

长江口窄脊江豚东亚亚种体内几种微量元素的含量及分布

徐添翼^① 姚思聪^① 樊明宁^① 唐文乔^{①②*}

① 上海海洋大学鱼类研究室 上海 201306; ② 上海市海洋动物系统分类与进化重点实验室 上海 201306

摘要: 为了弄清长江口窄脊江豚东亚亚种 (*Neophocaena asiaeorientalis sunameri*) 体内微量元素的积累和分布情况, 采用电感耦合等离子体质谱仪 (ICP-MS) 对 2014 年春季收集的 3 头雌性和 3 头雄性个体的心、肾、肝、肌肉、肺、胃和肠 7 种器官组织样品, 进行了锌 (Zn)、硒 (Se)、铜 (Cu)、钼 (Mo)、钴 (Co)、铬 (Cr)、锰 (Mn)、钒 (V) 和镍 (Ni) 9 种元素含量测定。结果显示, 按干重计算江豚体内 Zn、Cu 和 Se 的平均含量最高, 分别为 $(59.15 \pm 33.87) \mu\text{g/g}$ 、 $(15.85 \pm 15.07) \mu\text{g/g}$ 和 $(7.31 \pm 5.49) \mu\text{g/g}$; Cr 和 Mn 平均含量次之, 分别为 $(3.16 \pm 2.70) \mu\text{g/g}$ 和 $(2.35 \pm 2.94) \mu\text{g/g}$; Co、Mo、Ni、V 平均含量较少, 分别为 $(0.30 \pm 0.48) \mu\text{g/g}$ 、 $(0.19 \pm 0.30) \mu\text{g/g}$ 、 $(0.12 \pm 0.18) \mu\text{g/g}$ 和 $(0.04 \pm 0.12) \mu\text{g/g}$ 。研究发现, 肠道、肝和肾的微量元素含量普遍高于其他组织器官, 除 Cr 以外的其他微量元素在一些组织之间均存在显著性差异 ($P < 0.05$), 如 Zn ($P < 0.05$) 和 Mn ($P < 0.05$) 在肠道中的含量显著高于肌肉和心, Se 在肝 ($P < 0.05$) 和肾 ($P < 0.05$) 中的含量显著高于其余 6 种组织, Cu ($P < 0.05$) 和 Mo ($P < 0.05$) 在肝中的含量显著高于其余 6 种组织, Co ($P < 0.05$) 在肾中的含量显著高于肌肉, Ni 在胃壁 ($P < 0.05$) 和肠道 ($P < 0.05$) 中含量显著高于肌肉和肝。同时发现, Mn 和 Cr 的总体平均含量在雌雄性别间也存在一定差异, 其中 Mn 雄性显著大于雌性 ($P < 0.05$), Cr 则雌性显著大于雄性 ($P < 0.05$)。此外, 这 9 种元素在同一组织器官的不同江豚个体间也并不稳定, 个体间的平均变异系数达 121.08%。长江口水域窄脊江豚东亚亚种体内各组织器官内的元素含量总体上明显低于黄海、渤海的东亚亚种江豚和北部湾海域的印度洋江豚 (*N. phocaenoides*)。与人体相比, 长江口东亚亚种江豚体内 Zn、Se 和 Mo 的含量低于人体, Cu 和 Co 含量高于人体。

关键词: 长江口; 江豚; 微量元素; 组织分布

中图分类号: Q955 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3263 (2016) 01-22-11

Concentration and Distribution of Trace Elements in Finless Porpoise (*Neophocaena asiaeorientalis sunameri*) in Yangtze River Estuary

XU Tian-Yi^① YAO Si-Cong^① FAN Ming-Ning^① TANG Wen-Qiao^{①②*}

① Laboratory of Ichthyology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306; ② Key Laboratory of Marine Animal Taxonomy and Evolution,

基金项目 渔业种质资源保护项目 (316 豚类保护行动);

* 通讯作者, E-mail: wqtang@shou.edu.cn;

第一作者介绍 徐添翼, 男, 硕士研究生; 研究方向: 保护生物学; E-mail: xty1992310@163.com.

收稿日期: 2015-01-30, 修回日期: 2015-05-20 DOI: 10.13859/j.cjz.201601003

Shanghai Municipal Education Commission, Shanghai 201306, China

Abstract: In order to understand the accumulation and distribution of trace elements in finless porpoise (*Neophocaena asiaeorientalis sunameri*) inhabiting in the Yangtze River Estuary, we used inductively coupled plasma mass spectrometer (ICP-MS) to check the concentration of zinc (Zn), selenium (Se), copper (Cu), molybdenum (Mo), cobalt (Co), chromium (Cr), manganese (Mn), vanadium (V) and nickel (Ni) in heart, kidney, liver, muscle, lung, stomach and intestine sampled from 6 dead individuals (3 females and 3 males). All the trace elements listed above were detected in various tissue or organs except trace elements V. The average content of Zn, Cu and Se were higher than other elements by the dry weight (59.15 ± 33.87 , 15.85 ± 15.07 and 7.31 ± 5.49 $\mu\text{g/g}$). Overall, the trace elements were enriched in the intestine, liver and kidney than any tissues. Any trace element concentrated in different tissue was difference significantly ($P < 0.05$) except chromium (Cr) ($P > 0.05$, Table 7); We also detected that there was difference in the content of Mn and Cr in different gender of finless porpoise, the average content of Mn was higher in males than that in females ($P < 0.05$), while Cr was higher in females than that in males ($P < 0.01$). In addition, the content of each trace elements was unstable in the same tissues from different individuals. On average, the variation coefficient of trace elements between individuals was 121.08%. The content of elements in East Asian finless porpoise distributing in Yangtze River Estuary were less than that found in Yellow Sea and Bohai Sea, and also less than that in Indo-Pacific finless porpoise (*N. phocaenoides*) collected from Beibu Gulf. The content of Zn, Se, Mo in East Asian finless porpoise collected in Yangtze River Estuary were less than that in human body, and the content of Cu, Co were higher than that in human body.

