

不同水域鲤鱼耳石微化学特征及其环境指示意义

杨良锋^{1,2}, 李胜荣¹, 罗军燕¹, 高永华¹, 佟景贵¹, 曹 焱¹, 申俊峰¹

(1. 中国地质大学 地质过程与矿产资源国家重点实验室 北京 100083; 2. 中国地质博物馆 北京 100034)

摘 要: 利用中子活化分析对密云水库与白洋淀水域两个不同水域(无污染水域和重污染水域)中鲤鱼耳石的微量元素进行分析,发现白洋淀鲤鱼耳石中 Sr、Zn、As、Au、Ba、K、Na 的含量明显比密云水库鲤鱼耳石的相应元素含量高。采用线性判别方法对两地耳石中 Sr、Zn、As、Ba 4 种元素进行分析,表明存在明显的分组差异,而且两地的差别主要在于 Sr 含量不同,其次是 Zn、As 和 Ba;白洋淀鲤鱼耳石中 As、Ba、Sr、Na 等元素含量变化幅度比密云水库鲤鱼耳石中相应元素含量的变化幅度大,与白洋淀水域废水排放时间上的周期性和短暂性导致元素在耳石部分日轮上沉淀等因素相吻合。两地鲤鱼耳石微量元素特征存在截然的区别,与两地水域水体中微量元素差异相一致,表明鲤鱼耳石微化学特征具有水化学环境指示意义,为进一步研究利用鲤鱼耳石进行水化学环境监测或恢复鲤鱼生长期水环境特征奠定了基础。

关键词: 微化学特征;水化学环境指示;鲤鱼;耳石;不同水域

中图分类号: P578.6⁺1; P575.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2006)06-0511-07

Microchemical characteristics of carp otoliths from two different water environments and their indication significance for environmental changes

YANG Liang-feng^{1,2}, LI Sheng-rong¹, LUO Jun-yan¹, GAO Yong-hua¹,
TONG Jing-gui¹, CAO Ye¹ and SHEN Jun-feng¹

(1. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Geological Museum of China, Beijing 100034, China)

Abstract: Asteriscus otoliths of carps were collected from the Baiyangdian shallow lake and the Miyun reservoir, whose water environments are completely different. The former has been seriously polluted whereas the latter is nearly pure and has experienced no pollution. The otoliths were analyzed by Neutron Activation Analysis (NAA) for microchemical characteristics as indicators to hydrochemical changes. The contents of Sr, Zn, As, Au, Ba, K and Na in the otolith from the Baiyangdian shallow lake are obviously higher than those from the Miyun reservoir. Linear Discriminant Function Analysis (STATISTICA) was used to classify carp collection sites. The discriminant functions show the major differences between the two sites are the differences in concentrations of Sr, Zn, As and Ba. Moreover, the variation ranges of As, Ba, Sr and Na in otolith from the Baiyangdian shallow lake are relatively larger than those from the Miyun reservoir, which is in accord with the fact that a seasonal and temporal influx of industrial waste into the Baiyangdian shallow lake drainage area causes the precipitation of these elements in some otolith growth increments. The differences of these elements in otoliths from these two areas are consistent with those in the carp living water. These conclusions are of significance in study-

收稿日期: 2006-07-19; 修订日期: 2006-09-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40473044)

作者简介: 杨良锋(1973-),男,汉族,在读博士,副研究员,主要从事成因矿物学、生命矿物学研究,电话:010-66557457, E-mail:

yangliangfeng@yahoo.com.cn; 通讯作者: 李胜荣,电话:010-82321732, E-mail: lizr@cugb.edu.cn

ing indicators to hydrochemical environments.

Key words: microchemical characteristics; hydrochemical indication; carp; otolith; different water environment

