

南海近岸搁浅死亡绿海龟和玳瑁重金属累积特征

李想^① 蹇丽^{②③*} 郭蕊^① 付敏玉^① 林柳^{①③} 汪继超^{①*}

① 热带岛屿生态学教育部重点实验室, 海南师范大学生命科学学院 海口 571158;

② 国家卫生健康委员会热带病防治重点实验室, 海南医科大学热带医学院 海口 571199;

③ 海龟生态学海南省野外科学观测研究站 三沙 573100

摘要: 重金属已广泛存在于海洋环境中, 海龟寿命长、对栖息地忠诚, 易长期累积重金属, 对其健康和繁殖构成威胁。本研究收集了南海近岸搁浅死亡的绿海龟(*Chelonia mydas*, $n=8$)和玳瑁(*Eretmochelys imbricata*, $n=3$)样本, 分析其肝、肾、肌肉和脂肪组织中 12 种重金属 (As、Cd、Cr、Cu、Fe、Hg、Mn、Ni、Ba、Sr、Pb 和 Zn) 的累积特征。结果表明, 绿海龟和玳瑁组织中 Fe (51.2 ~ 915.0 $\mu\text{g/g}$)、Zn (27.0 ~ 146.0 $\mu\text{g/g}$) 和 Cu (3.36 ~ 68.00 $\mu\text{g/g}$) 含量最高, Cd (0.013 ~ 1.500 $\mu\text{g/g}$)、Pb (0.027 ~ 0.159 $\mu\text{g/g}$) 和 Hg (0.009 ~ 0.326 $\mu\text{g/g}$) 含量最低。绿海龟肝和肾中绝大多数重金属的含量高于玳瑁, 这可能与不同栖息环境中污染程度不同有关。绿海龟和玳瑁的 4 种组织中, 绝大多数重金属的含量差异显著。Hg、Mn、Fe、Cu 在肝中含量最高, Pb、Cd 在肝和肾中含量最高, Ni 在肾中含量最高, As 在肌肉中含量最高, 而 Zn 在脂肪中含量最高。此外, 在 2 种海龟的肝、肾、肌肉和脂肪组织中, 一些非必需元素和必需元素之间存在显著相关关系 (如 Cd - Zn、Hg - Cu), 这些元素可能具有共同的来源或相似的解毒途径, 需进一步研究。

关键词: 绿海龟; 玳瑁; 重金属; 南海; 组织分配

中图分类号: Q955 文献标识码: A 文章编号: 0250-3263 (2025) 05-729-18

Accumulation Characteristics of Heavy Metals in Stranded Green Turtle and Hawksbill Turtle From the South China Sea Coast

LI Xiang^① JIAN Li^{②③*} GUO Rui^① FU Min-Yu^① LIN Liu^{①③} WANG Ji-Chao^{①*}

① Ministry of Education Key Laboratory for Ecology of Tropical Islands, College of Life Sciences, Hainan Normal University, Haikou 571158;

② National Health Commission Key Laboratory of Tropical Disease Control, School of Tropical Medicine, Hainan Medical University, Haikou

571199; ③ Sansha Provincial Observation and Research Station of Sea Turtle Ecology, Sansha 573100, China

Abstract: [Objectives] Heavy metals are widely present in the marine environment. Due to their long

基金项目 国家自然科学基金项目 (No. 32160135);

* 通讯作者, E-mail: jianli0622@163.com, wjc@hainnu.edu.cn;

第一作者介绍 李想, 女, 硕士研究生; 研究方向: 动物生态学; E-mail: 15049683727@163.com。

收稿日期: 2024-10-10, 修回日期: 2025-05-20 DOI: 10.13859/j.cjz.202524226 CSTR: 32109.14.cjz.24226

