

滇池水-植物系统金属元素的分布特征和相关性研究

余国营 张晓华 梁小民 徐小清

(中国科学院水生生物研究所, 武汉 430072)

摘要: 对滇池优势水生植物凤眼莲、旱生莲子草、红线草、聚草和茭草及其对应水环境中的 K、Na、Ca、Mg、Fe、Mn、Zn、Cu、Pb、Cd 进行了化学分析, 初步揭示了滇池水-植物系统金属元素的分布特征和相关性。结果表明, 滇池水域属 K、Ca、Mg、Fe 高背景生物地球化学区, 植物体内金属元素的含量, 既与植物种属特性有关, 又明显地受环境因素的影响, 植物对营养元素的吸收不一定与环境中相应元素的浓度呈简单的线性关系, 而对污染元素的吸收其线性关系非常显著。

关键词: 滇池, 水-植物系统, 金属元素, 生物地球化学特征

中图分类号: X131.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3207(2000)02-0172-06

滇池既担负着流域工农业生产和生活用水供应以及旅游观光、淡水养殖、航运、蓄洪和纳污等重要功能, 又是维持流域生态系统平衡的重要条件。近 20 年来, 由于滇池流域人口激增、工农业迅速发展, 导致大量污水流入, 滇池单位容积废水量达 $4 \times 10^{-5} \text{t/d}$, 同时, 又由于流域生态环境的破坏, 水土肥流失严重, 加速了滇池富营养化的进程。目前草海已严重富营养化, 外海 84% 的水域已达富营养化水平, 是我国城郊型湖泊的典型代表。本文拟对滇池生态系统优势水生植物和环境中金属元素的含量、分布及其相互关系进行研究, 揭示有机体与环境之间的物质交换过程及其相互关系, 为资源持续利用和水环境保护提供科学依据。

1 样品采集和分析

在水生植物分布相对集中的河口或湖湾处采集优势水生植物凤眼莲 [*Eichhornia crassipes*(Mart.) Solms]、旱生莲子草 (*Alternanthera philoxeroides* Griseb.)、红线草 (*Potamogeton pectinatus* L)、聚草 (*Myriophyllum spicatus* L) 和茭草 [*Zizania caduciflora* (Tucz.) H.-M] 样品。以植株为单位, 根、茎、叶混采, 多株混合, 每份样品 1—2kg。采集时间为 7 月份, 植物生长处于旺季, 同时采集水样。共采集植物样品 70 个, 水样 18 个。植物样品经 80℃ 烘干, 磨碎, 称重, 硝酸-高氯酸湿法消化, 去离子水定容, 用 PE-4100 型和 PE-503 型原子吸收分光光度计分别测定水样和植物样品中供试金属元素 K、Na、Ca、Mg、

收稿日期: 1998-10-05; 修订日期: 1999-09-16

基金项目: 中国科学院和云南省重大合作项目

作者简介: 余国营(1964—), 男, 博士, 河南商城人, 1997年入选中国科学院“百人计划”, 现任中科院长春地理所研究员, 博士生导师, 主要从事湿地过程与效应、湿地恢复与重建、湿地管理等研究

Fe、Mn、Zn、Cu、Pb、Cd 的含量。

2 结果与分析

2.1 植物体内金属元素的含量特征

从有限的样品中所获得的数据,具有一定的离散性和随机性,为此先用统计方法确定所测值的概率分布,然后计算植物体中各元素的含量。滇池 5 种优势水生植物金属元素的含量见表 1。Mg、Mn、Zn 为正态分布,Cu、Na 为偏正态分布,K、Ca、Fe、Cd、Pb 为对数正态分布。5 种植物中风眼莲和旱生莲子草均为富 K 植物,风眼莲 K 含量最高,旱生莲子草 Na

表1 滇池优势水生植物金属元素的含量(干重计)
Tab.1 The content of metals in the dominant hydrophytes in Lake Dianchi