鲤鱼耳石共有三对:矢耳石(*sagittae*)、微耳石(*lapillus*)、星耳石(*asteriscus*),分别存在于球状囊、椭圆囊、平状囊(听壶)中。耳石的主要成分是 CaCO_3 。1899 年 Reibisch 发现了耳石具有年轮结构,1971 年 Pannella 发现了耳石具有日轮。实验研究发现,耳石的年轮和日轮准确地记录了鱼类生活的时间。对海水鱼类研究表明,以离子替换或共同沉淀方式进入耳石中的微量元素的富集程度取决于水体中相应元素的浓度(Campana, 1999),同时还受盐度和温度的影响(Elsdon *et al.*, 2002; Zacherl *et al.*, 2003; Martin *et al.*, 2004),记录了水环境的信息。对耳石进行研究,可望获得鱼类生活期所经历的水环境情况,进而揭示其环境指示意义。国际上利用回游性鱼类耳石微化学成分来标示鱼类不同生活阶段的环境特征(Quinn *et al.*, 1999; Weber *et al.*, 2002; Jones *et al.*, 2003; Wells *et al.*, 2003; 曾万年, 2001),或利用耳石微化学以确定某一水系不同水域对鱼的种群的影响(Campana *et al.*, 2001; Swan *et al.*, 2003; Diggle *et al.*, 2004),还可利用耳石中氧同位素纪录来恢复鱼类生活期水体环境的温度变化(Devereux, 1967; Degens *et al.*, 1969; Thorrold *et al.*, 1997),并利用碳同位素进行有关鱼类新陈代谢的研究(进一步研究鱼类的食物链)(Schwarcz *et al.*, 1998; Wherwood *et al.*, 2003)。这些已成为前沿热点课题,而国内则很少有人进行这方面的研究,至于利用淡水鱼,特别是不同水系水域的鲤鱼耳石进行有关对比研究在国际上也很罕见,然而若能利用不同淡水水域的鱼类耳石的微化学特征来揭示其所生活的水体水质情况,将对水环境监测产生重大的变革。它不仅监测鱼类捕获时的水环境特征,还可以获得鱼类生活时期的水环境特征,成为水环境历史永恒的见证。

本研究选择两个水质完全不同的水域(无污染水域密云水库,作为相对纯净水源的对比参照物,重污染水域白洋淀)中鲤鱼的耳石,在前期研究(曹焯等 2006)的基础上,进行微化学对比分析,拟获得耳石微化学对环境响应的有用信息,研究鲤鱼耳石微化学特征的环境指示意义,为进一步解读鲤鱼耳石年轮(日轮)中微化学特征对水环境变化的响应奠定基础。

1 研究区概况

密云水库位于密云县的中部,库区无机氮丰富,无机磷缺乏,属中营养型水库并有一定的富营养化趋势。库区的重金属含量在丰水期含量明显高于枯水期,说明库区在丰水期存在重金属污染的潜在趋势,但在全年的微量重金属元素含量适中(杜桂森等, 1999; 葛晓立等, 2003)。

白洋淀位于河北省保定市,是华北地区最大的淡水湖泊,由总面积为 366 km^2 的 143 个大小不同的淀泊组成。近年来随着经济的快速发展,对水资源掠夺性的开发使白洋淀生态环境遭到破坏。据调查,白洋淀现已有 80% 的水域处于富营养状态,13% 的水域处于重富营养状态,7% 的水域呈极富营养状态,每年入冬以后,常有大量的工业污水排入淀区,春季以后,从上游水库调水入淀,而生活垃圾则随时可见。同时,有关白洋淀水域重金属的污染状况及其污染过程也已有过一些研究(毛美洲等, 1995; 王怡中等, 1995; 崔秀丽, 1999)。

2 样品采集

作者分别于 2004 年 10 月、11 月在密云水库和白洋淀两个研究区各捕捞 10 条共 20 条野生鲤鱼,在捕捞的当天及次日对其进行解剖,取出耳石,并用酒精浸泡。选取每条鱼的一个星耳石作为中子活化分析样品。

3 测试分析及结果

3.1 测试分析方法

准确称量样品,包于高纯铝箔中,与标准(化学标准和标准参考物)一起置于中国原子能科学院重水反应堆中进行照射,中子注量率为 $4.83 \times 10^{13} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$,照射时间为 8 h,样品和标准在停止照射后,除去包裹的高纯铝箔,在第 6 天和第 16 天分别 2 次用 Ortec HPGe(高纯锗) γ 谱仪测量其 γ 能谱,其分辨率为 1.80 keV,每个样品 1 次测量的时间为 2h,然后用相关的 γ 谱分析程序进行处理,计

算出样品中各元素的含量。实验中用标准参考物作为分析质量的监控物质。结果表明,本次实验测得的数据与推荐值符合,误差小于 10%。

采用统计分析方法对测试结果数据进行分析。在分析之前,首先将元素的测量单位均换算成 10^{-6} ;其次,对元素的测量数据(A)进行规范化处理,将其转换成对数值(B),以满足统计分析条件,其方法为: $B = \lg(A + 1)$;再用各元素对数值作为变量值,进行多元方差分析,根据多元方差分析结果,进一步选择重点元素,进行线性判别分析。

