

洪湖生态环境的化学结构*

杨汉东 蔡述明

(中国科学院测量与地球物理研究所, 武汉, 430077)

X24

A

摘要 本文探讨了化学元素在洪湖水、植物、沉积物中的分布,在此基础上分析了水生植物对元素的吸收特征及元素在生态系统中的贮存和迁移规律。指出湖水中 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 是主要的阳离子和阴离子,湖水酸容能力在 $1.2 \times 10^{-3} \sim 2.0 \times 10^{-3} \text{mol/l H}^+$ 之间,水化学的稳定性受到碳酸盐地球化学平衡过程的控制;湖中水生植物具有富集 C、N、K、Ca 和 Cd 的性质,并导致这些元素在沉积物表层聚集;系统中 C 多存在于植物体中, N、P、K、Ca 和 Mg 多存在于沉积物中,沉积物分室是营养元素主要的贮存库。

关键词: 生态环境, 化学结构, 洪湖。

环境,

在生态系统中,生物与环境是相互依赖、相互联系、相互制约、互为因果的,其中化学结构是决定生态环境性质的关键部分,组成生态系统中生命亚系统及物质迁移、转化、再生与循环的物质基础,是生态系统发展变化的综合结果,研究生态环境的化学结构,有助于进一步认识系统中物质和能量循环交换的过程及系统中的生命物质,进而从宏观到微观,从定性到定量地认识和研究整个生态系统^[1],也有助于指导对生态系统中资源和环境的开发和利用。

江汉平原湖泊多,且多为浅水草型湖泊,是我国多种湿地类型的一种,这些湖泊所处的区域人类活动强度较大,湖泊环境资源的利用在很大程度上影响着区域经济的发展,洪湖在江汉平原的这类湖泊中具典型性。

本文拟对洪湖生态系统化学结构的特征,做初步研究。

1 研究方法

根据洪湖生态环境状况,在湖中有代表性选取 10 个取样点,按季节 4 次在这 10 个点位取水样和植物样,迅速测量水样 pH,水样中 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 用酸碱滴定法分析,有机碳含量通过分析化学耗氧量近似求出,总氮用凯氏法分析,其他各类氮、磷用光度法分析, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 用 EDTA 络合滴定法分析, K^+ 、 Na^+ 用火焰光度法分析,其他金属元素用 ICP-AES 法分析^[2]。植物取出后风干,尽量搓打干净植物上的附着物,将植物和附着物分别称重,用于分析。沉积物用 Russia 取样器取得,分样,根据沉积物的视觉状况,选取有代表性的湖心区洪 B 剖面和湖内偏东南缘的洪 A 剖面进行分析。植物、植物附着物和沉积物中 C、N 用 1129 型元素分析仪分析, K^+ 、 Na^+ 用火焰光度法分析,其他元素在 ICAP-9000 上用 ICP-AES 法分析^[3]。

植物的吸收系数为植物体中元素的含量与植物所取区沉积物表层(0—10cm)中该元素平均含量之比;沉积物中迁移系数为表层(0—5cm)沉积物中某元素含量与同剖面(55—60cm)沉

* 国家自然科学基金(49070060)和中国科学院重大资助(KY95-08-02)项目。工作中得到北京大学黄润华教授、闫育梅同志和本所陈世俭、任晓华等同志的帮助,谨此致谢。

收稿日期 1994 02 19,修改稿收到日期:1994 07 10。

积物该元素含量之比。

2 洪湖的水化学特征

2.1 湖水的离子组成

湖水的离子组成是湖内生物生存的基本条件。洪湖是一个半封闭型湖泊, 水量受人为的调控, 湖水离子组成也受到人为和自然因素的影响。

经过 1992 年夏、秋和 1993 年冬、春 4 季的周年调查, 湖水中 HCO_3^- 是主要的阴离子, 其变动范围在 50mg/l 至 130mg/l 之间, 均值为 84mg/l。 CO_3^{2-} 的变动范围为 0—44mg/l, 均值 20mg/l。 Cl^- 的浓度范围为 5—15mg/l, 但多在 11mg/l。 SO_4^{2-} 浓度变化在 4—22mg/l, 均值为 16mg/l, 季节变动较大。

