

# 鱼体微量元素的生态化学特征研究\*

雷志洪 徐小清 惠嘉玉 邓冠强

(中国科学院水生生物研究所, 武汉 430072)

## 提 要

本文以16种鱼的16个元素含量和相应水环境中的元素含量的大量分析数据为基础, 分析了鱼体内微量元素的生态化学特征。结果表明, 鱼体内一些元素之间存在显著相关性, 且一种元素的含量能较好地用几种其它元素的回归方程表示。鱼体对微量元素有很强的富集作用, 12种微量元素在12种鱼体的平均富集系数(鱼体/过滤水)在79.2—21206之间, 文中比较了不同元素的富集水平, 以及不同鱼种的富集能力。鱼体和水中的微量元素之间存在显著相关性, 相关系数为0.9800。

**关键词** 鱼, 微量元素, 生态化学特征

在生物体内, 大多数的微量元素是必需的酶体系或其它具有生命功能蛋白质的关键成分, 其作用和存在特征在生命科学研究中占有重要地位。然而迄今为止, 人们对生物体内的微量元素的了解仍然非常有限。本文以大量的分析数据为基础, 企图从宏观的研究探讨鱼体一些主要微量元素的存在特征, 及其与水环境关系的生态化学规律。

### 1. 鱼体内元素含量及元素间的相关性

分析样品涉及长江、黄河、青海湖、澜沧江等水系, 包括16种鱼1242个样品。表1列出了16种鱼的名称、采样地点及分析的样品数。测定了16种元素, 其中包括生物体内主要的13种微量元素As、Cd、Cr、Co、Cu、F、Fe、Hg、Mn、Ni、Pb、Se和Zn, 以及三种常量元素Na、K和Mg, 所有15种金属为鱼肌肉中的含量, F取自鱼椎骨。分析结果见表2, 表中数据为各元素含量的平均值。

表1 采样鱼种、地区和样品量

Tab. 1 Species, regions and sample sizes of collected fishes

编号 Code	鱼 种 Species	采样地区 Region	样品数 Sample size
01	鲤 <i>Cyprinus carpio</i>	长江	925
02	铜鱼 <i>Coreius heterodon</i>	长江干流	30
03	齐口裂腹鱼 <i>Schizothorax prenanti</i>	大渡河	52
04	瓣结鱼 <i>Tor (Folifer) brevifilis brevifilis</i>	嘉陵江	1

\* 1991年12月22日收到。

续表 1

编号	鱼	种	采样地区	样品数
Code	Species		Region	Sample size
05	白甲鱼	<i>Varicorhinus sinus</i>	嘉陵江	3
06	中华裂腹鱼	<i>Schizothorax sinensis</i>	嘉陵江	21
07	松潘裸鲤	<i>Gymnocypris potanini</i>	松潘	5
08	嘉陵裸裂尻鱼	<i>Schizopygopsis kialingensis</i>	九寨沟	7
09	软刺裸裂尻鱼	<i>Schizopygopsis malacanthus</i>	长江源头	9
10	小头高原鱼	<i>Herzensteinia microcephalus</i>	长江源头	47
11	裸吻重唇鱼	<i>Diptychus</i> (Ptychobarbus) <i>kaznakovi</i>	长江源头	47
12	短须裂腹鱼	<i>Schizothorax wangchiachii</i>	长江源头	31
13	青海湖裸鲤	<i>Gymnocypris</i> (Gymn.) <i>przewalskii</i>	青海湖	30
14	花斑裸鲤	<i>Gymnocypris eckloni</i>	黄河源头	13
15	似鳉高原鳅	<i>Triplophysa</i> (T.) <i>siluroides</i>	黄河源头	4
16	澜沧江裂腹鱼	<i>Schizothorax</i> (Racoma) <i>lantsangensis</i>	澜沧江	17

表 2 不同鱼种鱼体内 16 种元素含量(mg / kg)