Key words: Yangtze River Estuary; Finless porpoise (*Neophocaena asiaeorientalis sunameri*); Trace elements; Distribution in tissues

江豚 (*Neophocaena* sp.) 是一类分布在中国、韩国、日本、印度、巴基斯坦、爪哇群岛、波斯湾沿岸海域, 以及中国长江流域的小型齿鲸 (杨光等 1997)。在海洋哺乳动物学会 (The Society for Marine Mammalogy) 2011 年发布的名录中, 将江豚分为 2 个种, 即印度洋江豚 (Indo-Pacific finless porpoise, *N. phocaenoides*) 和窄脊江豚 (*N. asiaeorientalis*), 同时窄脊江豚又可分为东亚亚种 (*N. asiaeorientalis sunameri*) 和长江亚种 (*N. asiaeorientalis asiaeorientalis*) (Jefferson et al. 2011, Perrin et al. 2011)。印度洋江豚在我国南海有分布, 窄脊江豚东亚亚种在我国东海、黄海和渤海均有分布, 而长江亚种仅栖息于长江中下游及其大型通江湖泊, 种群数量正不断衰退 (张先锋等 1993, 郝玉江等 2006, 梅志刚等 2011)。长

江口位于长江与东海、黄海的交汇处, 是窄脊江豚 2 个亚种的重叠分布区。长江口不仅渔业资源丰富, 也是江豚种群分布密度最高的水域之一 (张先锋等 1993, 姚思聪等 2014)。但该水域航运繁忙、渔汛集中、渔捞活动频繁, 江豚死亡事件十分频繁 (魏凯等 2009, 姚思聪等 2014)。

长江口是西太平洋生态服务功能最重要的大河河口, 但由于环境污染等原因, 生态服务功能正日益衰退 (庄平等 2009)。重金属由于能够抑制体内各种酶的活性, 或取代必需金属元素, 而直接干扰或损害生物体的正常生理生化功能, 会对生物体产生急性或长期的毒理效应。水体重金属污染具有来源广、累积性强、不能降解、污染后不易被发现且难于恢复、容易被食物链富集放大等特点, 已成为严重影响

水生生物生存并威胁人类健康的最大污染物之一。窄脊江豚是长江口目前仅有的定居型鲸类和生态保护的旗舰物种(唐文乔 2003),检测江豚体内的微量元素含量,不仅有助于了解这一水域的水生态状况,还能为评价这种国家重点保护动物的健康状况提供有益的数据。目前国内学者已先后对野生窄脊江豚长江亚种(杨利寿等 1988)、黄海东亚亚种(周荣等 1993, 1996)、渤海东亚亚种(张淮城 1995, 张淮城等 1996)和北部湾海域印度洋江豚(王艳等 2008)个体的微量元素含量作过研究,杨健等(2005)对人工饲养条件下长江江豚体内锌、铜、铅等5种元素的积累状况作过研究,但未见有关长江口窄脊江豚微量元素的研究报道。本研究测定了长江口6头窄脊江豚东亚亚种遗骸体内的9种微量元素,并分析了其在不同器官组织中的分布状况,旨在为长江口江豚的保护和环境指示提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 材料

本实验所分析的6头江豚遗骸均为2014年3~5月在上海长江大桥以东的长江口水域

发现的死亡个体,具体的信息见表1。根据背鳍高度和疣粒区行数等特征鉴定,所得样本均属于窄脊江豚东亚亚种。取其下颌左侧齿骨中部的牙齿4~5颗作为年龄鉴定的材料,随后将江豚遗骸迅速带回实验室置-20℃冰柜保存。

样本解冻后,取心、肝、肾、肌肉、肺、胃壁和肠道7种器官组织用于微量元素的分析。具体取样方法参照张淮城等(1996)进行,肌肉取背中部,肝取中部,心取左心室部分,肺和肾取左侧的中部,胃壁取主胃,肠道取中段。样品分别放在多聚乙烯袋中,置于-80℃冰箱中保存至分析。

1.2 样品的前处理

用不锈钢解剖刀切取各组织样品适量,用匀浆器匀浆并称其湿重。为防止高温下组织内金属离子流失,将样品匀浆置于不锈钢筒中,先置于-20℃冰箱冷藏,再送至真空冷冻干燥机干燥至少72h至恒重,称其干重,计算各组织器官的干湿重比率。肌肉、胃壁、心、肝、肺、肾和肠道的干湿重比率分别为24.29%、24.78%、36.82%、23.52%、25.13%、22.69%和21.63%。

表1 窄脊江豚东亚亚种样本信息

Table 1 Information of finless porpoise samples

样本编号 Sample No.	采集时间(年-月-日) Collection date (year-month-date)	采集地点 Collection site	性别 Sex	体重(kg) Body weight	体长(cm) Body length	最大体围(cm) The largest body-round
1	2014-03-19	31°15'23"N 121°58'08"E	♂	35.4	139.0	85.5
2	2014-04-25	30°53'56"N 122°03'30"E	♂	25.6	130.5	84.6
3	2014-05-04	31°08'06"N 122°23'36"E	♀	30.8	110.4	80.7
4	2014-05-04	31°05'18"N 122°12'12"E	♀	33.5	126.5	84.4
5	2014-05-07	30°85'23"N 121°91'32"E	♂	41.2	148.6	158.2
6	2014-04-06	30°46'06"N 122°12'18"E	♀	39.3	130.0	90.3

按照国家标准 GB 17378.6-2007 和海洋行业标准 HY/T 132-2010 中的方法, 准确称取 0.1 g (3 次重复) 干样于 50 ml 聚四氟乙烯微波消解罐中, 加少许超纯水(电阻率 18.2 M Ω /cm, Milli-Q 超纯水仪, 美国 Millipore 公司)润湿后, 加入 9 ml HNO₃ 盖上表面皿, 待反应平稳后, 再加入 5 ml 30% H₂O₂, 加盖旋紧, 放入密闭式微波消解仪 (MARS5, CEM) 中, 按选定的工作条件消解。设置温度程序为梯度升温, 第一步为 120 $^{\circ}$ C, 升温时间 5 min, 保持 5 min; 第二步为 180 $^{\circ}$ C, 升温时间 5 min, 保持 15 min。待罐内温度与室温平衡后, 取出, 放气, 将样品消解液转入聚四氟乙烯烧杯中, 盖上表面皿, 置于电热板上于 120 ~ 140 $^{\circ}$ C 加热赶酸至约 0.5 ml, 取下稍冷, 将溶液全量转入 10 ml 具塞比色管中, 加超纯水至标线, 混匀。同步制备分析空白。浓硝酸和 30% 过氧化氢均为优级纯 (上海国药集团化学试剂有限公司)。