元素 Elements	风眼莲 <i>E. crasspes</i>	旱生莲子草 <i>A. philoxeroides</i>	红线草 <i>P. pectinatus</i>	聚草 <i>M. spicatus</i>	茭草 <i>Z. caduciflora</i>
K(%)	0.41-9.43 ^①	0.91-8.85	0.31-1.66	0.41-2.81	0.32-1.52
	2.75±0.89 ^②	2.62±0.81	0.74±0.854	1.19±0.577	0.58±0.935
	56.1 ^③	53.1	40.4	47.1	44.1
Na(%)	0.12-1.22 ^①	0.31-1.02	0.07-0.26	0.16-0.84	0.21-0.84
	0.49±0.178 ^②	0.72±0.115	0.12±0.233	0.28±0.109	0.62±0.024
	62.2 ^③	27.4	42.86	17.93	27.9
Ca(%)	0.27-3.84 ^①	0.25-1.73	0.78-4.34	0.24-0.94	0.82-2.74
	1.51±1.025 ^②	0.54±0.961	1.46±1.02	0.34±0.998	1.15±0.687
	54.5 ^③	50.7	42.8	29.3	77.7
Mg(%)	0.07-0.69 ^①	0.07-0.82	0.09-0.77	0.11-0.82	0.03-0.33
	0.14±0.026 ^②	0.19±0.014	0.11±0.15	0.24±0.074	0.11±0.173
	22.03 ^③	23.37	50.01	49.96	51.34
Fe (mg/kg)	733.1-6919.4 ^①	897.6-9342.3	637.8-4481.8	1124.7-8432	237.6-1293.4
	1338.7±98.5 ^②	2504.6±392	1116±584	2345.1±362	456.7±77.6
	34.9 ^③	74.1	61	58.7	19.4
Mn (mg/kg)	299.1-1039.8 ^①	97.6-1794.1	383.5-1083.1	377.1-1937.8	247.1-674
	639.8±84.1 ^②	357.4±48.07	732.2±93.9	892.4±76.2	384.8±36.6
	28.8 ^③	17.6	22.5	30.8	42.2
Cu (mg/kg)	7.6-72.3 ^①	3.2-78.1	9.59-62.8	7.5-87.4	12.1-72.4
	17.84±3.16 ^②	21.4±3.04	24.3±3.26	27.5±10.46	26.1±9.35
	36.2 ^③	32.4	14.5	37.7	81
Zn (mg/kg)	16.4-166.2 ^①	44.2-150.4	36.4-120.5	23.3-111.4	21.4-101.8
	53.4±8.54 ^②	56.8±3.92	61.2±5.85	51.6±4.74	48.4±9.83
	21 ^③	13.2	53.2	25.7	34.3
Pb (mg/kg)	0.14-19.44 ^①	0.28-9.22	0.15-8.26	0.07-9.76	0.17-5.37
	2.4±0.29 ^②	0.84±0.63	2.14±0.52	1.04±0.38	1.44±0.39
	19.4 ^③	27.1	22.5	32.9	43.4
Cd (mg/kg)	18.2-1498 ^①	7.87-1292	17.8-113.4	11.8-119.8	7.53-84.2
	76.4±14.9 ^②	56.4±27.4	67.3±15.7	44.8±18.4	45.1±11.4
	32.3 ^③	36.4	19.7	24.5	9.7

①范围 Range; ②平均值 Mean; ③变异系数 Var. coefficient

含量最高,凤眼莲和红线草含 Ca 较多,Mg 和 Zn 的含量在 5 种植物中差异较小,旱生莲子草和聚草的 Fe 含量很高,是茭草的 5 倍多。Mn 的含量为茭草 > 红线草 > 凤眼莲 > 茭草、旱生莲子草,凤眼莲中 Cu 的含量较低,凤眼莲和红线草中的 Pb 和 Cd 含量较高。

从元素在植物体中的分布来看,金属元素在 5 种植物体内的分布顺序为 K > Ca > Na > Mg > Fe > Zn > Mn > Cu > Pb > Cd。其吸收积累遵循丰度原则,即当一种功能可以由两个或更多的实体来完成的情况下,生物体将利用含量更丰富、更易获得的那一种^[1]。滇池凤眼莲富钾已成为一个重要生物学特征,比其它地区凤眼莲高 1—4 倍,这可能与滇池流域烟草种植中大量施用钾肥与钾肥流失有关,富钾也可能是造成凤眼莲疯长的重要环境因子。关于植物体与环境中金属元素储量关系的研究将在后面讨论。