Tab. 2 The contents (mg / kg) of 16 elements in various species of fishes

	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16
As	0.357	0.127	0.197	0.299	0.341	0.281	0.420	0.238	0.675	0.718	0.425	0.521	0.496	0.182	0.185	0.251
Cd	0.021	0.005	0.016	0.003	0.038	0.013	0.006	0.054	0.011	0.003	0.014	0.010	0.021	0.012	0.007	0.006
Cr	0.046	0.023	0.051	0.050	0.047	0.064	0.045	0.040	0.039	0.040	0.042	0.037	0.050	0.036	0.010	0.037
Co	0.048	0.026	0.048	0.102	0.065	0.040	0.053	0.016	0.039	0.046	0.049	0.053	0.078	0.044	0.050	0.069
Cu	1.45	1.30	1.49	1.63	1.52	2.20	3.05	2.00	1.90	1.26	1.38	1.17	1.36	1.17	1.27	1.18
F	52.9	36.1	52.4	28.9	31.8	57.9	98.0	630.8	116.0	142.0	189.0	191.0	152.0	421.1	1423.9	26.8
Fe	29.6	20.0	31.9	20.0	21.0	26.4	46.8	25.8	41.4	30.7	30.1	36.9	29.8	22.5	17.5	26.8
Hg	0.064	0.043	0.038	0.082	0.348	0.049	0.082	0.129	0.022	0.091	0.075	0.050	0.068	0.258	0.310	0.053
Mn	0.719	0.287	0.878	0.368	0.395	0.592	2.600	1.214	1.070	0.987	1.120	0.614	0.452	0.385	0.416	0.500
Ni	0.047	0.043	0.053	0.059	0.066	0.069	0.057	0.038	0.031	0.045	0.028	0.040	0.037	0.045	0.048	0.052
Pb	0.057	0.040	0.045	0.050	0.060	0.038	0.054	0.041	0.052	0.044	0.050	0.058	0.060	0.037	0.029	0.030
Se	2.51	0.37	1.64	1.42	3.84	2.19	3.73	9.29	6.46	2.51	3.48	2.50	3.50	1.15	0.80	2.21
Zn	26.7	14.9	52.2	14.3	18.5	21.1	62.0	53.4	25.8	17.2	25.1	18.5	18.9	16.7	20.9	16.7
Na	0.176	0.136	0.226	0.256	0.196	0.230	0.270	0.284	0.222	0.188	0.190	0.169	0.253	0.197	0.226	0.170
K	1.85	1.78	1.79	1.62	1.71	1.77	1.39	1.17	1.84	1.86	1.82	1.93	1.92	1.53	1.45	1.78
Mg	0.176	0.151	0.191	0.164	0.156	0.166	0.177	0.164	0.209	0.206	0.208	0.198	0.221	0.177	0.183	0.194

注: (1)表中鱼种编号对应表 1; (2)Na、K 和 Mg 的值为百分含量

表 3 鱼体元素含量的相关系数和相关显著性水平

Tab. 3 The correlation coefficients and correlation significance levels of the element contents in fish

	As	Cd	Cr	Co	Cu	F	Fe	Hg	Mn	Ni	Pb	Se	Zn	Na	K	Mg
As	1.0000	0.5780	0.4254	0.6758	0.7468	0.2989	0.0085	0.2474	0.2212	0.1694	0.0310	0.1986	0.9314	0.9185	0.0796	0.0047
Cd	-0.1505	1.0000	0.4363	0.2359	0.6465	0.6612	0.5989	0.2462	0.9203	0.8635	0.3934	0.0017	0.1310	0.1810	0.1296	0.3397
Cr	0.2143	0.2094	1.0000	0.3101	0.1318	0.0036	0.2716	0.1595	0.5278	0.1377	0.0795	0.4585	0.6907	0.1990	0.3642	0.9162
Co	0.1134	-0.3142	0.2709	1.0000	0.5905	0.3691	0.6688	0.8471	0.3844	0.2321	0.2586	0.1879	0.1613	0.5935	0.3217	0.5179
Cu	0.0877	0.1243	0.3933	-0.1456	1.0000	0.6078	0.0309	0.5047	0.0003	0.2313	0.5087	0.1040	0.0002	0.0071	0.0670	0.3630
F	-0.2771	0.1188	-0.6816	-0.2407	-0.1390	1.0000	0.1806	0.0198	0.7430	0.4920	0.0520	0.9163	0.6568	0.3616	0.0258	0.9577
Fe	0.6332	-0.1424	0.2925	-0.1160	0.5398	0.3524	1.0000	0.0337	0.0004	0.3493	0.0717	0.1566	0.0315	0.4656	0.5446	0.0503
Hg	-0.3070	0.3078	-0.3690	0.0524	-0.1800	0.5748	-0.5326	1.0000	0.3525	0.3070	0.5639	0.7603	0.7520	0.8330	0.0898	0.1992
Mn	0.3238	0.0272	0.1705	-0.2334	0.7925	-0.0890	0.7760	-0.2489	1.0000	0.7767	0.4058	0.0844	0.0000	0.0764	0.1558	0.6153
Ni	-0.3611	-0.0467	0.3878	0.3167	0.3172	-0.1853	-0.2505	0.2726	-0.0771	1.0000	0.6860	0.1872	0.8738	0.6149	0.5842	0.0138
Pb	0.5396	0.2291	0.4511	0.3002	0.1783	-0.4936	0.4619	-0.1560	0.2233	-0.1096	1.0000	0.3229	0.6313	0.7198	0.1646	0.4627
Se	0.3392	0.7177	0.1997	-0.3470	0.4215	0.0286	0.3715	-0.0828	0.4446	-0.3475	0.2641	1.0000	0.0096	0.0422	0.1615	0.6780
Zn	0.0234	0.3941	0.1079	-0.3676	0.8026	0.1205	0.5383	-0.0858	0.8752	-0.0432	0.1300	0.6252	1.0000	0.0116	0.0052	0.6467
Na	0.0279	0.3521	0.3390	0.1445	0.6437	0.2444	0.1966	0.0573	0.4553	0.1362	0.0974	0.5128	0.6129	1.0000	0.0136	0.9837
K	0.4510	-0.3954	0.2432	0.2648	-0.4688	-0.5546	0.1637	-0.4379	-0.3722	-0.1481	0.3649	-0.3674	-0.6627	-0.6019	1.0000	0.0515
Mg	0.6681	-0.2554	0.0286	0.1746	-0.2437	-0.0144	0.4968	-0.3388	0.1361	-0.6011	0.1978	0.1126	-0.1242	0.0056	0.4945	1.0000