1.3 样品的测定与方法

1.3.1 电感耦合等离子体质谱仪工作条件 电感耦合等离子体质谱仪 (Agilent 7700 Series ICP-MS, Agilent technologies, USA), 雾化条件: C-FLOW (teflon) 同心雾化器, 半导体石英雾化室控温于 (2 \pm 0.1) $^{\circ}$ C, 石英一体化炬管, 2.5 mm 中心通道, 屏蔽炬; 等离子体条件: 射频功率 1 550 W, 载气流量 0.70 L/min, 补偿气流量 0.35 L/min; 冷却气流速 15.0 L/min; 辅助气流速 0.80 L/min; 雾化气流速 0.80 L/min; 雾化室温度 4 $^{\circ}$ C; 接口处: 采样锥 (Ni) 孔径 1 mm, 截取锥 (Ni) 孔径 0.4 mm, 采样深度 8.0 mm; 进样泵速 100 r/min; 进样冲洗时间 30 s; 单个元素积分时间 0.5 s。质谱仪条件, 碰撞池模式 He 流量为 4.0 ml/min, 跳峰采集 3 点扫描, 重复测定 3 次。

1.3.2 实验测定方法 采用电感耦合等离子体质谱仪 (ICP-MS) 测定样品中 9 种元素 Zn、Cu、Se、Mo、Cr、Mn、Co、V 和 Ni 含量, 测定全程加入试剂空白液、标准物 (锌、铜、硒、钼、铬、锰、钴、钒、镍标准溶液, 浓度

为 10 mg/L, 美国 Agilent 公司) (GBW 08571) 和内标液 (Bi、Ge、In、Li、Lu、Rh、Sc、Tb, 美国 Agilent 公司) 进行质量控制, 测得标准物各元素检出限均低于 0.001 μ g/g, 利用空白加标绘制标准曲线, 线性方程的相关系数 R^2 均大于 0.999, 相对标准偏差 RSD < 2%, 回收率均达 88% 以上。

1.4 数据分析

变异系数 (coefficient of variation, C_v) 的计算公式为: $C_v = S/M \times 100\%$, 式中, M 为微量元素含量的均值 (μ g/g), S 为微量元素含量的标准差。

利用 SPSS 19.0 统计软件中的 One-way ANOVA 方差分析和 Kruskal-Wallis 检验对窄脊江豚东亚亚种各组织器官中的微量元素含量进行统计检验分析。

2 结果

2.1 窄脊江豚东亚亚种体内微量元素的积累和分布

依据 9 种微量元素在窄脊江豚东亚亚种 7 种组织器官中的分布状况 (表 2), 其整体平均含量从高到低依次为 Zn、Cu、Se、Cr、Mn、Co、Mo、Ni、V。Zn 和 Cu 的含量要高于其余 7 种元素约 1 个数量级, 平均含量在 10.0 ~ 60.0 μ g/g 之间。Se 的平均含量为 (7.31 \pm 5.49) μ g/g; Cr、Mn 平均含量在 1.0 ~ 5.0 μ g/g 之间; Co、Mo、Ni 平均含量在 0.1 ~ 1.0 μ g/g 之间。而 V 的含量最低, 心、肺和肌肉中未能检测出, 含量低于检测限 0.001 μ g/g。

同一种元素在不同组织器官中的含量也存在一定差异。Zn、Mn、V、Ni 在肠道中含量最高, Se、Cu、Mo 在肝中含量最高, Co、Cr 在肾中含量最高。Zn、Cu、Mo、Co、Mn、V 在肌肉中的含量最低, 而 Se 在心脏中含量略低于肌肉, Cr 在胃壁组织中含量最低, 其余各组织含量比较接近, Ni 在肝中含量最低。

经 One-way ANOVA 方差分析, Zn ($P < 0.05$) 在肠道中的含量显著高于心、胃壁和肌

表 2 长江口江豚体内 7 种组织器官微量元素含量 ($\mu\text{g/g}$, 干重)
Table 2 Concentrations of trace elements in different tissues of finless porpoise from Yangtze River Estuary ($\mu\text{g/g}$, dry weight)