2.2 环境对植物体内金属元素分布的影响

植物体金属元素的含量,除植物种属特性外,还明显受环境因素的影响。生活在不同环境中的同种植物其元素积累量以及富集系数变化很大。表 2 和 3 分别列出了不同样点凤眼莲和旱生莲子草及相应水样金属元素的含量及富集系数,结果表明,滇池凤眼莲 Zn、Cu、Ca、Pb、Cd 的富集系数较大,旱生莲子草对 Na、Mg、Cu、Fe 的吸收富集能力较强。

表2 环境对凤眼莲吸收积累金属元素的影响(单位:植物样, mg/kg;
水样, mg/L, Zn、Cu、Pb、Cd为ug/L)
Tab. 2 The accumulation of metals in *Eichhornia crassipes*(Unit: mg/kg in plant samples;
mg/L in water and ug/L for Zn, Cd, Cu, Pb in water)

地点 Sample sites	K	Na	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn	Cu	Pb	Cd
大观河口	620.84 ^①	1193.1	46514.27	4714.3	531.83	383.57	36.43	42.8	1.83	0.17
Daguan River	21.35 ^②	23.41	30.61	21.26	1.12	0.87	11.27	2.89	0.14	1.11
Entrance	291.4 ^②	50.96	1519.57	221.7	474.8	440.88	3314	14837	16018	160.54
运粮河	53621.1 ^①	4458	18882.12	4447.16	824.36	413.77	46.28	37.24	2.12	0.43
Yunliang River	32.53 ^②	28.14	37.23	21.87	4.21	1.14	22.72	4.13	2.22	4.68
entrance	1732.6 ^②	158.42	863.38	203.35	195.8	362.96	2036.9	9016.5	954.96	93.6
草海中	32556.2 ^①	3980.4	31352.3	4607.6	674.6	337.6	49.03	30.43	0.89	0.11
Center in	21.17 ^②	15.55	31.69	21.48	0.44	0.16	7.42	3.68	1.36	0.08
Caohai Lake	1537.8 ^②	255.97	989.34	214.51	1533.18	2110.1	6607.82	8269.02	654.41	1414.25
盘龙江南坝	16516.3 ^①	5217.22	19838.3	1649.39	1969.28	639.77	164.86	120.64	1.94	0.12
South dam in	19.53 ^②	32.44	34.12	20.62	0.72	0.87	10.21	0.89	10.14	0.11
Panlong River	845.6 ^②	160.83	580.75	79.99	2735.11	735.37	16146.9	13555.1	1913.2	1103.2
白渔口	4069.8 ^①	1395.25	4784.05	787.88	838.76	299.01	16.38	60.02	1.79	0.11
Baiyukou	8.85 ^②	28.63	26.75	20.34	0.22	0.15	9.77	0.92	0.34	0.14
	459.9 ^②	48.73	178.84	38.74	3812.41	1993.4	1676.56	65239.1	5264.71	851.71
海口	23289.2 ^①	4329.16	21045.1	4328.72	817.37	1039.51	116.32	78.13	1.54	0.12
Extrance of	9.53 ^②	28.4	24.28	19.76	0.24	0.66	13.15	16.76	9.69	0.36
Dianchi Lake	2443.7 ^②	152.44	866.77	219.07	3405.71	1575.02	8845.6	4661.7	158.93	328.31

①植物样 plant samples; ②水样 Water samples; ③ 富集系数 Accumulation coefficient

表3 环境对旱生莲子草吸收积累金属元素的影响
(单位: 植物样, mg/kg; 水样, mg/L, Zn、Cu、Pb、Cd为ug/L)

Tab. 3 The accumulation of metals in *Alternanthea philoxeroides*(Unit: mg/kg in plant samples;
mg/L in water and ug/L for Zn, Cd, Cu, Pb in water)