3.2 中子活化分析结果

实验样品称重结果见表 1。白洋淀水域鲤鱼耳石用于中子活化的样品质量在 0.012 53~0.018 65

g 之间,密云水库鲤鱼耳石用于中子活化的样品质量在 0.017 77~0.032 84 g 之间。对两地的耳石进行中子活化分析,共分析了 Ag、As、Au、Ba、Ca、Ce、Co、Cr、Cs、Eu、Fe、Hf、K、La、Lu、Mo、Na、Nd、Ni、Rb、Sb、Sc、Se、Sm、Sr、Ta、Tb、Th、U、W、Yb、Zn、Zr 33 个元素,发现 Ag、Ce、Co、Cr、Cs、Eu、Fe、Hf、La、Lu、Mo、Nd、Ni、Rb、Sb、Sc、Se、Sm、Ta、Tb、Th、U、W、Yb、Zr 这 25 个元素几乎很难检测到,剩下 8 个元素 As、Au、Ba、Ca、K、Na、Sr、Zn 的检测分析结果比较理想。剔除相对百分误差大于 50% 的数据。鲤鱼耳石 As、Au、Ba、K、Na、Sr、Zn 元素测试结果见表 1。

3.3 统计分析结果

白洋淀鲤鱼耳石中 As、Ba、K、Na、Sr、Zn、Au 的

表 1 密云水库(M)和白洋淀(BYD)水域鲤鱼耳石中子活化分析结果

Table 1 Result of Neutron Activation Analysis (NAA) for otoliths of carps from the Miyun reservoir (M) and the Baiyangdian shallow lake (BYD)

样品	质量/mg	$w_B/10^{-9}$				$w_B/10^{-6}$		
		As	Au	Ba	K	Na	Sr	Zn
M19	51.95	20.4	0.407	4.13	295	1 130	169	14.1
M21	28.37	27.1	<0.183 ^a	8.14	655	820	140	3.89
M22	28.95	30.3	<0.175 ^a	4.81 [*]	762	869	180	3.91
M24	28.20	31.9	0.906	9.03	<345 ^a	820	133	3.88
M09	39.90	19.1	3.35	6.45	<129 ^a	761	140	5.07
M02	21.52	46.6	0.506	4.43	383	977	129	2.82
M03	22.61	35.6	0.39	5.57	361	939	225	1.59
M05	17.77	47.7	<0.168 ^a	4.01	291	948	175	3.48
M07	32.84	36.1	0.269	5.4	314	877	151	1.08
M08	19.92	28.3	0.602	5.64	292	871	152	1.76
BYD06	7.31	159.0	0.0957 [*]	15.2	<249 ^a	1 040	434	28.1
BYD07	8.13	84.2	1.12	18.3	<262 ^a	1 140	436	25.3
BYD10	15.55	91.9	0.822	10.2	527	1 180	585	20.9
BYD16	8.42	174.0	1.57	13.6	<349 ^a	1 490	468	63.6
BYD17	9.33	130.0	1.61	10.9	736	1 020	477	63.6
BYD05	13.30	72.3	0.897	<1.69 ^a	272	1 020	327	36.2
BYD09	16.08	63.1	0.577	10.3	452	1 540	1 260	42
BYD011	12.53	36.8	2.03	2.14 [*]	332	1 180	439	21.3
BYD013	15.14	37.8	0.429	6.49	289 [*]	991	602	24
BYD014	18.65	61.6	1.03	5.42	510	1 030	472	82.4

* 表示相对百分误差大于 50% 的数据,标有 a 的数据不参加分析。

平均含量整体比密云水库鲤鱼耳石的相应元素含量偏高(表 2 和图 1a)。多元方差分析假设检验结果显示 Pillai、Hotelling、Wilks 统计显著水平均为 0.000;而一元方差分析假设检验结果表明 $\lg Sr$ 、 $\lg As$ 、 $\lg Ba$ 、 $\lg Zn$ 统计显著水平分别为 0.000、0.001、0.002、0.000,说明白洋淀与密云两地鲤鱼耳石在 Sr、As、Ba、Zn 4 种元素含量上存在明显的差异。以密云水库作为纯净水源参考点,对两地鲤鱼耳石中 Sr、As、

Ba、Zn 元素进行对比分析发现,白洋淀鲤鱼 As、Zn 均值高出 50%,而 As 的标准差亦高出 80%,Zn 的标准差却低 10% 左右;白洋淀鲤鱼 Au、Ba、Sr 均值高出约 20%,而 Sr 的标准差则高出 50%,Ba 约 40%、Au 则约低于 130%;两地 K、Na 均值基本相似,而 K 的标准差相差 10%、Na 则相差约 30%(图 1b)。其中 $\lg(\text{元素})$ 平均值代表耳石中元素含量 + 1 取常用对数的均值,置信区间 95%,均值差异率 = (白