lifespans and habitat fidelity, sea turtles can accumulate heavy metals over time, which poses a threat to their health and reproduction. In recent years, the levels of certain heavy metals in the marine environment of the South China Sea have exhibited an upward trend. High concentrations of heavy metals have been detected in the tissues of stranded sea turtles in the northern South China Sea. However, there have been few studies on the accumulation of heavy metals in sea turtles in the coastal areas of Hainan Island and the Xisha Islands. These two areas are crucial foraging and nesting grounds for sea turtles in the South China Sea. **[Methods]** Between 2019 and 2022, eight Green Turtles *Chelonia mydas* and 3 Hawksbill Turtles *Eretmochelys imbricata* were collected by rescue organizations in Hainan Province. These stranded sea turtles were dissected, and the liver, kidney, muscle, and fat tissues were collected for measurement of the contents of 12 elements (Zn, Cu, Fe, Mn, Pb, Cd, Cr, Ni, Ba, Sr, As, and Hg). Principal component analysis and Friedman test were performed to examine variations in heavy metal contents among four tissues. Spearman's rank correlation coefficients were calculated to assess the relationships between heavy metals in the two species of sea turtles. Non-parametric Mann-Whitney *U* tests were employed to evaluate differences in cumulative heavy metal percentages between the two species. **[Results]** Fe, Zn, and Cu were the most abundant elements in sea turtle tissue, with concentrations ranging from 51.20 to 915.00 $\mu\text{g/g}$, 27.00 to 146.00 $\mu\text{g/g}$, and 3.36 to 68.00 $\mu\text{g/g}$, respectively. In contrast, Cd, Pb, and Hg were present at lower levels, with concentrations ranging from 0.013 to 1.500 $\mu\text{g/g}$, 0.027 to 0.159 $\mu\text{g/g}$, and 0.009 to 0.326 $\mu\text{g/g}$, respectively. In addition, the concentrations of heavy metals in the livers and kidneys of Green Turtles were higher than those in Hawksbill Turtles. This may be attributed to the different pollution levels of their habitats. Significant differences were observed in the concentrations of most elements among the four tissues of sea turtles: Hg, Mn, Fe, and Cu were the highest in the liver; Pb and Cd were the highest in the liver and kidney; Ni was the highest in the kidney; As was the highest in the muscle; and Zn was the highest in the fat (Figs. 1, 2). Furthermore, significant correlations were identified between certain non-essential and essential elements in the tissues of sea turtles (Appendix 5). These elements may share common origins or employ similar detoxification mechanisms in turtles, thereby necessitating further investigation. **[Conclusion]** In this study, we present the first report on the concentrations and tissue distribution of 12 heavy metal elements in turtles stranded along the coast of Hainan Island and the Xisha Islands in the South China Sea. These results offer a scientific basis for the environmental protection and management of sea turtle habitats in the South China Sea.

Key words: Green Turtle; Hawksbill Turtle; Heavy metals; South China Sea; Tissue distribution

近年来,由于广泛人为排放和大尺度输送,重金属已经成为海洋环境中普遍存在的污染物(Yousuf et al. 2022)。重金属化合物(如 Hg)具有生理毒性,在食物链中存在生物放大作用,对海洋生物的生理健康构成威胁(Mehouel et al. 2022)。海龟寿命长,对特定的栖息地极度忠诚,与其他脊椎动物相比,爬行动物代谢污染物的机制不发达(Hopkins et al. 2013),可通过食物链累积高浓度的有毒化学物质,对海龟的健康

和繁殖能力构成威胁(Duncan et al. 2019, Canzanella et al. 2021, Seco et al. 2021)。

海龟组织中重金属的累积已有很多报道,主要集中在少数元素(Zn、Cu、Hg、Pb 和 As)。不同种类海龟由于食性差异,重金属累积水平存在显著差异(Chan et al. 2025)。同一海区杂食性海龟重金属累积高于草食性海龟,如红海龟(*Caretta caretta*)组织中重金属(Hg、As)含量高于绿海龟(*Chelonia mydas*)(Cortés-Gómez

et al. 2017)。此外, 重金属在海龟体内的累积具有组织特异性。Cu 在海龟肝中含量较高, Cd 在肾中含量较高 (Andreani et al. 2008, da Silva et al. 2014, Cortés-Gómez et al. 2017), 这些元素能与肝和肾中金属硫蛋白结合, 以保护组织免受重金属毒性作用 (da Silva et al. 2014)。但是, 现有研究关于 Zn、Mn、As 等元素在海龟组织中分布的结论并不一致 (Gardner et al. 2006, Canzanella et al. 2021), 可能与栖息地重金属污染背景及海龟的生理过程和发育状态有关 (Tanabe et al. 2022, Chan et al. 2025)。Shaw 等 (2021) 发现, 圈养绿海龟体内的重金属 (如 Cu、As、Cr) 累积高于野外生存的绿海龟。因此, 调查不同海区海龟不同组织中重金属污染物的累积和分布, 对于海龟的保护及毒理学研究具有重要意义。

南海拥有我国 90% 的海龟资源 (以绿海龟为主), 近年来南海海龟种群数量急剧下降 (牟剑锋等 2013), 海洋污染成为海龟受胁因素之一。南海海洋环境中一些重金属 (如, Cd、Zn、Pb、Cu、Cr) 呈增加趋势 (金路等 2011)。Ng 等 (2018) 发现, 我国香港近岸搁浅绿海龟组织中 Pb、Ba 和 Cd 含量较 10 年前增加了 10~40 倍, Zn 含量远高于世界其他海区的绿海龟。我国海南岛及西沙群岛近岸为南海海龟重要的觅食地和产卵场地 (Jia et al. 2019), 但关于海龟体内污染物的累积鲜有报道。因此, 本研究收集了海南岛及西沙群岛近岸搁浅死亡的绿海龟和玳瑁 (*Eretmochelys imbricata*) 样本, 分析其组织中重金属累积水平, 探讨重金属在不同种类海龟及不同组织中的分布规律, 为南海海龟的栖息地环境保护和管理提供科学依据。