Ca^{2+} 是湖水中主要阳离子, 浓度多在 23mg/l。其次为 Mg^{2+} , 浓度为 7—16mg/l, 均值 11mg/l。其他离子浓度的大小顺序为 $\text{Na} > \text{K} > \text{Fe} > \text{Al} > \text{Cu} > \text{Zn} > \text{Mn} > \text{Mo} > \text{Cd}$ 。由于水体中富含有机酸及还原条件较好, Zn 、 Cu 、 Mn 、 Mo 的溶解度增大, 其含量明显高于世界河水的平均值^[4]。

2.2 湖水的酸碱容纳能力

洪湖水体的 pH 值多数在 8.4—9 之间, pH 值主要受水体碳酸盐平衡体系的控制, 其值的变化既受湖泊系统内部因素如矿物的溶解和沉淀, 水生植物的生长等的影响, 也受外部因素的干扰, 如纳入江水, 上游区农业废水的排入等。若以 pH 值 6.5 和 8.5 为标准, 考察酸和碱的容纳能力, 可知洪湖湖水对碱的缓冲容量极小或无, 对酸的缓冲容量较大, 一般在 1.2×10^{-3} — $2.0 \times 10^{-3} \text{mol}/\text{H}^+$ 之间。洪湖生态系统中碳酸盐的沉积量较大, 大量沉水植物的生长可能促使重碳酸盐分解, 增强湖水碱度, 加大湖水酸的容纳能力。

2.3 湖水的化学稳定性

在碳酸盐型湖水中, 碳酸盐的沉淀和溶解过程控制了湖水的化学稳定性, 决定了湖水的溶解性和沉积性, 根据公式^[5,6]

$$\text{pH}_i = \text{p}K_{a_1} - \text{p}K_{s_0} + \text{p}[\text{Ca}^{2+}] + \text{p}[\text{HCO}_3^-] - \text{lg}r_{\text{Ca}^{2+}} - \text{lg}r_{\text{HCO}_3^-}$$

$$S = \text{pH}_i - \text{pH}_a$$

式中 K_{s_0} 为 CaCO_3 的溶度积, K_{a_1} 为 HCO_3^- 的离解平衡常数, $[\text{Ca}^{2+}]$ 、 $r_{\text{Ca}^{2+}}$ 和 $[\text{HCO}_3^-]$ 、 $r_{\text{HCO}_3^-}$ 分别为溶液中 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 的平衡浓度和活度系数, pH_i 为假想水与 CaCO_3 固体处于平衡状态时应具有的 pH 值, pH_a 为实际测出的 pH 值。

洪湖水体的化学稳定性指数 S 主要在 0.76—0.16 范围内, 即碳酸盐体系不稳定, 具中等程度的沉积性。

3 植物的化学特征

洪湖水位较低, 湖泊水深常维持在 2m 以下, 此区所在的江汉平原地处北亚热带, 为水生植物的生长提供了良好条件。洪湖水生植物繁多, 生物量大, 周年 4 次测量的平均现存量干重在 $0.5 \text{kg}/\text{m}^2$ 左右。由于该湖受人工干预影响较大, 近年来大量投放鱼苗及控制湖水水位, 水生植物的群落结构发生了一些变化, 1989 年以前, 全湖由挺水植物菰 (*Zizania caduciflora* Turcz) 和莲 (*Nelumbo nucifera* Gaern) 为优势种, 1990 年以来转变为以沉水植物微齿眼子菜 (*Potamogeton mauiannans* Benn)、光叶眼子菜 (*Potamogeton lucen*)、轮叶黑藻 (*Hydrilla Varticillata* Royle)、五刺金鱼藻 (*Ceratophyllum Oryzatorum* Kom)、聚草 (*Myriophyllum spicac-*

tum. L.)等为优势种,且各区植物群落构成不均匀。湖水中碳酸盐具有中等程度沉积性,表现在沉水植物的叶和茎上附有大量淀积和植物和分泌物所组成的附着物,其重量全湖平均约为 $90\text{g}/\text{m}^2$,标准偏差为40.8,即分布不均匀。洪湖优势植物附着物的化学元素含量列入表1。