表 2 密云水库 (M) 和白洋淀 (BYD) 水域鲤鱼耳石中微量元素均值对比表

Table 2 Trace element composition of carps otolith from Miyun and Baiyangdian

		耳石质量/mg	lgSr	lgZn	lgAs	lgBa	lgAu	lgK	lgNa
M	均值	0.029 2	2.199 4	0.643 7	0.013 8	0.825 0	0.000 4	2.593 0	2.952 8
	标准差	0.003 28	0.023 2	0.075 8	0.001 3	0.035 2	0.000 2	0.058 4	0.015 3
BYD	均值	0.012 44	2.711 3	1.571 6	0.037 5	1.064 9	0.000 5	2.652 2	3.060 8
	标准差	0.001 25	0.049 1	0.067 3	0.006 0	0.057 1	0.000 1	0.062 7	0.021 8

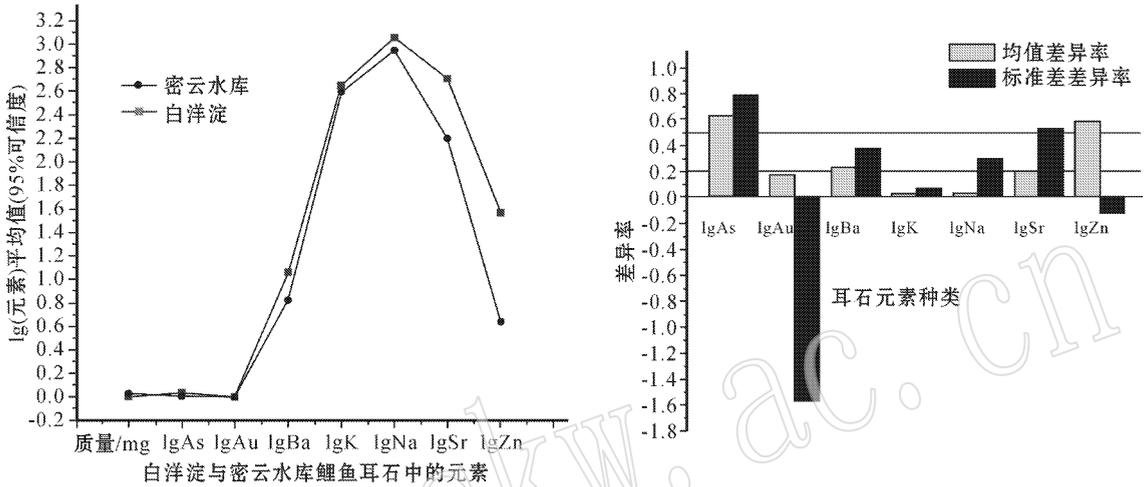


图 1 密云水库和白洋淀水域鲤鱼耳石中微量元素对比图

Fig. 1 Trace element composition differences of carps otoliths between the Baiyangdian shallow lake and the Miyun reservoir

白洋淀耳石中元素均值—密云耳石中元素均值) / 白洋淀耳石中元素均值, 标准差差异率 = (白洋淀耳石中元素标准差—密云耳石中元素标准差) / 白洋淀耳石中元素标准差。

选取密云水库和白洋淀水域鲤鱼耳石中 Sr、Zn、Ba、As 4 种元素进行线性判别分析, 将两地水域各 10 个样品全部分组, 参与计算, 采用组内交叉核实方法检验分组结果的可靠性, 得到两个水域的耳石判别函数为: $27.424 \lg \text{As} + 3.151 \lg \text{Ba} + 7.488 \lg \text{Sr} + 2.657 \lg \text{Zn} - 24.949$ 。组形心值分别是 -3.852 和 4.333 , 典型相关系数为 0.975 , 残余判别力 0.050 , 显著水平 0.000 , 分组检验结果判别准确率及交叉核实检验均为 100% , Sr、Zn、As 和 Ba 的结构系数依次降低。以上结果表明, 两地鲤鱼的 Sr、Zn、As、Ba 元素分组差异是非常明显的, 且差别主要在于 Sr 含量的不同, 其次是 Zn、As 和 Ba。

由两地耳石线性判别分析可知, 两地元素差异主要在于 Sr 含量的不同, 其次是 Zn、As 和 Ba。对这些元素进行 Pearson 相关性分析发现各元素间相关系数分别为 Sr—Zn 0.823 (可信度 0.01), As—Ba:

0.728 (可信度 0.01), Zn—As 0.657 (可信度 0.01), Sr—As 0.556 (可信度 0.05), Sr—Ba 0.565 (可信度 0.05), Zn—Ba 0.556 (可信度 0.05)。用耳石质量作为控制因子进行偏相关分析, 发现偏相关系数分别为 Sr—Zn 0.743 , As—Ba 0.506 , Zn—As 0.472 , Sr—As 0.186 , Sr—Ba 0.273 , Zn—Ba 0.362 。从而可知, Sr—Zn 两者为高相关性且不受耳石质量的影响, 说明 Sr—Zn 两者确实存在强的相关性。