1 材料与方 法

于 2019 至 2022 年, 从海南省海口 (19°59' N, 110°20' E)、琼海 (18°58' ~ 19°28' N, 110°07' ~ 110°40' E)、陵水 (18°30' N, 110°01' E) 和三沙 (9°35' ~ 9°47' N, 114°14' ~ 114°33' E) 各海龟救助机构收集经救助后死亡的海龟和野外

非正常死亡的海龟样本, 冷冻保存运至实验室。共收集样本 11 只 (附录 1), 包括绿海龟 8 只, 玳瑁 3 只。待样品解冻后, 参照《海龟解剖》(夏中荣等 2016) 方法解剖取出肝、肾、脂肪和肌肉 4 种组织, 置于聚乙烯密封袋中, -20 °C 冷冻保存待分析。

1.1 重金属前处理和分析测试

将绿海龟和玳瑁 4 种组织用 Alpha 1-2LDplus 冷冻干燥机 (Marin Christ 公司, 德国) 处理, 冻干后的组织样用玛瑙研钵磨碎, 装入聚乙烯密封袋中, 4 °C 保存待分析。取冻干磨碎后的样品 (0.5000 ± 0.0005) g, 置于消解罐中, 加入 8 ml 68% 硝酸 (优级纯, Anaqua, 美国), 用 TOPEX 微波消解仪 (上海屹尧分析仪器有限公司) 辅助消解。升温程序为: 3 min 升温至 80 °C, 3 min 升温至 110 °C, 3 min 升温至 130 °C, 3 min 升温至 150 °C, 3 min 升温至 170 °C, 30 min 升温并停留至 190 °C, 消解方法参考 Lacerda 等 (2020)。待消解罐冷却, 将消解液置于电热板中赶酸至 1 ml (98 °C), 用去离子水定容至 20 ml, 4 °C 保存待分析。消解液中 Zn、Cu、Fe、Mn、Pb、Cd、Cr、Ni、Ba、Sr 用 X Series 2 电感耦合等离子体质谱仪 (赛默飞世尔科技有限公司, 美国) 进行测定; As 和 Hg 用 AFS-3000 原子荧光光谱仪 (北京海光仪器有限公司) 进行测定。Cr、Mn、Sr、Fe、Ni、Cu、Zn、Cd、Pb、As、Hg 和 Ba 的检出限分别为 0.005、0.005、0.05、0.05、0.002、0.01、0.01、0.001、0.002、0.02、0.001 和 0.013 $\mu\text{g/g}$ 。

1.2 质量控制与质量保证

每 12 个样品中添加一个试剂空白和样品平行样, 保证分析方法的准确性和可靠性。试剂空白中有痕量的重金属元素检出, 含量都远低于绝大部分样品含量的 10%, 样品最终浓度经空白扣除; 每 12 个样品平行样中添加一个平行样, 不同目标元素的相对标准偏差都小于 15%。用黄鱼粉元素标准物质 (GBW10253) 对海龟组织样品的消解方法进行检验, Cr、Mn、Fe、Ni、Cu、Zn、Sr、Cd、As、Pb、Hg 和 Ba

的回收率 (%) 分别为 104.0 ± 7.6 、 93.0 ± 6.9 、 86.0 ± 3.8 、 97.3 ± 12 、 110.0 ± 7.3 、 99.0 ± 7.8 、 94.0 ± 5.2 、 112.0 ± 7.7 、 111.0 ± 5.4 、 98.0 ± 7.6 、 96.0 ± 3.4 和 100.3 ± 4.9 。

1.3 文献数据收集

收集全球范围内有关海龟体内重金属元素的文献, 对 2024 年 6 月前收录于 PubMed、Google Scholar 和知网数据库所有可用的文章标题、摘要和关键字字段进行检索。第一次搜索使用“海龟”或“绿海龟”“玳瑁”与“无机元素”“金属”“重金属”“微量元素”关键词的不同组合, 根据相关性摘录数据, 将其整合为其他地区绿海龟、玳瑁重金属元素含量(附录 2)。第二次检索, 使用关键词“海藻/海草”“沉积物”“海水”“环境”与“无机元素”“金属”“重金属”“微量元素”进行组合, 摘录符合本文类型的数据组成海龟主要分布区域环境样品重金属值(附录 3)。发现可用文献共 17 篇, 其中, 海龟相关 6 篇, 海水 3 篇, 沉积物 8 篇, 海藻/海草 6 篇。也尝试搜索其他关键词, 但是并未显示任何可用结果。此外, 有研究表明, 海龟雌性与雄性之间组织金属富集量没有显著差异 (da Silva et al. 2014), 若文献结果按性别划分, 本文则报告雌雄海龟组织中重金属含量的平均值。