表1 洪湖优势植物及植物所附物质的化学元素含量*

Table 1 Contents of chemical elements in dominant helophytes and the materials attached on the helophytes in Lake Honghu

植物 Helophyte	N	P	K	Na	Ca	Mg	Fe	Al	Mn	Mo	Cd	Cu	Zn
	(%)								(mg/kg)				
菰 <i>Zizania raduciflora</i> Turcz	0.836	0.12	1.82	0.57	0.81	0.45	0.254	0.014	2607	2.31	1.39	1.69	34.0
莲 <i>Nelumbo nucifera</i> Gaern	0.940	0.08	1.62	0.29	1.96	0.44	0.145	0.032	531	2.57	1.12	12.9	39.5
微齿眼子菜 <i>Potamogeton maakianus</i> Benn	2.325	0.14	1.53	0.79	1.92	0.39	0.320	0.227	957	2.07	1.01	10.6	33.9
光眼眼子菜 <i>Potamogeton</i> Lucen	1.852	0.12	5.05	0.68	1.65	0.33	0.023	0.022	102	0.95	0.23	6.65	29.8
轮叶黑藻 <i>Hydrilla verticillata</i> Royle	1.937	0.06	1.06	0.16	1.82	0.73	0.023	0.018	355	1.95	1.34	7.70	38.8
五刺金鱼藻 <i>Ceratophyllum oryzetorum</i> Kom	2.054	0.13	4.82	0.44	1.51	0.96	0.078	0.030	2323	1.75	1.41	10.5	42.3
聚草 <i>Myriophyllum spicatum</i> L.	1.956	0.15	1.42	0.75	1.71	0.34	0.039	0.020	417	1.89	2.00	6.44	83.1
附着物 Attached material	0.612	0.04	5.31	1.17	28.94	1.16	0.169	0.214	113	0.25	0.07	23.1	17.8

* 化学元素检测的回收率 reclamation > 95%

在洪湖优势种植物中,植物烧失量^[7]多在80%至90%之间,元素含量可排序为 $C > K > N \approx Ca > Mg \approx Na > P > Fe > Mn > Al > Zn > Cu > Mo > Cd$ 。与世界陆生植物中元素含量的文献^[8]值比较,洪湖水生植物中N、K、Na、Ca和Mg含量较高,其中N、K和Na与侯学煜的结果^[9]相同,也证实了沼泽植物富集K的结论,而Ca的高含量可能与洪湖水体中钙质碳酸盐的淀积有关。Mo、Cd、Cu、Zn的含量低于世界陆生植物的平均值,其他元素与平均值相近。洪湖水生植物的元素组成构型与我国北方沼泽植物的元素构型^[4]有较多相似之处,反映长江中游水生植物的元素构型。

在水生植物的叶和茎上形成的附着物中,Ca含量极其丰富,占其总量的近1/3,Mg的含量也较高,烧失量为16.1%,这些物质主要来自于水中碳酸盐的沉淀,其次为植物的分泌物。

4 元素在沉积物剖面中的分布

元素在沉积物剖面中的分布,反映了沉积物所在区域生态环境的变化过程^[10]。洪湖各区域受自然及人为因素的影响,因而沉积物剖面也有一些变化,现以洪A、洪B两个典型剖面加以说明。

洪A:表层稀黄泥,有螺壳,含草屑,之下为一青泥层,有土壤团粒结构,可见些许尚未完全腐烂的稻壳,含螺壳,这是历史时期湖泊干涸垦殖留下的痕迹,此层以下又逐渐过渡到黄色沉积层。

洪B:表层为黑色淤泥层,含大量腐殖质及草屑,有螺壳,以下为青泥层,夹大量植物碎屑,再下逐渐过渡为黄泥夹青泥的互层。

有的区域 A 类与 B 类剖面表层或底层互有对方特征,只是 A 类剖面有人类垦殖过的痕迹。

洪湖剖面中 Eh、pH 因物质组成,氧化还原条件的差异,变化较复杂,元素在各剖面中的分布较一致,N、C、S、Ca、Mg、Mn 和 Cd 等元素含量一般随剖面加深而明显减少,其中 N、C、S 等主要富集在沉积物表层,可能与植物生长和外源输入有关,Ca、Mg 元素在剖面中的富集有渐变的过程,可能是植物生长及湖水相应碳酸盐沉淀的结果。P、Cr、Zn、Ni、Pb、V、Fe、K、Ti 等元素在剖面中基本上无明显的升降趋势,这与三江平原沼泽土壤中的分布特性不同^[4]。