4 讨论与结论

矢耳石和微耳石的标准矿物是文石, 大多数星耳石由球文石组成 (Lowenstam and Weiner, 1989; Oliveira *et al.*, 1996)。模拟生物矿化的研究表明, 有机分子可能间接地 (或者可能直接地) 参与控制了碳酸钙结晶时对晶体结构的选择 (Falini *et al.*, 1996)。在理想实验条件下, 从文石质贝壳层中提取大分子诱导文石的形成, 而从方解石质贝壳层中提取大分子则诱导形成方解石 (Falini *et al.*, 1996)。这可能说明耳石中碳酸钙晶体形成的速率和类型均

由蛋白质调节。与骨骼等生命矿物质结构不同,耳石是鱼体内非细胞起源结构,不参与机体的生理、代谢过程,因此早期沉积的矿物质在以后的生长过程中不会被吸收和重组(Campana and Neilson, 1985),所以耳石中的微量元素保留了鱼类生长过程中环境的信息。

这些微量元素在耳石中如何占位及其与环境中元素变化的响应是研究耳石元素水化学环境指示的关键所在。通过对两地鲤鱼耳石的热释光曲线特征进行研究,发现鱼耳石的热释光曲线特征对鱼所生长的水体水质和水环境相当敏感,反映了杂质元素在鲤鱼耳石的占位与其所生长的水化学环境存在某种指示意义(曹焯等, 2006)。杂质元素在耳石中的占位情况不同,其元素间的数理特征便有所不同(Campana, 1999),所以通过对密云水库和白洋淀水域两地鲤鱼耳石的中子活化测试及测试结果中各元素数理特征的统计分析研究,可以间接地得出元素的占位情况;根据元素间的生物地球化学的循环原理,进而可以探讨耳石元素的水化学环境指示意义。

4.1 两地耳石中微量元素占位讨论

鱼耳石中杂质元素的确切占位迄今未见研究,可能与其他文石碳酸盐的情况相似,存在 3 种情况:在晶格中替代 Ca^{2+} 、作为空隙间的包裹体或与蛋白质母体有关。

由统计分析可知, Sr-Zn 两者确实存在强的相关性,表明这两种元素在耳石中碳酸钙晶体的形成中可能存在某种关联。而其他元素间的相关性均在一定程度上受耳石质量的影响,表明这些元素间的相关性是因为耳石质量的变化而存在,这与白洋淀水域这些元素的阶段性异常有关,因为质量的增加意味着鱼龄的增大,表明鱼耳石从环境中吸收的元素(指工业废水中的元素)增多,而实际上这些元素对于耳石中碳酸钙晶体的形成无必然的关联。对于晶格中替代的微量元素之间,彼此在含量上存在高的相关关系(Campana, 1999)。因此,在元素的占位方式上, Sr、Zn 以某种相同的占位方式存在。由于碳酸锶和文石的晶体结构几乎相同,造成了锶元素对文石的亲和性,而耳石 Sr 代替 Ca 的可能性比文石与碳酸锶同时沉淀的可能性要大(Greeger *et al.*, 1997)。因此可以认为, Sr、Zn 为晶格占位,而 As、Ba 不进入晶格,可能存在于空隙间。这一结论与地质过程成因的文石结构中钙常被锶、锌等元素所代替相符(王璞等, 1987)。由于空隙间的结合力差,加上

耳石具有微隧道结构(Gauldie and Romanek, 1998),所以 Ba、As 等元素相对容易与外界交换(Proctor and Thresher, 1998; Campana *et al.*, 2000),在条件许可下, Ba、As 受外界影响可能会比 Sr、Zn 要大。

晶格中 Ca 离子之间的空隙决定了离子替代和共同沉淀的元素种类,从而说明一些元素对球文石耳石和文石耳石的亲和性具有极大的差异(Gauldie, 1996)。比较而言,像 Na、Au、K 这一类的离子不可能进行正常的结晶沉淀,而可能在晶体缺陷中存在(Morse and Mackenzie, 1990)。

4.2 两地耳石中微量元素特征的环境指示意义

对两个水域水体化学元素进行研究发现,白洋淀水体 Sr 含量略高于密云水体的含量,而 Mg 含量却比密云水体的含量高的多(图 2)。Sr、Mg 通过鳃进入鲤鱼血液,最后进入淋巴液,参与耳石中文石的结晶,当溶液中存在 Sr、Mg 盐类杂质时,有利于文石的形成(王璞等, 1987),这可能是白洋淀水域鲤鱼耳石中 Sr 的含量明显比密云水库鲤鱼耳石 Sr 的含量高的另一原因。白洋淀水域的 Sr、Zn 和 As、Ba 整体比密云水库偏高,与耳石微化学分析结果亦完全吻合。