	平均值 \pm 标准差	范围	变异系数	心 Heart	肾 Kidney	胃壁 Stomach	肺 Lung	肌肉 Muscle	肠道 Intestine	肝 Liver	平均值
Zn	Mean \pm SD	37.84 \pm 5.90 ^a	71.28 ~ 34.42 ^{ab}	41.52 \pm 30.51 ^a	57.96 \pm 13.97 ^{ab}	30.81 \pm 18.67 ^a	98.87 \pm 50.97 ^b	75.78 \pm 16.48 ^{ab}	59.15 \pm 33.87	59.15	
	Range	32.48 ~ 45.35	45.54 ~ 122.04	6.17 ~ 77.65	59.05 ~ 69.33	18.53 ~ 58.34	65.80 ~ 161.75	64.90 ~ 95.90	59.15	59.15	
	Variation coefficient (C_v) (%)	18.88	54.82	79.74	8.08	61.27	41.68	19.16	56.86	56.86	
Se	Mean \pm SD	3.94 \pm 1.58 ^a	11.77 \pm 3.83 ^b	4.56 \pm 1.00 ^a	5.94 \pm 3.09 ^a	4.05 \pm 1.94 ^a	6.46 \pm 1.74 ^a	14.43 \pm 9.43 ^b	7.31 \pm 5.49	7.31	
	Range	2.34 ~ 6.55	8.53 ~ 19.19	3.17 ~ 6.12	3.20 ~ 11.37	2.32 ~ 7.62	4.22 ~ 8.03	6.50 ~ 32.67	7.31	7.31	
	Variation coefficient (C_v) (%)	40.10	32.54	21.93	52.02	47.90	26.93	65.35	75.10	75.10	
Cu	Mean \pm SD	10.90 \pm 2.64 ^a	13.98 \pm 3.99 ^a	10.75 \pm 5.63 ^a	16.83 \pm 24.08 ^a	6.59 \pm 2.57 ^a	10.07 \pm 3.84 ^a	41.81 \pm 13.74 ^b	15.85 \pm 15.07	15.85	
	Range	7.94 ~ 15.23	8.56 ~ 20.11	5.26 ~ 21.24	5.77 ~ 65.91	3.52 ~ 10.80	4.84 ~ 15.80	32.83 ~ 69.53	15.85	15.85	
	Variation coefficient (C_v) (%)	24.22	28.54	52.37	143.08	39.00	38.13	32.86	95.08	95.08	
Mo	Mean \pm SD	0.05 \pm 0.05 ^a	0.16 \pm 0.13 ^a	0.07 \pm 0.07 ^a	0.10 \pm 0.12 ^a	0.03 \pm 0.03 ^a	0.06 \pm 0.05 ^a	0.84 \pm 0.31 ^b	15.85 \pm 15.07	0.19	
	Range	BDL ~ 0.12	BDL ~ 0.32	BDL ~ 0.19	BDL ~ 0.28	BDL ~ 0.07	BDL ~ 0.10	0.22 ~ 1.07	0.19	0.19	
	Variation coefficient (C_v) (%)	100.00	81.25	100.00	120.00	100.00	83.33	36.90	157.89	157.89	
Co	Mean \pm SD	0.21 \pm 0.25 ^{ab}	0.70 \pm 1.01 ^b	0.33 \pm 0.44 ^{ab}	0.29 \pm 0.34 ^{ab}	0.06 \pm 0.09 ^a	0.35 \pm 0.42 ^{ab}	0.08 \pm 0.13 ^{ab}	0.30 \pm 0.48	0.30	
	Range	BDL ~ 0.52	0.19 ~ 2.76	BDL ~ 1.02	BDL ~ 0.37	BDL ~ 0.21	BDL ~ 1.07	BDL ~ 0.32	0.30	0.30	
	Variation coefficient (C_v) (%)	119.05	144.29	133.33	117.24	150.00	120.00	162.50	160.00	160.00	
Cr	Mean \pm SD	3.28 \pm 4.14 ^a	3.42 \pm 1.44 ^a	2.60 \pm 2.12 ^a	3.24 \pm 2.23 ^a	3.40 \pm 3.70 ^a	3.20 \pm 3.37 ^a	2.96 \pm 2.34 ^a	3.16 \pm 2.70	3.16	
	Range	0.41 ~ 9.62	2.54 ~ 5.50	BDL ~ 5.56	0.10 ~ 5.53	0.20 ~ 9.04	0.23 ~ 8.96	0.38 ~ 5.75	3.16	3.16	
	Variation coefficient (C_v) (%)	126.22	42.11	81.54	68.83	108.82	105.31	79.05	85.44	85.44	
Mn	Mean \pm SD	1.12 \pm 1.05 ^a	1.68 \pm 1.50 ^a	2.66 \pm 2.60 ^a	1.53 \pm 1.47 ^a	0.43 \pm 0.44 ^a	5.90 \pm 4.80 ^b	3.18 \pm 3.44 ^{ab}	2.35 \pm 2.94	2.35	
	Range	BDL ~ 2.78	0.34 ~ 3.68	0.37 ~ 7.22	BDL ~ 4.35	0.01 ~ 1.01	0.23 ~ 13.28	0.35 ~ 7.79	2.35	2.35	
	Variation coefficient (C_v) (%)	93.75	89.29	97.74	96.08	102.33	81.36	108.18	125.11	125.11	
V	Mean \pm SD	BDL	0.02 \pm 0.03	0.09 \pm 0.23	BDL	BDL	0.16 \pm 0.21	0.01 \pm 0.02	0.04 \pm 0.12	0.04	
	Range	BDL	BDL ~ 0.06	BDL ~ 0.56	BDL	BDL	BDL ~ 0.51	BDL ~ 0.04	0.04	0.04	
	Variation coefficient (C_v) (%)	—	150.00	255.56	—	—	131.25	200.00	184.20	184.20	
Ni	Mean \pm SD	0.15 \pm 0.16 ^{abc}	0.05 \pm 0.09 ^{ab}	0.25 \pm 0.22 ^{bc}	0.05 \pm 0.09 ^{ab}	0.04 \pm 0.07 ^a	0.28 \pm 0.28 ^c	0.02 \pm 0.03 ^a	0.12 \pm 0.18	0.12	
	Range	BDL ~ 0.36	BDL ~ 0.23	0.02 ~ 0.60	BDL ~ 0.22	BDL ~ 0.18	BDL ~ 0.78	BDL ~ 0.07	0.12	0.12	
	Variation coefficient (C_v) (%)	106.67	180.00	88.00	180.00	175.00	100.00	150.00	150.00	150.00	

BDL, 低于检测限, $< 0.001 \mu\text{g/g}$; “—” 表示没有数据。部分微量元素含量低于检测限, 在计算过程中将其含量视为 0 进行计算; 表中同一行数据上标相同字母表示差异不显著 ($P > 0.05$), 不同字母表示数据间差异显著 ($P < 0.05$)。

BDL, Below detection limit, $< 0.001 \mu\text{g/g}$; “—” No data. The content of some trace elements below the detection limit, it's content in the calculation process as a 0 to calculate. Within a row, these data with same superscript letter indicates no significant difference ($P > 0.05$), these data with different superscript letter indicates significant difference ($P < 0.05$).

肉。Mn ($P < 0.05$) 在肠道中的含量显著高于心、肾、胃壁、肺和肌肉。Se 在肝 ($P < 0.05$) 和肾 ($P < 0.05$) 中的含量显著高于肌肉和其他组织。Cu ($P < 0.05$) 和 Mo ($P < 0.05$) 在肝中的含量显著高于其余 6 种器官。Co ($P < 0.05$) 在肾中的含量显著高于肌肉。Ni 在胃壁 ($P < 0.05$) 和肠道 ($P < 0.05$) 中含量显著高于肌肉和肝。Cr 在各种组织中的含量均相差不大, 没有达到显著差异水平 ($P > 0.05$) (表 2)。

2.2 江豚体内微量元素的个体差异

6 头江豚各种组织器官中微量元素的含量范围及其变异系数见表 2。9 种元素在江豚 7 种组织中的平均变异系数达 121.08%, 其中以 Zn 的变异系数最小, 平均为 56.86%; V 的变异系数最大, 达 184.20%。Zn、Se、Cu、Cr 的平均变异系数在 75% ~ 95% 之间; Mo、Co、Mn、Ni 的平均变异系数在 125% ~ 160% 之间。由此可见, 在不同江豚个体间, Zn、Se、Cu、Cr 的含量差异较小, 而 Mo、Co、Mn、Ni、V 的含量差异较大。