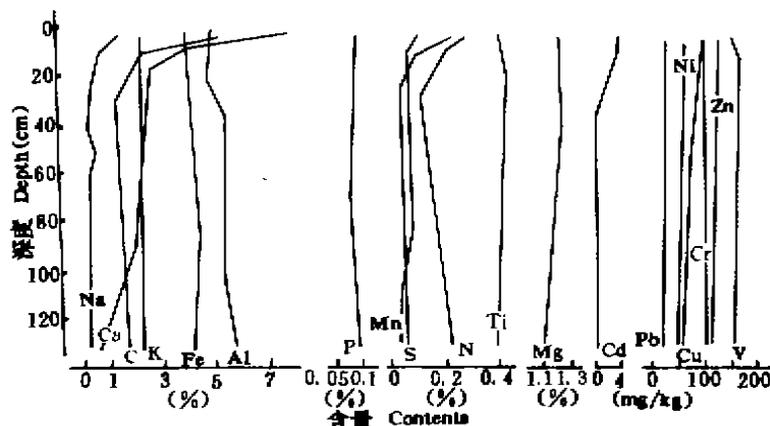


图 1 洪湖沉积物剖面中化学元素的分布

Fig. 1 Distribution of chemical elements in sediment profile in Lake Honghu

5 洪湖生态系统中元素迁移的特征

洪湖生态系统中基本的生物背景是水生植被,由于水生植物对不同元素的选择性吸收,因而在元素迁移过程中起了重要的作用,成为系统中物质循环的一个重要环节。

洪湖优势植物对沉积物表层(0—10cm)的平均植物吸收系数列入表 2。

沉积物表层(0—5cm)与深部(55—60cm)元素含量比(剖面迁移系数)列入表 3 中。

表 2 洪湖优势植物元素吸收序列

Table 2 An order of element assimilation coefficients of dominant helophytes in Lake Honghu

植物元素吸收系数 (Ax)				
Element assimilation coefficients of helophytes				
$\frac{n \times 10}{N, C}$	$\frac{n}{Cd, K, Mo, P}$	$\frac{n \times 10^{-1}}{Ca, Na, Mn, Mg, Cu, Zn}$	$\frac{n \times 10^{-2}}{Fe}$	$\frac{n \times 10^{-3}}{Al, Si}$

表 3 洪湖沉积物剖面中化学元素的迁移序列

Table 3 An order of element migration coefficients in sediment profile in Lake Honghu

植物元素迁移系数		
Element migration coefficients in sediment profile		
$\frac{n > 1}{Ca, S, C, Cd, N, Mn, Mg}$	$\frac{n = 1}{Cu, Ti, V, P, K, Na, Fe, Zn, Cr, Ni, Pb,}$	$\frac{n \times 10^{-1}}{Al}$

由表 2、表 3 可知,生物强烈吸收 N、C、Cd、K、Mo、Ca、P 等元素,由于植物对元素的选择性吸收,元素的分布发生了变化,沉积表层 N、C、Cd、Ca 等元素的含量增高,而 Al、Si、Fe、Cu 等元素的生物吸收系数较小,即被植物富集和迁移的能力较弱。Al 在植物大量生长的沉积物表层含量较小,就是因为植物对 Al 的吸收程度很弱,反映在剖面上,若大量植物持续生长,相应剖面 Al 的含量较低,这与武汉东湖沉积物剖面中 Al 的特征相同^[11]。值得指出的是 Ca 在湖内沉积物上部富集与湖区垦殖剖面上部 Ca 含量相对较高的机制是不同的^[12]。