注：对角线以下为相关系数，对角线以上为相关显著水平

表 2 中的各元素含量的变化反应了生物因素(鱼种)和环境因素(水系)的变化。从这种变化中亦将反应出各元素变化规律的联系,为此对上述 16 种元素作相关分析,其结果列于表 3。如以  $\alpha=0.05$  作为显著相关水准,则在总共 128 对两两组合中有 21 对显著相关,即 F—Cd、Fe—As、Fe—Cu、Hg—F、Hg—Fe、Mn—Cu、Mn—Fe、Pb—As、Se—Cd、Zn—Cd、Zn—Fe、Zn—Mn、Zn—Se、Na—Cu、Na—Se、Na—Zn、K—F、K—Zn、K—Na、Mg—As、Mg—Ni; 如以  $\alpha=0.1$  作为显著相关水准,则除以上 21 对元素外,还有 10 对显著相关,即 Pb—Cr、Pb—F、Pb—Fe、Se—Mn、Na—Mn、K—As、K—Cu、K—Hg、Mg—Fe 和 Mg—K。

为了进一步考虑单个元素与多个元素之间的联系,即某个元素的存在规律可能同时受到其它一些元素的协同作用,对 13 个微量元素进行了逐步回归分析。结果表明每种元素的含量均能很好地由其它一些元素含量对数值的回归方程表示,复相关系数的平方 ( $R^2$ ) 在 0.4780—0.9566 之间,显著性水平值 ( $P$ ) 均小于 0.05。结果如下:

$$\ln As = 0.695 + 0.599 \ln Se - 0.369 \ln Cd + 1.308 \ln Pb - 0.409 \ln Zn + 0.101 \ln F, R^2 = 0.89966, p = 0.001$$

$$\ln Cd = -1.863 + 1.234 \ln Se - 1.749 \ln As + 1.696 \ln Pb - 1.049 \ln Zn, R^2 = 0.7801, P = 0.0013$$

$$\ln Cr = -2.477 - 0.222 \ln F + 0.318 \ln Se, R^2 = 0.6396, P = 0.6440$$

$$\ln Cu = -0.0135 + 0.509 \ln Zn + 0.373 \ln Ni, R^2 = 0.6862, P = 0.005$$

$$\ln F = -3.391 - 2.278 \ln Cr + 0.808 \ln Se, R^2 = 0.5124, P = 0.0094$$

$$\ln Fe = 3.303 + 0.260 \ln Mn - 0.126 \ln Hg + 0.170 \ln As, R^2 = 0.8562, P = 0.0000$$