表 3 列出了 6 头窄脊江豚东亚亚种微量元素的平均含量及 One-way ANOVA 方差分析结

果。编号 1 和 2 的江豚体内 Zn 的平均含量显著高于编号 3 和 6 的江豚 ($P < 0.05$); 编号 6 的江豚体内 Se 的平均含量显著高于其他江豚 ($P < 0.05$); 编号 4 的江豚体内 Cu 的平均含量显著高于编号 5 的江豚 ($P < 0.05$); 编号 4 和 5 的江豚体内 Mo 的平均含量显著高于编号 3 的江豚 ($P < 0.05$); 编号 5 的江豚体内 Co 的平均含量显著高于其他江豚 ($P < 0.05$); 编号 3 和 6 的江豚体内 Cr 的平均含量显著高于其他江豚 ($P < 0.05$); 编号 1、2、5 和 6 的江豚体内 Mn 的平均含量显著高于编号 3 和 4 江豚 ($P < 0.05$); 编号 2 和 5 的江豚体内 Ni 的平均含量显著高于编号 1、3 和 4 江豚的 ($P < 0.05$)。由于 V 元素含量极低, 并且在多个组织器官中未检测出, 故不予分析。

2.3 不同性别江豚体内微量元素的比较

图 1 显示了长江口海域 3 头雌性江豚和 3 头雄性江豚 7 种组织器官内的 9 种微量元素平均含量。Kruskal-Wallis 检验显示, Zn、Se、Cu、Mo、Co、Ni、V 元素的平均含量在雌雄性之间无显著性差异 ($P > 0.05$), 而 Mn 元素平均含量雄性显著大于雌性 ($P = 0.035 <$

表 3 长江口窄脊江豚东亚亚种不同个体器官中的微量元素平均含量和方差分析结果

Table 3 The average concentration of trace elements in soft tissues of different East Asian finless porpoise individuals from Yangtze River Estuary and results of one-way ANOVA

样本编号 Sample No.	平均含量 ($\mu\text{g/g}$, 干重) Average content ($\mu\text{g/g}$, dry weight)							
	Zn	Se	Cu	Mo	Co	Cr	Mn	Ni
1	86.427 ^d	6.531 ^a	14.042 ^{ab}	0.227 ^{ab}	0.235 ^a	0.668 ^a	2.965 ^b	0.069 ^a
2	74.355 ^{cd}	6.370 ^a	12.884 ^{ab}	0.201 ^{ab}	0.139 ^a	1.274 ^{ab}	3.199 ^b	0.182 ^b
3	43.950 ^a	5.129 ^a	19.675 ^{ab}	0.031 ^a	0.129 ^a	5.945 ^d	0.284 ^a	0.049 ^a
4	45.328 ^{ab}	7.419 ^a	21.813 ^b	0.268 ^b	0.105 ^a	1.718 ^b	0.890 ^a	0.036 ^a
5	62.282 ^{bc}	6.053 ^a	10.723 ^a	0.252 ^b	0.943 ^b	2.874 ^c	4.095 ^b	0.233 ^b
6	42.571 ^a	12.345 ^b	15.942 ^{ab}	0.132 ^{ab}	0.183 ^a	6.468 ^d	2.697 ^b	0.139 ^{ab}

表中同一列数据上标相同字母表示差异不显著 ($P > 0.05$), 不同字母表示数据间差异显著 ($P < 0.05$)。

Within a column, these data with same superscript letter indicates no significant difference ($P > 0.05$), those data with different superscript letter indicates significant difference ($P < 0.05$).

