- Wu Zhenbin, Qiu Dongru, He feng et al. 2001. Studies on eutrophicated water quality improvement by means of aquatic macrophytes. Journal of Wuhan Botanical Research, 19(4): 299~303 (in Chinese with English abstract).