1.4 数据统计分析

使用 SPSS 23.0 软件对海龟组织中重金属含量数据进行正态检验, 数据不呈正态分布, 用中位数(最小值 ~ 最大值)表示(附录 4)。对海龟组织中重金属元素含量进行对数 (lg) 转化后, 用主成分分析 (principal component analysis) 研究重金属组织分配特征。将 2 种海龟组织数据进行混合, 使用 Spearman 相关系数分析组织中元素之间相关性。采用曼-惠特尼 U 检验分析 2 种海龟的组织内重金属累积百分比差异。运用 Friedman 检验和事后成对比较方法分析 4 种组织中元素的差异性。使用 Origin 18.0 软件进行绘图。

2 结果

2.1 两种海龟组织中重金属累积

海龟组织中不同元素的含量存在较大差异(图 1, 2)。必需元素 Fe ($51.2 \sim 915.0 \mu\text{g/g}$)、Zn ($27.1 \sim 146.0 \mu\text{g/g}$) 和 Cu ($3.36 \sim 68.00 \mu\text{g/g}$) 是 2 种海龟组织中主要存在的元素, 累积百分含量高于 98.6%; 而 Cd ($0.013 \sim 1.500 \mu\text{g/g}$)、Pb ($0.027 \sim 0.159 \mu\text{g/g}$) 和 Hg ($0.010 \sim 0.326 \mu\text{g/g}$) 在 2 种海龟组织中累积百分含量均低于 0.2%。对比 2 种海龟组织中重金属的含量, 绿海龟肝和肾组织中绝大多数重金属含量均高于玳瑁肝