沉积物中元素的特征决定植物的生长,不同的植物群落与不同的沉积物相适应。洪湖生态系统中沉积物、植物和水的化学元素含量分布特征如图 2 所示。

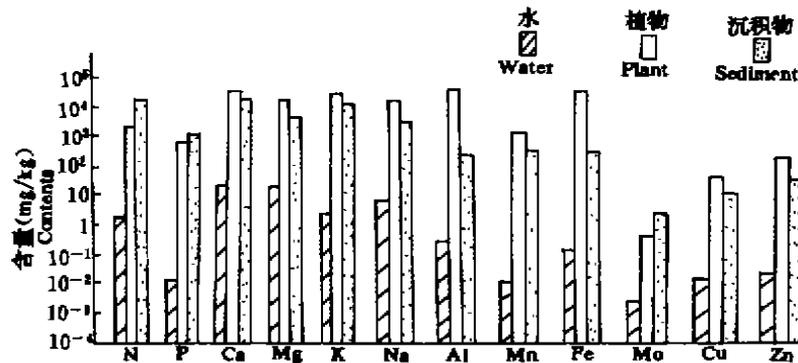


图 2 洪湖生态系统各组成成分中化学元素的分布特征

Fig. 2 Distribution of chemical element contents in some major components of ecological environment in Lake Honghu

1 水 Water, 2 植物 Plant, 3 沉积物 Sediment

图中显示出植物与水和沉积物中各种元素的组成比例有一定的差异,但具有显著的相似性,说明植物体的化学组成,主要取决于环境,即沉积物 and 水的化学组成,同时植物选择性吸收元素及满足自身的生理、生化需要。

若将洪湖生态系统划分为水生植物、水、沉积物和植物附着物 4 个分室,可考察化学物质,特别是营养物质在系统中各分室间的分配及系统的发育程度。表 4 列出 C、N、P、K、Na、Ca 和 Mg 在 4 个分室中的分布,其中沉积物分室为植物根系的主要发育层(0—15cm)的沉积物表层,水深平均为 1.5m。

通过分室间的比较,C 在植物中分配比例最大,为 54.7%,即大多数 C 分布在植物分室中,植物为 C 的主要贮存库,N 主要分布在沉积物分室,其次为植物分室,其他营养元素的绝大部分贮存在沉积物分室,沉积物在系统发育过程中作为主要贮存库,起着流通枢纽作用。

由于洪湖是一个注重渔业生产的半封闭湖泊,每年有大量营养元素随鱼的收获而移出,如 80 年代,每年的鱼产量多在 $3 \times 10^6 - 4 \times 10^6$ kg 之间。与湖相通的水流的输入和输出也对系统的化学结构产生影响,据调查分析,洪湖主要进水口之一子贝渊河 1992 年和 1993 年平均每年输入湖内的总氮、总磷分别为 240t 和 4600kg,主要出水口之一小港渠 1992 年和 1993 年平均每年输出总氮、总磷分别为 1948t 和 2500kg。

表 4 C、N、P、K、Na、Ca、Mg 在生态系统各分室中的含量
Table 4 Contents of C、N、P、K、Na、Ca、Mg in compartments in the ecosystem

分室 Compartments	C	N	P	K	Na	Ca	Mg
水 Water	$\frac{0.83^*}{0.2^{**}}$	$\frac{2.1}{1.2}$	$\frac{0.03}{0.04}$	$\frac{2.25}{0.1}$	$\frac{12}{1.2}$	$\frac{43.9}{1.3}$	$\frac{18}{1.7}$
植物 Helophyte	$\frac{246.5}{54.7}$	$\frac{9.5}{5.3}$	$\frac{0.5}{0.7}$	$\frac{9.0}{0.5}$	$\frac{2.25}{0.2}$	$\frac{9.5}{0.5}$	$\frac{2.5}{0.2}$
附着物 Attached material	$\frac{8.3}{1.8}$	$\frac{5.51}{0.3}$	$\frac{0.36}{0.05}$	$\frac{4.78}{0.2}$	$\frac{1.05}{0.1}$	$\frac{26.0}{0.8}$	$\frac{10.4}{0.1}$
沉积物 Sediment	$\frac{194.9}{43.3}$	$\frac{168}{93.2}$	$\frac{67.2}{99.2}$	$\frac{1848}{99.2}$	$\frac{1008}{98.5}$	$\frac{3360}{97.6}$	$\frac{1008}{98}$

* 分子为分室中绝对量。Numerator is absolute value in the compartment.