地点 Sample sites	K	Na	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn	Cu	Pb	Cd
草海中	12024.1 ^①	4139.36	10398.06	921.2	1704.63	864.12	100.24	114.61	5.38	0.07
Center in	71.17 ^②	15.55	31.69	21.48	0.44	0.16	7.42	3.68	1.36	0.08
Caohai Lake	168.95 ^③	266.19	328.12	42.88	3874.16	5400.75	13509.4	31144	3955.8	983.75
盘龙江南坝	18904.05 ^①	11874.3	18692.7	2382.5	2230.7	279.5	217.31	181.2	155.7	0.18
South dam in	19.53 ^②	32.44	34.16	20.62	0.72	0.87	10.21	0.89	10.14	0.11
Panlong River	967.95 ^③	366.04	547.21	118.4	3098.19	321.26	21284.4	20359.5	15355	1678.5
白渔口	18088.79 ^①	5173.66	18958.6	1451.7	2416.98	1794.15	50.42	32.72	7.68	0.06
Baiyukou	8.85 ^②	28.63	26.35	20.34	0.22	0.15	9.77	0.92	0.34	0.14
	2043.93 ^③	180.71	708.73	71.37	10986.6	11961.1	5160.7	35565.2	2258.82	470
海口	21485.5 ^①	4914.5	16178.3	4213.5	1523.99	347.76	43.97	16.53	9.22	0.05
Extrance of	9.53 ^②	28.4	24.28	19.76	0.24	0.66	13.15	16.76	9.69	0.36
Dianchi Lake	2254.5 ^③	173.05	666.32	213.23	6349.96	526.91	33437.2	986.27	951.5	164.4

表中①—③的注解同表2

表4 凤眼莲体内金属含量与水环境中金属元素浓度间的相关性分析(R²)

Tab. 4 The correlation analysis between the content of metals in plant and that in water

水中元素 Metals in water	凤眼莲中金属元素含量 Content of metals in plant									
	K	Na	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn	Cu	Pb	Cd
K	0.7160**	0.0942	0.2586*	0.4829**	0.3567*	0.1496*	0.0135	0.3737*	0.0652	0.803**
Na	0.1493*	0.1097	0.5564**	0.58**	0.1947*	0.1740*	0.4978**	0.7411**	0.8147**	0.0226
Ca	0.5996**	0.3939**	0.1577*	0.1509*	0.3729*	0.19*	0.0026	0.011	0.112	0.6701**
Mg	0.5670**	0.0173	0.442**	0.4521**	0.7042**	0.4707**	0.4316**	0.6255**	0.0008	0.6585**
Fe	0.7588**	0.1574*	0.0044	0.3494*	0.4042*	0.0559	0.0426	0.3515*	0.5466**	0.6749**
Mn	0.3897*	0.3354*	0.2631*	0.3238*	0.0148	0.0680	0.3419*	0.0368	0.7226**	0.94**
Zn	0.7064**	0.0745	0.1532	0.1993*	0.0004	0.0079	0.0077	0.0427	0.6293**	0.2293*
Cu	0.1865*	0.0825	0.22*	0.4058**	0.8951**	0.7198**	0.0846	0.0036	0.0473	0.0143
Pb	0.2029*	0.4685**	0.0223	0.0759	0.6015**	0.8796**	0.4982**	0.0857	0.9357**	0.4324
Cd	0.6518**	0.1289	0.01	0.4512**	0.1748*	0.04	0.0749	0.41*	0.2945*	0.9965**

注: **—极显著相关 Very significovnt Correlation *—显著相关 Significant Correlation

为了更直接地说明植物吸收各金属元素与生长水体环境中金属元素的关系,对植物体内金属元素含量和水环境中元素浓度进行了相关分析(R²)分析,如表4所示。植物对某金属元素的吸收不一定与环境中的该元素的浓度呈正相关,而对Cd、Pb来说,主要决定于环境中的Cd、Pb浓度,同时也受共存元素的影响。对植物吸收积累各金属元素产生显著影响的大小顺序如下:

K: K > Fe > Zn > Cd > Ca > Mg > Mn Na: Pb > Cd > Mn > Ca > Fe > Na
Ca: Na > Mg > Mn > K > Ca > Zn Cu: Na > Mg > Cd > Na > K
Fe: Cu > Mg > Mn > K > Ca > Zn Mg: Na > K > Mg > Cu > Cd > Fe > Mn
Zn: Pb > Na > Mg > Mn Mn: Pb > Cu > Mg > Ca > Na > K
Pb: Pb > Na > Mn > Zn > Fe > Cd > Ca Cd: Cd > Mn > K > Fe > Ca > Pb > Zn