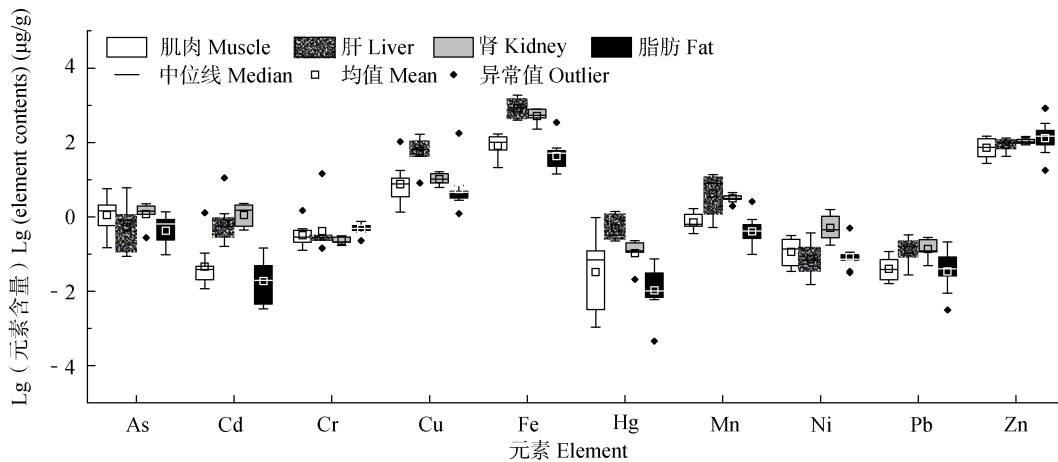


图 1 绿海龟组织中重金属元素含量

Fig. 1 Heavy metal contents in Green Turtle *Chelonia mydas* tissues

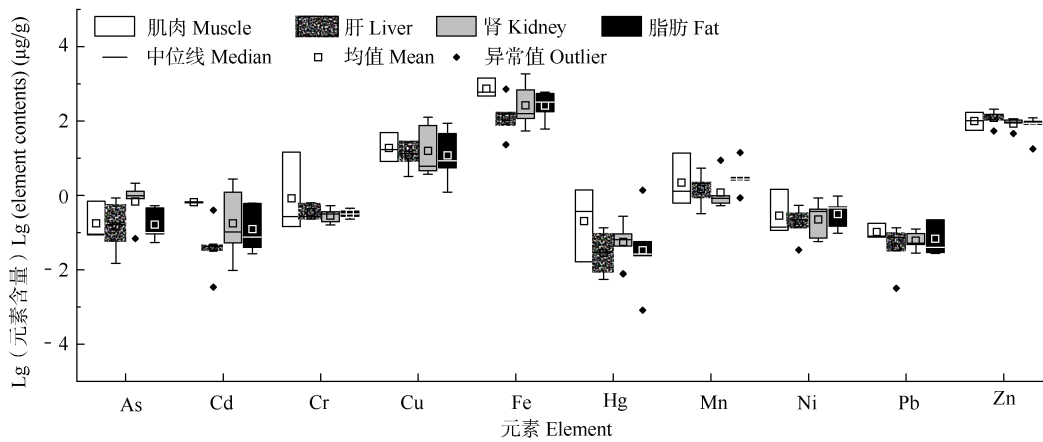


图 2 玳瑁组织中重金属元素含量

Fig. 2 Heavy metal contents in Hawksbill Turtle *Eretmochelys imbricata* tissues

和肾组织 (1.04 ~ 14.70 倍) (附录 3)。其中, 绿海龟肝中 Cu (68.0 $\mu\text{g/g}$) 和 Fe (915 $\mu\text{g/g}$) 的含量显著高于玳瑁肝中 Cu (4.60 $\mu\text{g/g}$) 和 Fe (468.00 $\mu\text{g/g}$) 的含量 ($U = 5.0, P = 0.030$); 绿海龟肾中 Ni (0.51 $\mu\text{g/g}$) 含量显著高于玳瑁肾中 Ni (0.10 $\mu\text{g/g}$) 的含量 ($U = 3.5, P = 0.030$); 绿海龟肌肉中 Cu 含量 (8.11 $\mu\text{g/g}$) 是玳瑁肌肉

中 Cu (4.57 $\mu\text{g/g}$) 含量的 3 倍 ($U = 2.0, P = 0.028$)。玳瑁肌肉中大多数重金属 (Hg、Pb、As、Mn、Zn、Fe 和 Ba) 是绿海龟肌肉中的 1.05 ~ 1.90 倍, 但差异不显著。

2.2 两种海龟组织中重金属分布特征

总体看, 大多数被测重金属在海龟组织中的分布存在差异显著 (表 1)。其中, Fe 和 Hg

表 1 绿海龟和玳瑁组织中重金属的含量 (单位: $\mu\text{g/g}$, 干重)Table 1 Concentrations of heavy metals in tissues of *Chelonia mydas* and *Eretmochelys imbricata*(Unit: $\mu\text{g/g}$, dry weight)

元素 Element	肝 Liver	肾 Kidney	肌肉 Muscle	脂肪 Fat
Hg	0.275 ^a (0.250 - 1.110)	0.110 ^{ab} (0.473 - 0.161)	0.098 ^b (0.003 - 0.128)	0.010 ^b (ND - 0.019)
Pb	0.134 ^a (0.091 - 0.203)	0.102 ^{ab} (0.053 - 0.169)	0.049 ^b (0.024 - 0.089)	0.028 ^{ab} (0.009 - 0.084)
Cd	0.378 ^a (0.309 - 0.807)	0.819 ^a (0.492 - 1.650)	0.032 ^b (0.172 - 0.044)	0.011 ^b (0.004 - 0.071)
Ni	0.038 ^b (0.025 - 0.139)	0.174 ^a (0.098 - 0.729)	0.150 ^{ab} (0.049 - 0.252)	0.071 ^a (0.033 - 0.096)
Cr	0.264 ^a (0.241 - 0.314)	0.286 ^a (0.208 - 0.362)	0.238 ^a (0.199 - 0.436)	0.448 ^a (0.332 - 0.584)
As	0.338 ^b (0.100 - 1.050)	0.908 ^{ab} (0.534 - 1.700)	1.160 ^a (0.538 - 2.080)	0.639 ^{ab} (0.241 - 0.927)
Mn	2.570 ^{ab} (2.100 - 11.200)	3.110 ^a (1.630 - 4.460)	0.625 ^{bc} (0.560 - 1.180)	0.324 ^{bc} (0.107 - 0.618)
Zn	92.5 ^a (27.1 - 106.0)	94.7 ^a (62.7 - 120.0)	77.7 ^a (41.9 - 126.0)	126.0 ^a (87.1 - 209.0)
Fe	484.0 ^a (403.0 - 1 450.0)	520.0 ^a (229.0 - 709.0)	106.0 ^b (63.6 - 141.0)	51.2 ^b (15.9 - 65.1)
Cu	47.20 ^a (4.60 - 87.60)	8.16 ^a (3.45 - 11.80)	5.91 ^a (3.47 - 10.90)	4.55 ^a (3.20 - 4.87)

数据表示为中位数 (四分位数 25% ~ 75%)。ND 为低于检出限。上标 a、b、c 表示组织间差异: 相同字母标识的组间差异不显著 ($P > 0.05$), 不同字母标识的组间差异显著 ($P < 0.05$)。

The data are expressed as the median (25% - 75% quartiles). ND indicates the concentration below the detection limit. Superscripts a, b, and c denote significant differences between tissues. No significant differences observed between groups are marked with the same letter ($P > 0.05$), whereas significant differences noted between groups are marked with different letters ($P < 0.05$).