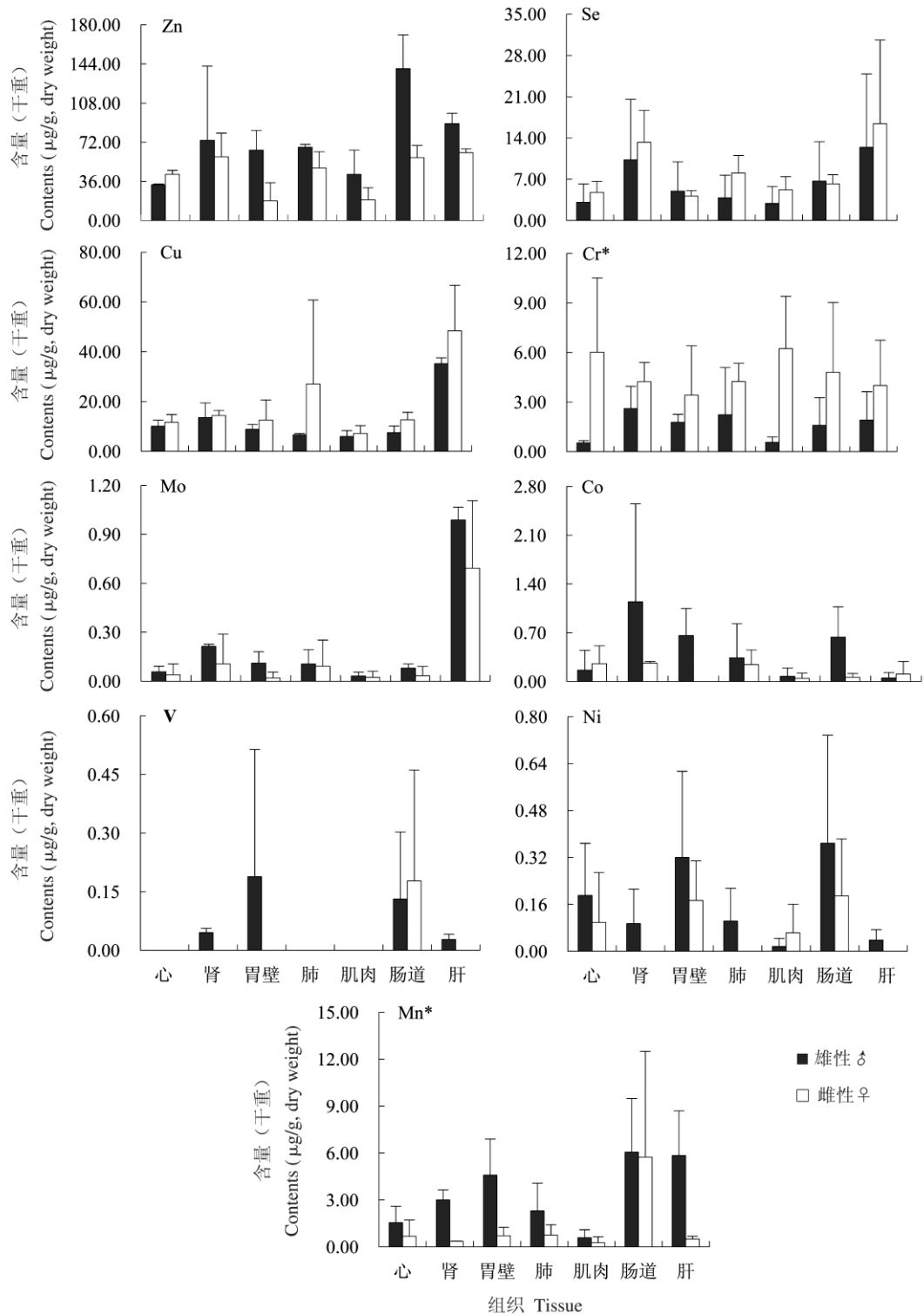


图 1 不同性别江豚体内各组织微量元素的平均含量

Fig. 1 The average concentration of trace elements in different gender of finless porpoise

心. Heart; 肾. Kidney; 胃壁. Stomach; 肺. Lung; 肌肉. Muscle; 肠道. Intestine; 肝. Liver.

图中“*”表示该微量元素在雌雄江豚之间具有显著性差异; *. Indicates significant difference found in different gender of finless porpoise.

0.05), Cr 元素平均含量则雌性显著大于雄性 ($P = 0.002 < 0.01$)。另外, Mn、Cr 在不同性别的江豚体内的含量次序也有所不同, Mn 元素含量, 雄性为肠 > 肝 > 胃 > 肾 > 肺 > 心 > 肌肉, 雌性为肠 > 肺 > 胃 > 心 > 肝 > 肾 > 肌肉; Cr 元素含量, 雌性为肌肉 > 心 > 肠 > 肺 > 肾 > 肝 > 胃, 雄性为肾 > 肺 > 肝 > 胃 > 肠 > 肌肉 > 心。

Kruskal-Wallis 检验显示, 同一元素在雌雄个体不同组织器官中的含量, Zn 在胃壁、肠道、肌肉中的含量雄性极显著大于雌性 ($P < 0.01$), Se 在肺、肌肉中的含量雌性显著大于雄性 ($P < 0.05$), Cu 在肺、肝中的含量雌性显著大于雄性 ($P < 0.05$), Mo 在胃壁、肠道、肝中的含量雄性显著大于雌性 ($P < 0.05$), Co 在肾、胃壁、肠道中的含量雄性显著大于雌性 ($P < 0.01$), Ni 在肾 ($P < 0.01$)、肺 ($P < 0.01$)、肠道 ($P < 0.05$) 中的含量雄性显著或极显著地大于雌性。

3 讨论

3.1 长江口窄脊江豚东亚亚种体内微量元素的含量评估

本研究表明, 长江口窄脊江豚东亚亚种体内不同元素的平均含量存在明显差异, Zn 和 Cu 的含量要明显高于其余 7 种微量元素, Se 含量次之, Cr、Mn 含量稍低, Co、Mo、Ni 含量最低。这种元素平均含量的分布趋势与其他水域的东亚亚种和印度洋江豚体内元素含量研究结果基本一致(周荣等 1993, 张淮城等 1996, 王艳等 2008)。但与其他研究结果相比, 长江口水域窄脊江豚东亚亚种体内各组织器官内的元素含量总体上明显低于黄海、渤海的东亚亚种江豚和北部湾海域的印度洋江豚(表 4)。

体内必需微量元素的浓度平衡, 对许多组织器官的生理功能发挥有着重要的促进作用。本研究发现, Zn、Mn、V、Ni 等元素均以肠道中的含量最高, 而 Se、Cu、Mo 在肝中含量最

高, Co、Cr 则在肾中含量最高。相反, Zn、Cu、Mo、Co、Mn、V 均在肌肉中含量最低, Cr 在胃壁中含量最低, 仅 Ni 元素在肝中含量最低。Zn、Co、Mn、Ni、Cu、Se 和 Mo 在各种组织中的含量均存在显著性差异 ($P < 0.05$), 只有 Cr 含量在不同组织间不存在显著性差异 ($P > 0.05$)。

研究也发现, 个别微量元素的平均含量在雌雄性别之间存在一定的差异。其中, Mn 元素含量雄性显著大于雌性 ($P < 0.05$), Cr 元素含量则雌性显著大于雄性 ($P < 0.01$)。这种差异是由雌性群体的生理需求造成的, 还是由于食物或生活环境差异造成的, 还需要进一步探究。除了同一个体不同组织器官间的差异, 这 9 种元素在同一组织器官的不同个体间也并不稳定, 平均变异系数达 121.08%。同时发现 Zn 的含量最高, 但变异系数却最小, 仅为 56.86%, 而 V 的含量最低, 但变异系数最大, 达 184.20%。

3.2 长江口江豚与人体几种必需微量元素含量的比较

1990 年 FAO/IAEA/WHO 三个国际组织的专家委员会确定碘、锌、硒、铜、钼、钴、铬及铁是人体必需的 8 种微量元素, 锰、硅、硼、钒及镍是人体可能必需的 5 种微量元素 (Bowman et al. 2008)。必需元素是指这类元素的摄入量减少至一定限值后, 总会导致一些重要生理功能的损伤; 或是该元素是体内活性物质有机结构的必需组成部分。表 5 列出了本文所研究的 Zn、Se、Cu、Mo、Co 和 Mn 元素含量在长江口东亚亚种江豚体内与人体组织中的分布状况。

锌 (Zn) 参与动物 70 种酶的生理活性, 锌的缺乏会导致动物体生长停滞, 生殖发育推迟, 伤口愈合不良以及蛋白质和核酸代谢也会受到影响。除了肺部与人体较为接近以外, 长江口江豚体内其他器官的 Zn 含量均明显低于人体。我们在调查中发现有较大比例的长江口江豚遗骸体表有大量伤口未完全愈合的状况

表 4 长江口与其他水域江豚微量元素平均含量的比较

Table 4 Comparison of the average concentration of trace elements in organs of finless porpoise collected from different region