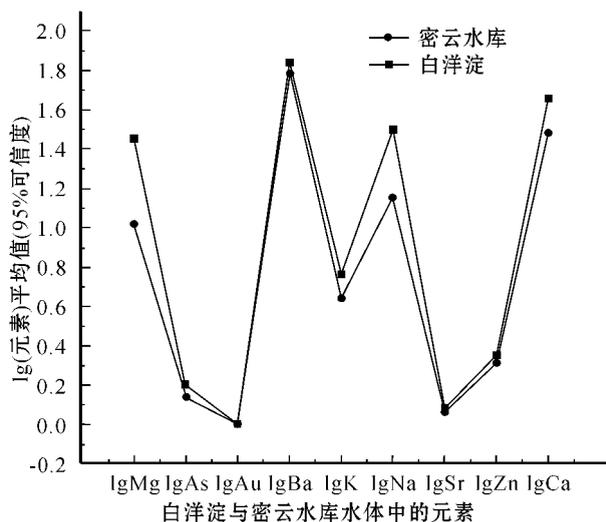


图 2 白洋淀和密云水库水体中微量元素对比图

Fig. 2 Trace element composition differences of the water body between the Baiyangdian shallow lake and the Miyun reservoir

根据均值与标准差的统计意义可以认为,两个样本的特征指标的均值差异程度反映了这两个样本的特征指标存在差异现象,而两个样本的特征指标的标准差差异程度反映了这一个样本的特征指标相

对于另一个样本的特征指标的离散程度的差异。若样本的特征指标具有时间性,则可以认为,当均值存在显著差异时,标准差差异值越大则暗示着两个样本间在样品特征指标所代表的时间范围内的差异是间断性差异,反之则是持续性差异。

由于密云水库水质属保护对象,周边径流入库的水源及物质可以认为基本不变,可作为分析其他水域水质变化的参考依据。所以从两区域鲤鱼耳石中元素多元方差分析结果可知白洋淀鲤鱼耳石中 As、Sr、Ba 为阶段性异常,Na 存在阶段性波动,Zn 则为持续异常,而 Au 则基本保持不变,两地 K 基本相似。通过笔者对两个水域实地调研,发现 As、Sr、Ba、Na 这些元素为阶段性异常,可能与白洋淀部分边缘水体受周边企业间歇性排污有关。而 Zn 持续异常,可能与白洋淀周围存在许多生活垃圾有关。据当地居民反映,每年入冬后,大量的工业废水从上游排放下来,造成许多鱼类死亡,同时也可能导致了 As、Ba、Na 这几种元素在鲤鱼耳石中异常沉淀,而每年不同程度地从上游其它水库调水入淀则可能是造成 Sr 含量变化的直接原因。由于废水排放时间上的周期性和短暂性,造成这些元素在耳石部分日轮上沉淀,不同鱼龄的耳石中所含的这些元素也不相同,从而造成白洋淀鲤鱼耳石中 As、Ba、Sr、Na 元素比密云水库鲤鱼耳石中的相应元素的变化幅度相对大,这与实际水质情况相符。

4.3 结论

通过对密云水库与白洋淀水域中鲤鱼耳石的微量元素进行中子活化分析,并采用多元方差、线性判别法等统计手段对测试结果进行对比分析,得出如下结论:

两地鲤鱼耳石微化学特征主要差别在于 Sr 含量的不同,其次为 Zn、As 和 Ba。Sr 与 Zn 为高正相关性,且不受耳石质量的影响,表明 Sr、Zn 为相同占位方式,可能在耳石中为晶格占位,而 As、Ba 则可能主要存在于耳石的晶体结构的空隙中。

两地耳石微化学明显的差异与两地水域水体中相应元素的差异相吻合。白洋淀水域工业废水排放和引水入淀时间上的周期性和短暂性,使 As、Ba、Sr、Na 在耳石部分日轮上沉淀,不同鱼龄的耳石中所含的这些元素也不相同,从而造成白洋淀鲤鱼耳石中这些元素比密云水库鲤鱼耳石中的相应元素的变化幅度相对大;白洋淀水域生活垃圾的大量存在,使 Zn 持续异常。耳石中这些元素的异常与实际水质