在 2 种海龟的肝含量最高，显著高于肌肉和脂肪 (Fe: $df_{\text{肝-肌肉}} = 3, Q = 2.000, P = 0.002$; $df_{\text{肝-脂肪}} = 3, Q = 2.273, P = 0.001$; Hg: $df_{\text{肝-肌肉}} = 3, Q = 1.800, P = 0.011$; $df_{\text{肝-脂肪}} = 3, Q = 2.500, P = 0.001$)。Pb 在肝中含量高于肌肉 ($df = 3, Q = 1.700, P = 0.019$)；Cd 在肝和肾中含量显著高于肌肉和脂肪 ($df_{\text{肝-肌肉}} = 3, Q = 1.600, P = 0.034$; $df_{\text{肝-脂肪}} = 3, Q = 1.800, P = 0.011$; $df_{\text{肾-肌肉}} = 3, Q = 1.800, P = 0.011$; $df_{\text{肾-脂肪}} = 3, Q = 2.000, P = 0.003$)；Ni 在肾中含量最高，显著高于脂肪和肝 ($df_{\text{肾-脂肪}} = 3, Q = 1.773, P = 0.008$; $df_{\text{肾-肝}} = 3, Q = 1.955, P = 0.002$)。此外，As 在肌肉中的含量最高，显著高于肝 ($df = 3, Q = 1.455, P = 0.049$)，但与肾 ($df = 3, Q = 0.910, P = 1.000$)和脂肪 ($df = 3, Q = 0.636, P = 1.000$)组织中的差异不显著。Zn ($df = 3, Q = 3.545, P = 0.315$)、Cr ($df = 3, Q = 5.972, P = 0.113$)、Cu ($df = 3, Q = 4.636, P = 0.200$)的含量在 4 种组织中差异不显著。

主成分分析结果表明，由 Hg、Pb、Cd、Mn、Fe 和 Cu 构成的金属元素簇为第一主成分 (PC1)，占总方差的 38.2%，负载值大于 0.36，

这些元素主要在肝和肾中累积。As 属于第二主成分(PC2)，占总方差的 14.5%，负载值为 0.68，在肌肉中含量相对较高 (表 2，图 3)。说明重金属在海龟组织中的分布具有特异性。

表 2 主成分分析海龟组织中重金属元素负载值
Table 2 Principal component analysis of heavy metal loading in sea turtle tissues

重金属 Heavy metal	PC1 (38.2%)	PC2 (14.5%)
Hg	0.36	- 0.29
Pb	0.36	- 0.05
Cd	0.40	0.31
As	- 0.04	0.68
Cr	- 0.05	- 0.47
Ni	0.17	0.12
Mn	0.41	0.14
Zn	0.12	- 0.21
Fe	0.46	0.06
Cu	0.40	- 0.19

进一步分析海龟组织中重金属之间存在的相关关系 (附录 5)。海龟组织中一些生命必需元素和非必需元素之间存在显著相关关系。如，肝中 Ni 和 Cd ($r = 0.863, P = 0.000 1$)、Zn 和