海域 Sea areas	组织	平均含量 Average content (µg/g, 湿重 Wet weight)							
		Zn	Cu	Mn	Ni	Cr	Mo	V	Co
黄海 Yellow Sea (n = 16, 周荣等 1993) 东亚亚种江豚 East Asian finless porpoise 测定仪器 (Determination instrument): AAS	肝 Liver	37.55	13.57	4.19	0.22	—	—	—	—
	肾 Kidney	19.50	3.72	1.95	0.24	—	—	—	—
	肌肉 Muscle	18.20	1.98	1.40	0.29	—	—	—	—
	心 Heart	25.90	4.63	4.63	0.28	—	—	—	—
渤海 Bohai Sea (n = 10, 张淮城等 1996) 东亚亚种江豚 East Asian finless porpoise 测定仪器 (Determination instrument): ICP-OES	肝 Liver	66.70	17.42	4.58	0.04	—	0.55	0.08	0.05
	肾 Kidney	27.50	7.02	0.65	0.02	—	0.06	0.04	0.12
	肌肉 Muscle	19.00	2.48	0.18	0.05	—	0.02	0.06	0.06
	心 Heart	34.60	5.77	0.43	0.08	—	0.08	0.07	0.08
	肺 Lung	17.30	3.00	0.30	0.02	—	0.02	0.04	0.09
	肠道 Intestine	32.50	2.77	0.64	0.15	—	0.05	0.07	0.07
北部湾 Beibu Gulf (n = 11, 王艳等 2008) 印度洋江豚 Indo-Pacific finless porpoise 测定仪器 (Determination instrument): AAS	胃壁 Stomach	38.00	5.76	0.87	0.20	—	0.11	0.12	0.14
	肝 Liver	41.71	27.07	3.30	0.72	3.35	—	—	—
	肾 Kidney	20.05	5.53	0.30	0.35	2.19	—	—	—
	肌肉 Muscle	26.76	3.15	0.09	0.73	3.00	—	—	—
	心 Heart	37.88	6.32	0.79	0.72	4.19	—	—	—
	肺 Lung	21.66	2.51	0.26	0.57	3.17	—	—	—
长江口 Yangtze River Estuary (n = 6, 2014 年) 东亚亚种江豚 East Asian finless porpoise 测定仪器 (Determination instrument): ICP-MS	肠道 Intestine	38.22	4.71	0.37	0.66	2.81	—	—	—
	胃壁 Stomach	47.04	3.75	0.61	0.49	3.27	—	—	—
	肝 Liver	17.82	9.83	0.75	0.01	0.70	0.20	0.01	0.02
	肾 Kidney	16.17	3.17	0.38	0.01	0.78	0.04	0.01	0.16
	肌肉 Muscle	7.48	1.60	0.10	0.01	0.83	0.01	BDL	0.01
	心 Heart	13.93	4.01	0.41	0.06	1.21	0.02	BDL	0.08
肺 Lung	14.57	4.23	0.38	0.01	0.81	0.03	BDL	0.07	
	肠道 Intestine	21.39	2.18	1.28	0.06	0.69	0.01	BDL	0.08
胃壁 Stomach	10.29	2.66	0.66	0.06	0.64	0.02	0.02	0.08	

BDL. 低于检测限, < 0.001 µg/g 湿重; —: 表示没有数据; AAS. 原子吸收分光光度计; ICP-OES. 电感耦合等离子体直读光谱仪; ICP-MS. 电感耦合等离子体质谱仪。

BDL. Below detection limit, < 0.001 µg/g wet weight; —: No data; AAS. Atomic absorption spectrophotometer; ICP-OES. Inductive Coupled Plasma Optical Emission Spectrometer; ICP-MS. Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer.

The data of East Asian finless porpoise in Yellow Sea refer to Zhou R. et al. 1993, the data of East Asian finless porpoise in Bohai Sea refer to Zhang et al. 1996, the data of Indo-Pacific finless porpoise in Beibu Gulf refer to Wang et al. 2008.

(姚思聪等 2014), 这是否与江豚体内 Zn 缺乏有关还不得而知。

硒 (Se) 具有抗氧化、拮抗有害重金属、

调节维生素吸收与蛋白质合成、增强生殖能力等重要生理功能, 硒的缺乏会导致免疫能力下降。但动物体内不存在长期贮藏硒的器官, 机

表 5 几种必需和可能必需微量元素在长江口窄脊江豚东亚亚种与人体组织中的含量比较

Table 5 Comparison of the concentration of essential or maybe essential trace elements in the organs between East Asian finless porpoise from Yangtze River Estuary and human

组织 Tissue	种类 Species	Zn ($\mu\text{g/g}$, 湿重 Wet weight)	Se ($\mu\text{g/g}$, 湿重 Wet weight)	Cu ($\mu\text{g/g}$, 湿重 Wet weight)	Mo ($\mu\text{g/g}$, 干重 Dry weight)	Co ($\mu\text{g/g}$, 干重 Dry weight)	Mn ($\mu\text{g/g}$, 湿重 Wet weight)
肝 Liver	东亚亚种江豚 East Asian finless porpoise	17.82 \pm 3.88	3.39 \pm 2.22	9.83 \pm 3.23	0.84 \pm 0.31	0.08 \pm 0.03	0.75 \pm 0.04
	人类 Human	54.50 \pm 12.00	0.30 \pm 0.10	14.70 \pm 3.90	3.20 \pm 0.56	0.18 \pm 0.05	1.30 \pm 0.07
肾 Kidney	东亚亚种江豚 East Asian finless porpoise	16.17 \pm 7.81	2.67 \pm 0.86	3.17 \pm 0.91	0.16 \pm 0.03	0.70 \pm 0.31	0.38 \pm 0.11
	人类 Human	43.50 \pm 8.13	0.10 \pm 0.02	2.10 \pm 0.40	1.60 \pm 0.21	0.23 \pm 0.08	0.91 \pm 0.04
肌肉 Muscle	东亚亚种江豚 East Asian finless porpoise	7.48 \pm 4.53	0.98 \pm 0.47	1.60 \pm 0.62	0.03 \pm 0.02	0.06 \pm 0.05	0.10 \pm 0.01
	人类 Human	49.00 \pm 18.00	0.11 \pm 0.01	0.70 \pm 0.02	0.14 \pm 0.01	—	0.06 \pm 0.01
心 Heart	东亚亚种江豚 East Asian finless porpoise	13.93 \pm 2.17	1.45 \pm 0.58	4.01 \pm 0.97	0.05 \pm 0.01	0.21 \pm 0.05	0.41 \pm 0.02
	人类 Human	21.20 \pm 3.23	—	—	—	0.10 \pm 0.02	0.23 \pm 0.01
肺 Lung	东亚亚种江豚 East Asian finless porpoise	14.57 \pm 3.51	1.49 \pm 0.77	4.25 \pm 1.03	0.10 \pm 0.04	0.29 \pm 0.14	0.38 \pm 0.12
	人类 Human	17.00 \pm 3.42	0.10 \pm 0.02	2.20 \pm 0.20	0.15 \pm 0.03	—	0.24 \pm 0.02