** 分母为占系统总量的百分数。Menominator is percentage accounting for the total of the ecosystem.

6 结论

6.1 洪湖水体中, Ca^{2+} 是主要的阳离子, HCO_3^- 是主要的阴离子, pH 值多大于 8。湖水属重碳酸盐水, 对酸的容纳能力较大, 其稳定性主要由碳酸盐的平衡过程控制, 且稳定性较差, 易于形成碳酸盐沉淀。

6.2 水生植物构成了洪湖主要的生物背景, 植物强烈吸收 C、N、K、Cd、Ca 等元素, 通过植物对元素的选择性吸收, 使元素发生迁移并在植物体中富集, 而 Al、Si 等的生物迁移能力则较弱。水生植物以其叶和茎的巨大有效表面, 附着大量来自水体中的钙质碳酸盐沉淀。

6.3 由于大量水生植物的生长及其对元素的迁移作用, 沉积物剖面中元素含量发生变化, C、N、S、Ca、Cd 等在沉积物表层富集。

6.4 营养元素中 C 多存在于植物体中, 其他元素如 N、P、K、Na、Ca、Mg 等多存在于沉积物中, 沉积物是系统中营养元素主要的贮存库。

参 考 文 献

- 1 黄锡畴等. 长白山自然保护区生态环境的化学结构. 地理学报, 1982, 37(1), 65—74
- 2 中国医学科学院卫生研究所. 水质分析法. 北京: 人民卫生出版社, 1974, 112—251
- 3 田晓姪. ICP-AES-化学联合测定岩石、土壤矿物质元素的含量. 分析测试技术与仪器, 1993, (3), 15—18
- 4 金泰龙. 三江平原沼泽生态环境的化学特征. 生态学报, 1987, 7(4), 289—296
- 5 张立成等. 长江水系河水的地球化学特征. 地理学报, 1992, 47(3), 220—232
- 6 Snoeyink V L 等著. 蒋展鹏等译. 水化学. 北京: 中国建筑工业出版社, 1990, 210—220
- 7 Stewart E A. *Chemical Analysis of Ecological Materials*. Blackwell Scientific Publications, 2th ed. 54
- 8 彭安等编. 环境生物无机化学. 北京: 北京大学出版社, 1991, 9
- 9 侯学煜著. 中国植被地理及优势植物化学成分. 北京: 科学出版社, 1982, 243—384
- 10 Forstner U. Metal concentration in recent lacustrine sediments. *Arch. Hydrobiol.*, 1977, 80(2), 172—191
- 11 杨汉东等. 武汉东湖沉积物的环境地球化学. 水生生物学报, 1994, 18(3), 208—214
- 12 杨汉东等. 洪湖里殖剖面的地球化学特征. 海洋与湖沼, 1995, 26(3), 269—274

THE CHEMICAL STRUCTURE OF THE ECOLOGICAL ENVIRONMENT IN LAKE HONGHU

Yang Handong Cai Shuming

(Institute of Geodesy and Geophysics, Academia Sinica, Wuhan, China, 430077)

Lake Honghu is a typical shallow lake and rich in aquatic plants in the middle reach of the Yangze River. It is an example of an important of type wetland in China. This paper reports on the chemical structure of the ecological environment in the lake. In the lake water, Ca^{2+} and HCO_3^- are major cation and anion, alkal capacity is rather low, acid capacity is $1.2 \times 10^{-3} - 2.0 \times 10^{-2} \text{ mol/l H}^+$. The equilibrium course of carbonates is the basic factor to control the geochemical process of water quality.

Aquatic plants in the lake play the role of concentrating C, N, K, Ca and Cd. The sediment profile of the surface is rich in C, N, S, Ca and Cd. The Al content is relatively low in the sediment although there were large amount of aquatic plants.

Most of the C exists in the aquatic plants and most of the N, P, K, Ca and Mg exist in the sediment. The sediment compartment serves as a nutrient reserve.

Key words: ecological environment, chemical structure, Lake Honghu.