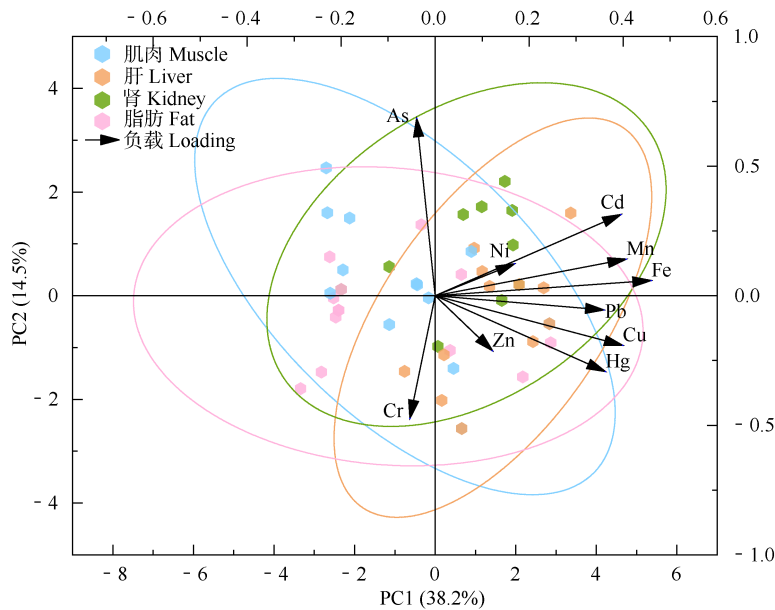


图 3 海龟组织中重金属元素的主成分图

Fig. 3 Principal component diagram of heavy metals in sea turtle tissues

Cd ($r = 0.566$, $P = 0.044$)、Pb 和 Mn ($r = 0.621$, $P = 0.024$), 肾中 Ni 和 As ($r = 0.800$, $P = 0.003$), 脂肪中 Cu 和 Hg ($r = 0.599$, $P = 0.024$)、Cr 和 Cd ($r = 0.768$, $P = 0.001$), 肌肉中 Hg 和 Fe ($r = 0.702$, $P = 0.008$) 均存在显著相关性。一些必需元素之间也存在显著正相关关系, 如肝、肾和肌肉组织中 Cu、Fe 和 Zn 元素含量之间大都相关性显著 (肝 Zn-Cu: $r = 0.835$, $P = 0.0004$, Fe-Cu: $r = 0.637$, $P = 0.019$; 肾 Zn-Fe-Cu: r 为 $0.645 \sim 0.709$, P 为 $0.015 \sim 0.032$)。

3 讨论

3.1 南海两种海龟重金属累积与其他地区的比较

海龟体内重金属的累积与栖息环境污染水平有关 (Anan et al. 2001, Cortés-Gómez et al. 2017)。因此, 将南海海龟组织中重金属含量与其他海区进行了比较 (附录 2)。其中, 我国南海绿海龟组织中重金属含量高于墨西哥下加利福尼亚半岛绿海龟组织, 肝中 Mn 和 Fe 含量分别为其 131.3 和 63.8 倍; 肾中 Fe 和 Pb 含量分别其 12.2 和 12.4 倍; 肌肉中 Mn 和 Cu 含量分别为其 212 和 270 倍; 脂肪中 Mn、Fe 和 Cu 含量分别为其 138、20 和 455 倍 (Gardner et al. 2006)。此外, 我国南海绿海龟肝中 Cd 含量显著高于其他地区, 是巴西巴伊亚海岸绿海龟肝的 33.7 倍 (de Macêdo et al. 2015), 是日本冲绳县八重山群岛绿海龟肝的 32.6 倍 (Anan et al. 2001)。而香港近岸搁浅绿海龟肝中的 Pb、Cd、Ni 是本研究的 54.1、75.3 和 21.6 倍 (Ng et al. 2018)。进一步收集了绿海龟主要分布区域 (包括中国、澳大利亚、墨西哥和地中海等海区) 的海水、沉积物和海藻中的重金属含量 (附录 3)。澳大利亚昆士兰州大堡礁海区的重金属含量最低 (Haynes et al. 2000), 污染程度较其他海区小。地中海 (Pike 2013) 和我国海南岛海区重金属含量相对较高 (如海藻中 Fe、沉积物中 Cd、海水中 Mn)。Yang 等 (2022) 发现, 香港附近海水中 6 种重金属 (Ni、Cu、As、Cd、

Cr、Hg) 均高于南海中部及海南岛近岸海水。此外, 本研究收集的绿海龟大多在救助期间死亡, 救助站海水为城市近岸抽取, 可能受人为活动污染 (金路等 2011), 且饲料中可能含有 Pb、Cd、Cr、Cu、Zn 等元素 (Sarkar et al. 2022), 进一步影响了绿海龟组织中重金属的累积。

本研究玳瑁组织中绝大多数重金属含量低于或与世界其他海区玳瑁组织中的含量在同一数量级 (附录 2)。其中, 巴西巴伊亚海岸玳瑁组织比我国南海玳瑁组织中重金属含量高, 肝和肾中 Cd 分别为其 60.2 和 118.5 倍 (de Macêdo et al. 2015)。日本八重山海区玳瑁组织比我国南海玳瑁组织中重金属含量高, 肝中 Cd 含量为其 21.1 倍, 肾中 Hg、Cd 含量分别为其 14.2 和 145.7 倍 (Anan et al. 2001)。墨西哥下加利福尼亚半岛玳瑁组织比我国南海海南岛玳瑁组织中重金属含量高, 肝和肾中 Ni 含量分别为其 147.6 和 16.5 倍, 肌肉和脂肪中 Cd 含量分别为其 56.7 和 33.1 倍 (Gardner et al. 2006)。这可能与栖息环境污染有关, 日本近岸海藻中 Cd 含量是我国海南岛近岸海藻的 9.5 倍。此外, 墨西哥南加州海湾海藻中 Cd 含量是我国海南岛海藻的 4.4 倍, 而该海湾沉积物中 Ni 含量是我国海南岛沉积物的 26.9 倍 (附录 3)。