营养元素间的交互作用只有在植物营养学或植物生理学中有关胁迫生理中有所提及,但具体涉及到各元素的交互作用关系尚没有很多报道,对重金属元素来说,由于其研究目前已从单因子污染发展到多元素复合污染研究,如李元曾报道 Cd 和 Fe 的协同作用^[2],秦天才报道的 Cd 与 Pb 的协同作用^[3],余国营报道的 Zn 和 Cd 在低浓度时具有协同作用^[4]等在此试验中也得到验证。但交互作用的机理有待于进一步确认。

2.3 滇池水体金属元素的生物地球化学特征

滇池水体中 10 种金属元素含量分析的结果与国内外大多数湖泊水体比较,滇池中 K(13.53mg/L)、Ca(28.56mg/L)、Mg(20.30mg/L)、Fe(0.38mg/L)含量较高,构成滇池水化学组成的重要特征,即滇池 K、Ca、Mg、Fe 高背景水域。Zn、Mn、Cu 的含量分别为 9.82μg/L 和 34.3μg/L,接近水圈中这些元素的克拉克值(Zn-1、Mn-2、Cu-3μg/L)。对滇池整个水域来说,一些与人类活动关系密切的重金属,如 Cd、Pb、Zn 等都远低于美国 45 个湖泊中这些元素的平均含量,但滇池草海的个别水样中 Cd、Pb 已经严重超标,造成 Cd、Pb 污染。对滇池水体这些金属元素进行相关分析,与元素 K 明显相关的元素最多,包括 Na、Fe、Mn、Zn、Pb、Cd,其相关性为 Fe > Cd > Zn > Mn > Na > Pb,说明 K 对维持滇池水体环境化学特性有着十分重要的作用,K 与 Na、Pb 呈负相关,与 Fe、Mn、Zn、Cd 呈正相关;Cu 与各元素的相关关系均不显著;其它元素都分别与共存的一种或几种元素存在一定的相关度。

参 考 文 献

[1] 陈静生. 环境地球化学 [M]. 北京:海洋出版社,1990,256
[2] 李 元、王焕校、吴玉树. 镉、铁及其相互作用对烟草生理的影响 [J]. 环境科学学报,1990,10(4): 494—499
[3] 秦天才、吴玉树、王焕校. 镉、铅及其相互作用对小白菜氮代谢的影响 [J]. 生态学报,1995, 15(3): 284—290
[4] 余国营、吴玉树、王焕校. 不同化合形态镉及其与锌的交互作用对小麦生理的影响 [J]. 生态学报,1992,12(1): 92—96
[5] 黄锡畴. 长白山北坡植被生态环境的化学结构 [J]. 森林生态系统研究, 1980, (1): 60—66
[6] 黄锡畴论文选集编委会. 自然地理与环境研究——黄锡畴论文选集,北京:科学出版社,1996,130—136
[7] 吴玉树. 滇中高原三个湖泊(长湖、草甸湖、杞麓湖)水、底泥、生物体中元素含量分析 [J]. 云南大学学报,1988, 10(增刊): 19—27

BIOGEOCHEMICAL CHARACTERISTICS OF METAL ELEMENTS IN WATER-PLANT SYSTEM OF LAKE DIANCHI

YU Guo-ying, ZHANG Xiao-hua, LIANG Xiao-min and XU Xiao-qing

(Institute of Hydrobiology, The Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072)

Abstract: The content of K, Na, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, Cu, Pb and Cd were analysed in the dominant hydrophyte *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solm, *Alternanthera philoxeroides* Griseb., *Potamogeton pectinatus* L., *Myriophyllum spicatum* L., *Zizania caduciflora* (Tucz.) H.-M and in water samples in Lake Dianchi. Lake Dianchi is a biogeochemical zone with higher contents of K, Ca, Mg, Fe. The accumulation of metal elements in plant may be affected by the environmental factors. The absorption of elements might not be correlated with the corresponding nutrient elements but might directly with contaminants. Furthermore, the composition of the chemical elements of water-hydrophyte system in Lake Dianchi is significantly correlated.

Key words: Lake Dianchi; Water-hydrophyte system; Metal elements; Biogeochemical characteristics