表中东亚亚种江豚的数据为本研究的结果; 人体内 Zn、Mo、Co、Mn 元素含量参考 Schroeder et al. 1966, 1967a, b, 1970, Se 元素含量参考 Dickson 1967, Cu 元素含量参考 Smith 1967; “—” 表示没有数据。

The content of Zn, Se, Cu, Mo, Co, Mn in East Asian finless porpoise in the table were the results of our study. The content of Zn, Mo, Co, Mn in human body refer to Schroeder et al. 1966, 1967a, b, 1970, the content of Se in human body refer to Dickson 1967, the content of Cu in human body refer to Smith 1967. “—” No data.

体必须不断从饮食中获得。比较表明, 长江口江豚各器官内的 Se 含量普遍大于人体相应器官 1 个数量级, 这是否是江豚对复杂生活环境的一种适应性进化, 还是近年来对水污染加剧一种适应还有待于研究。

铜 (Cu) 对血液、中枢神经和免疫系统、骨骼组织等的发育和功能有重要影响。钴 (Co) 是维生素 B12 组成部分, 对刺激红细胞生成和甲状腺素的合成有重要作用 (Bowman et al. 2008)。除了肝, 江豚体内 Cu 和 Co 的含量均高于人体相应器官。江豚肺组织内所含的钼

(Mo) 含量与人体接近, 但其他组织内均较低。锰 (Mn) 含量在江豚和人体组织内的差异不大。**致谢** 赵振官实验师协助江豚遗骸的收集和解剖, 郭弘艺工程师帮助部分数据的分析, 特此深表谢意!

参 考 文 献

- Dickson R C, Tomlinson R H. 1967. Selenium in blood and human tissues. *Clinica Chimica Acta*, 16(2): 311–321.
- Jefferson T A, Wang J Y. 2011. Revision of the taxonomy of finless porpoises (genus *Neophocaena*): The existence of two species.

- Journal of Marine Animals and Their Ecology, 4(1): 3–16.
- Schroeder H A, Balassa J J, Tipton I H. 1966. Essential trace metals in man: Manganese: A study in homeostasis. *Journal of Chronic Diseases*, 19(5): 545–571.
- Schroeder H A, Balassa J J, Tipton I H. 1970. Essential trace metals in man: molybdenum. *Journal of Chronic Diseases*, 23(7): 481–499.
- Schroeder H A, Nason A P, Tipton I H, et al. 1967a. Essential trace metals in man: zinc. Relation to environmental cadmium. *Journal of Chronic Diseases*, 20(4): 179–210.
- Schroeder H A, Nason A P, Tipton I H. 1967b. Essential trace metals in man: Cobalt. *Journal of Chronic Diseases*, 20(11/12): 869–890.
- Smith H. 1967. The distribution of antimony, arsenic, copper and zinc in human tissue. *Journal of the Forensic Science Society*, 7(2): 97–102.
- Perrin (Chair) W F, Baker C S, Berta A, et al. 2011. List of Marine Mammal Species and Subspecies[EB/OL]. [2011-12-13]. http://www.marinemammalscience.org/index.php?option=com_content&view=article&id=420&Itemid=280.
- Bowman B A, Russell R M: 荫士安, 汪之頊, 王茵, 等译. 2008. 现代营养学. 北京: 人民卫生出版社.
- 郝玉江, 王丁, 张先锋. 2006. 长江江豚繁殖生物学研究概述. *兽类学报*, 26(2): 191–200.
- 梅志刚, 郝玉江, 郑劲松, 等. 2011. 长江江豚种群衰退机理研究进展. *生命科学*, 23(5): 519–524.
- 唐文乔. 2003. 长江口附近水生哺乳动物的记录 // 陈家宽. 九段沙湿地自然保护区科学考察集. 北京: 科学出版社.
- 王艳, 方展强, 周海云, 等. 2008. 北部湾海域江豚体内重金属含量及分布. *海洋环境科学*, 27(1): 63–66.
- 魏凯, 郭弘艺, 田芝清, 等. 2009. 长江口两头江豚遗骸的年龄及死因分析. *上海海洋大学学报*, 18(1): 111–114.
- 杨光, 周开亚. 1997. 中国水域江豚种群遗传变异的研究. *动物学报*, 43(4): 411–419.
- 杨健, 尹君, 许海伦, 等. 2005. 长江江豚锌、铜、铅、镉和砷的摄入与累积. *水生生物学报*, 29(5): 557–563.
- 杨利寿, 余多慰, 陆佩洪. 1988. 白鱀豚和江豚体内几种金属元素和有机氯的研究. *兽类学报*, 8(2): 122–127.
- 姚思聪, 樊明宁, 唐文乔, 等. 2014. 长江河口区江豚种群调查. *动物学杂志*, 49(2): 145–153.
- 张淮城. 1995. 渤海江豚体内汞的初步研究. *海洋环境科学*, 14(2): 33–38.
- 张淮城, 周荣, 周开亚, 等. 1996. 渤海江豚体内重金属的分布特征. *中国环境科学*, 16(2): 107–112.
- 张先锋, 刘仁俊, 赵庆中, 等. 1993. 长江中下游江豚种群现状评价. *兽类学报*, 13(4): 260–270.
- 周荣, 周开亚, 神谷敏郎. 1993. 中国青年环境论坛首届学术年会论文集. 北京: 中国环境科学出版社, 276–282.
- 周荣, 吴文军, 周开亚. 1996. 渤海江豚组织中钠、锶、镁、磷、钾的研究. *海洋环境科学*, 15(1): 28–34.
- 庄平, 刘健, 王云龙, 等. 2009. 长江口中华鲟自然保护区科学考察与综合管理. 北京: 海洋出版社.