$$\ln Hg = 8.925 + 0.486 \ln F - 1.602 \ln Fe + 1.517 \ln Ni + 1.210 \ln Pb, R^2 = 0.7180, P = 0.0047$$

$$\ln Mn = -6.377 + 0.817 \ln Zn + 1.031 \ln Fe, R^2 = 0.8798, P = 0.0000$$

$$\ln Ni = -3.069 - 0.170 \ln F + 0.202 \ln Hg + 0.349 \ln Cu - 0.373 \ln Pb, R^2 = 0.6770, P = 0.0094$$

$$\ln Pb = -0.959 + 0.442 \ln As + 0.172 \ln Cd - 0.205 \ln Se + 0.209 \ln Cr, R^2 = 0.6540, P = 0.0134$$

$$\ln Se = 1.874 + 0.994 \ln As + 0.418 \ln Cd + 0.638 \ln Zn, R^2 = 0.8555, P = 0.0000$$

$$\ln Zn = 2.982 + 0.536 \ln Mn + 0.163 \ln Cd + 0.521 \ln Cu - 0.213 \ln Cr - 0.155 \ln As, R^2 = 0.9566, P = 0.0000$$

## 2. 鱼体微量元素的富集特征

微量元素在生物体内的富集作用已是众所周知的现象,但不同鱼种对不同微量元素的富集作用较全面的研究报道很少。我们选择受人为污染很少的长江源头和岷江水系作这一研究,以鱼体内微量元素的含量除以相应水环境中过滤水的元素含量,计算出每个元素在不同鱼种肌肉中的富集系数 ( $A$ ),其结果列于表 4,表 4 中鲤的数据为岷江 25 个鲤肌肉样品中各元素的平均含量除以岷江过滤水中各元素的平均含量<sup>(1)</sup>,其它鱼种的采样水系和样品与表 1 相同。

为了说明各元素在鱼体内富集程度的差异,取元素在 12 种鱼体内的平均富集系数 ( $\bar{A}$ ) 进行比较(各元素的平均富集系数见表 4),其结果为:

$$\bar{A}_{Zn} > \bar{A}_{Se} > \bar{A}_{Hg} > \bar{A}_{Fe} > \bar{A}_{Cu} > \bar{A}_{Cd} > \bar{A}_{Co} > \bar{A}_{Mn} > \bar{A}_{As} > \bar{A}_{Ni} > \bar{A}_{Cr} > \bar{A}_{Pb}$$

其中 Zn 和 Se 的  $\bar{A}$  值大于 20000,分别为 21206 和 20113,为极高富集元素;Hg、Fe 和 Cu 的  $\bar{A}$  值在 4000 以上,分别为 7748、6429 和 4986,这三个元素为高富集元素;Cd 和

表 4 微量元素在不同鱼种肌肉中的富集系数

Tab. 4 The enrichment coefficients of microelements in various species of fishes

	As	Cd	Cr	Co	Cu	Fe	Hg	Mn	Ni	Pb	Se	Zn	A <sub>A</sub>
01	498	1750	88.5	249	5311	9645	3478	298	114	121	16733	16688	4581
02	177	417	44.2	135	4762	6517	2337	119	104	84.7	2467	9313	2206
03	275	1333	98.1	249	5458	10394	2065	364	129	95.3	10933	15750	3929
04	417	250	96.2	529	5971	6517	4457	153	143	106	9467	8938	3087
05	476	3167	90.4	337	5568	6843	18913	164	160	127	25600	11563	6084
06	391	1083	123	207	8059	8602	2663	246	168	80.5	14600	13188	4118
07	587	500	86.5	275	11172	15249	4456	1079	138	114	24867	38750	8106
08	332	4500	76.9	83	7326	8407	7011	504	92.2	86.9	61933	33375	10311
09	156	212	159	1393	2065	1481	4400	254	86.1	34.2	32300	31852	6199
10	165	58	163	1643	1370	1098	18200	234	125	28.9	12550	21235	4739
11	98	269	171	1750	1500	1077	15000	266	77.8	32.9	17400	30988	5719
12	120	192	150	1893	1272	1320	10000	146	111	38.2	12500	22840	4215
$\bar{A}$	308	1144	112	728	4986	6429	7748	319	120.7	79.2	20113	21206	5274

注:表中鱼种编号对应表 1

Co 的 $\bar{A}$ 值分别为 1144 和 728,是中富集元素;Mn、As、Ni、Cr 和 Pb 5 个元素的平均富集系数在 400 以下,为低富积元素。