情况相符,说明了鲤鱼耳石对水化学环境变化存在灵敏的响应。

密云水库和白洋淀水域两类完全不同水质水域中的鲤鱼耳石微化学特征很好地响应了水化学环境特征,特别是进入晶格的元素诸如 Sr、Zn 等元素,可作为耳石响应环境可靠的环境指示因子。耳石中元素与水体中响应元素的定量关系,值得进一步深入研究,拟寻求利用耳石中微化学监测水域水化学环境的变化了的定量模型。

致谢 感谢中国科学院水生生物研究所常剑波研究员及其研究生管兴华在鱼耳石取样和研究过程中给予的帮助。

References

- Campana S E. 1999. Chemistry and Composition of Fish Otoliths: Pathway, Mechanisms and Applications [J]. Marine Ecology Progress Series, 188: 263~297.
- Campana S E, Chouinard G A, Hanson M, et al. 2000. Otolith elemental fingerprints as biological tracers of fish stocks [J]. Fish. Res., 188: 263~97.
- Campana S E and Neilson J D. 1985. Microstructure of fish otoliths [J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 42: 1014~1032.
- Campana S E and Simon R. 2001. Otoliths, Increments, and Elements: Keys to a Comprehensive Understanding of Fish Populations? [J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 58: 30~38.
- Cao Ye, Li Shengrong, Yang Liangfeng, et al. 2006. Thermoluminescence characteristics of otoliths of wild carps (*cyprinoid*) in the Baiyangdian Lake and the Miyun Reservoir [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 25(5): 449~459(in Chinese with English abstract).
- Cui Xiuli. 1999. The survey to the source of eutrophication of the water of Baiyangdian Lake [J]. Environmental Science, 16(S1): 17~18 (in Chinese with English abstract).
- Degens E T, Deuser W G and Haedrich R L. 1969. Molecular structure and composition of fish otoliths [J]. Mar. Biol., 2: 105~113.
- Devereux I. 1967. Temperature measurements from oxygen isotope ratios of fish otoliths [J]. Science, 155: 684~685.
- Diggle J, Day J and Bax N. 2004. Eradicating European Carp From Tasmania and Implications for National European Carp Eradication [M]. Inland Fisheries Service, Hobart.
- Du Guisen, Meng Fanyan, Li Xuedong, et al. 1999. Water quality and development trend of Miyun reservoir [J]. Environmental Science, 20(20): 110~112(in Chinese with English abstract).
- Elsdon S and Bronwyn M. 2002. Interactive Effects of Temperature and Salinity on Otolith Chemistry: Challenges for Determining Environmental Histories of Fish [J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 59: 1796~1808.
- Falini G, Albeck S, Weiner S, et al. 1996. Control of aragonite or cal-

- cite polymorphism by mollusk shell macromolecules[J]. *Science*, 271: 67~69.
- Gauldie R W. 1996. Effects of temperature and vaterite replacement on the chemistry of metal ions in the otoliths of *Oncorhynchus tshawytscha*[J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 53: 2015~2026.
- Gauldie R W and Romanek C R. 1998. Orange roughly otolith growth rates: a direct experimental test of the Romanek-Gauldie otolith growth mode[J]. *Compar. Biochem. Physiol.*, 120A: 649~653.
- Ge Xiaoli, Liu Xiaoduan, Pan Xiaochuan, et al. 2003. The geochemical characteristics of water body in Miyun reservoir[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 22(1): 44~48 (in Chinese with English abstract).
- Gregor R B, Pingitore Jr N E and Lytle F W. 1997. Strontianite in coral skeletal aragonite[J]. *Science*, 275: 1452~1454.
- Jones C M and Chen Zhongxing. 2003. New Techniques for Sampling Larval and Juvenile Fish Otoliths for Trace-element Analysis With Laser-ablation Sector-field Inductively-coupled-plasma Mass Spectrometry (sf-icp-ms) [A]. Oward I B and Anne B S. The 26th Annual Larval Fish Conference [C]. Bergen, Norway: the Institute of Marine Research, 431~443.
- Lowenstam H A and Weiner S. 1989. *On Biomineralization* [M]. NY: Oxford University Press, 315.
- Mao Meizhou, Liu Zihui, Dong Hui, et al. 1995. Study on the contamination of the water and sediment of Fuhe River-Baiyangdian Lake [J]. *Environmental Science*, 16(S1): 1~6 (in Chinese with English abstract).
- Martin G B and Thorrold S R. 2004. Temperature and Salinity Effects on Strontium Incorporation in Otoliths of Larval Spot (*Leiostomus Xanthurus*) [J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 61: 34~42.
- Morse J W and Mackenzie F T. 1990. *Geochemistry of sedimentary carbonates* [M]. Elsevier Pub., NY, 580.
- Oliveira A M, Farina M, Ludka IP, et al. 1996. Calcite and Aragonite in the Otoliths of Three Species of Piranha [J]. *Naturwissen*, 83: 133~135.
- Pannella G. 1971. Fish otoliths: daily growth layers and periodical patterns [J]. *Science*, 173: 1124~1127.
- Proctor C H and Thresher R E. 1998. Effects of specimen handling and otolith preparation on concentration of elements in fish otolith [J]. *Mar. Biol.*, 131: 681~694.
- Quinn T P, Eric C V and Andrew P H. 1999. Natural Otolith Microstructure Patterns Reveal Precise Homing to Natal Incubation Sites By Sockeye Salmon (*Oncorhynchus Nerka*) [J]. *Can. J. Zool.*, 77: 766~775.
- Reibisch J. 1899. Ueber die eizahl bei *Pleuronectes platessa* und die altersbestimmung dieser form aus den otolithen (The number of eggs in the *Pleuronectes platessa* and the fixing of its age by means of the otolith). Translated by Dobson. A. T. A. [J]. *Wissenschaftliche Meeresuntersuchungen N. F. Abt. Kiel*, 4: 231~248.
- Schwarz H P, Gao Y, Campana S E, et al. 1998. Stable Carbon Isotope Variation in Otoliths of Atlantic Cod (*Gadus Morhua*) [J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 55: 1798~1806.
- Swan S C J, Gordon D M and Shimmield T. 2003. Preliminary Investigations on the Uses of Otolith Microchemistry for Stock Discrimination of the Deep-water Black Scabbardfish (*Aphanopus Carbo*) in the North East Atlantic [J]. *Northw. Atl. Fish. Sci.*, 31: 221~231.
- Thorrold S R, Campana S E, Jones C M, et al. 1997. Factors determining $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ fractionation in aragonitic otoliths of marine fish [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 61: 2909~2919.
- Wang Pu, Pan Zaolu, Weng Linbao, et al. 1987. *System Mineralogy* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 369~371 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yizhong, Liu Ji'ang, Hu Chun, et al. 1995. Analysis of organic contamination in the water of Baiyangdian Lake [J]. *Environmental Chemistry*, 14(5): 442~447 (in Chinese with English abstract).
- Weber P K, Ian D H, et al. 2002. Otolith Sulfur Isotope Method to Reconstruct Salmon (*Oncorhynchus Tshawytscha*) Life History [J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 59: 587~591.
- Wells B K, Bruce E R, et al. 2003. Relationships Between Water, Otolith, and Scale Chemistries of Westslope Cutthroat Trout From the Coeur D'Alene River, Idaho: The Potential Application of Hard-part Chemistry to Describe Movements in Freshwater [J]. *Transactions of the American Fisheries Society*, 132: 409~424.
- Wherwood G D and George A R. 2003. Influence of Swimming Form on Otolith $\delta^{13}\text{C}$ in Marine Fish [J]. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 258: 283~289.
- Zacherl A C, Georges A, et al. 2003. Barium and Strontium Uptake Into Larval Protoconchs and Statoliths of the Marine Neogastropod *Kelletia Kelletii* [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67: 4091~4099.
- Zeng Wannian. 2001. Life History and Evolution of Eel [J]. *National Science Council Monthly* 29: 592~596 (in Chinese).

附中文参考文献

- 曹 焯, 李胜荣, 杨良锋, 等. 2006. 白洋淀和密云水库野生鲤鱼耳石热释光特征研究 [J]. *岩石矿物学杂志*, 25(5): 449~454.
- 崔秀丽. 1999. 白洋淀水体富营养化污染源调查 [J]. *环境科学*, 16(增刊): 17~18.
- 杜桂森, 孟繁艳, 李学东, 等. 1999. 密云水库水质现状及发展趋势 [J]. *环境科学*, 20(20): 110~112.
- 葛晓立, 刘晓端, 潘小川, 等. 2003. 密云水库水体的地球化学特征 [J]. *岩矿测试*, 22(1): 44~48.
- 毛美洲, 刘子慧, 董惠茹. 1995. 府河-白洋淀水及沉积物的污染研究 [J]. *环境科学*, 16(增刊): 1~6.
- 王 璞, 潘兆鲁, 翁玲宝, 等. 1987. *系统矿物学* [M]. 北京: 地质出版社, 369~371.
- 王怡中, 刘季军, 胡 春, 等. 1995. 白洋淀地区水中有机污染物的定性分析 [J]. *环境化学*, 14(5): 442~447.
- 曾万年. 2001. 鳊鱼的生活史及演化 [J]. *科学发展月刊*, 29: 592~596.