为了比较不同鱼种对微量元素富集能力的差异,本文使用了一个类似于综合污染指标<sup>(2)</sup>的概念——微量元素综合富集系数( $A_A$ ), $A_A$  为各元素 A 值的算术平均值。按 12 种鱼的  $A_A$  值的大小,各鱼种对微量元素富集能力的顺序为:嘉陵裸裂尻鱼>松藩裸鲤>软刺裸裂尻鱼>白甲鱼>裸腹重唇鱼>小头高原鱼>鲤鱼>短须裂腹鱼>中华裂腹鱼>齐口裂腹鱼>瓣结鱼>铜鱼。长江水系这 12 种鱼的平均综合富集系数为 5274,这一值反应了受人为污染较小的长江上游地区主要的 12 种鱼对微量元素的平均富集能力。

3. 鱼体内微量元素与水中微量元素的关系

为了探讨鱼体内微量元素与水环境的关系,分析了鱼体微量元素与水中微量元素的相关性。鱼体微量元素含量取长江源头过滤水中元素含量(其中 F 的含量以乌江-赤水的含量代替)见表 5。表 5 同时列出了海水<sup>(3)</sup>和地壳<sup>(4)</sup>中微量元素的组成作对比。

表 5 鱼体、淡水、海水及地壳中微量元素的含量比较

Tab. 5 The content comparison of microelements in fish, fresh water and sea water, the earth's crust

元素	鱼 mg / kg	淡水 $\mu\text{g} / \text{L}$	海水 $\mu\text{g} / \text{L}$	地壳 mg / kg
Elements	Fish	Fresh water	Sea water	The earth's crust
As	0.585	4.34	2.60	1.80
Cd	0.009	0.052	0.11	0.20
Cr	0.040	0.246	0.20	100
Co	0.047	0.280	0.39	25.0
Cu	1.43	0.920	0.90	55.0
F	160	80.0	1300	625
Fe	34.8	27.95	3.40	56300
Hg	0.060	0.005	0.15	0.08
Mn	0.948	4.21	2.00	950
Ni	0.036	0.360	6.60	75.0
Pb	0.051	1.52	0.03	12.5
Se	3.74	0.200	0.09	0.05
Zn	21.7	0.810	5.00	70.0

鱼体与水中微量元素含量之间存在良好的线性关系,其回归方程为

$$C_{\text{鱼体}} = -0.672 + 192 \times C_{\text{水}},$$
$$R = 0.9800, P = 0.0000$$

上述方程是以不同元素含量的数据(表 5)作出的回归方程,因此只能用于从水中微量元素含量水平估计鱼体各微量元素的大致水平,而不能用于估计同一元素在不同水环境中的变化。但这种关系反映出鱼体元素的富集作用遵从丰度规律。本文的研究结果所反映的是鱼体内微量元素及部分常量元素之间,以及鱼体与水环境中微量元素之间的生态化学规律,这些规律是各种极其复杂的生物因素和环境因素综合作用的结果,同时对微

观作用机理研究具有一定的指导意义。

### 参 考 文 献

- [1] 章申等主编。化学元素水环境背景值研究。北京:测绘出版社。1990。
- [2] 徐小清等。三峡库区水环境现状及建坝对沉积物污染影响评价。见:长江三峡工程对生态与环境影响及其对策研究论文集。北京:科学出版社。1987。
- [3] Paul C. Ecology. New York: John Wiley and Sons, Inc. 1986.
- [4] 勒斯勒等著(卢焕章等译)。地球化学表。北京:科学出版社。1985。

## STUDIES ON THE CHARACTERISTICS OF ECOLOGICAL CHEMISTRY OF MICROELEMENTS IN FISH

Lei Zhihong, Xu Xiaoqing, Hui Jiayu and Deng Guanqiang

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

### Abstract

Statistical analyses were performed on the contents of 16 microelements in 16 species of fish and in related aquatic environments. Significant correlations were observed between some pairs of these elements, and stepwise variable selection is effectively applied in regression analyses between one element and several others. Enrichment of microelements may occur in fish as indicated by the enrichment coefficients of 12 microelements, ranging from 79. 2 to 21206 in 12 species of fish. Significant correlations were also found between the element contents in fish and those in water.

**Key words** Fish, Microelements, Ecological chemistry