3.2 绿海龟和玳瑁重金属累积差异

亚成体和成体绿海龟主要以海草和海藻为食 (Velasquez-Vacca et al. 2024), 玳瑁主要以底栖无脊椎动物和藻类为食 (Martínez-Estévez et al. 2022)。一般而言, 同一海区杂食性海龟组织中重金属含量高于草食性海龟 (Cortés-Gómez et al. 2017)。而本研究中绿海龟肝和肾中绝大多数重金属含量高于玳瑁, 如 2.2 所述。本研究绿海龟样本来自海龟救助站 (救助救护期间死亡), 玳瑁海龟为野外非正常死亡。Show 等 (2021) 发现, 圈养绿海龟体内重金属 (V、Cu、Se、As、Cr) 累积高于野外生存海龟。海龟救助站一般抽取城市近岸海水来圈养救助海龟, 其中的重金属浓度可能高于野外觅食栖息地。Cai 等 (2023) 表明海南岛近

岸海水环境污染程度向离岸方向递减，人为活动排放可能导致重金属（Cu、Pb、Zn、Cr、Ni）累积在近岸海水中。此外，养殖饲料中含有不同比例重金属（Pb、Cd、Cr、Cu、Zn）（Sarkar et al. 2022），可能导致本研究中圈养过的绿海龟肾和肝中大多数重金属高于玳瑁。本研究还发现玳瑁肌肉中多数重金属含量高于绿海龟。肝和肾是重金属的代谢器官，可能反映了污染物近期暴露水平（Aguirre et al. 1994），而动物肌肉则反映污染物长期累积的结果（Blanco et al. 2014）。野外生存的杂食性玳瑁营养级相对植食性绿海龟高，累积的污染物水平也较高。因此，绿海龟肌肉中重金属含量可能反映了搁浅前在野外的污染物暴露水平。

3.3 重金属元素在组织中的分布

本研究结果显示，绿海龟和玳瑁 4 种组织中大多数重金属含量差异显著。da Silva 等（2014）的研究也得出了类似的结论。本研究发现海龟肝中 Cu 含量最高，脂肪中 Zn 含量最高。Cu 可以诱导活性氧的产生，负责脂质、蛋白质和 DNA 的氧化，过量 Cu 会与金属硫蛋白结合，以无毒形式储存在肝中（Andreani et al. 2008）。Sakai 等（2000）发现，超过 10% 的总 Zn 储存在脂肪中，可能与色素蛋白有关。此外，Mn 是酶的必需辅因子（Anan et al. 2001），肝和肾中 Mn 含量高，但是其在海龟体内的累积作用尚不清楚（Ley-Quiñónez et al. 2013）。Fe 在海龟组织中通过与蛋白质螯合，与血浆转铁蛋白结合，以铁蛋白的形式在细胞内积累，防止过量 Fe 影响生命活动（Cortés-Gómez et al. 2017）。本研究中海龟肾中 Cd 含量最高，能与金属硫蛋白结合，与大多数研究报道一致（Barbieri 2009, Canzanella et al. 2021, Abdallah et al. 2023）。Hg 在海龟肝中含量最高，Hg 累积与海龟肿瘤疾病、麻痹、免疫力下降及内分泌失调等症状有关（Bezerra et al. 2015）。Pb 会优先积累在骨骼中，其次是肝和肾（Eisler 1988），与海洋动物癌症的发生相关（McAloose et al. 2009）。

本研究还发现，海龟组织中一些非必需与必需元素存在相关关系，如海龟肝中 Cd 和 Zn、脂肪中 Hg 和 Cu 显著相关（附录 5）。一些非必需元素化学性质与必需元素相似，可通过动物对必需元素的吸收进入生物体内。如 Cd、Hg 与 Zn 化学性质相似，可通过 Zn 吸收通道进入生物体内（Wang et al. 2023）。海龟组织中金属元素之间存在相关性也可能与解毒机制有关。Yamamura 等（1984）在绿海龟肝中发现 3 种金属硫蛋白异构体，Andreani 等（2008）发现 Cd、Zn 和 Cu 在肝和肾中的累积量与金属硫蛋白含量有关。此外，海龟组织中存在相关性的重金属也可能有共同的污染来源。本研究还发现海龟组织中 Pb 和 Mn，Cd 和 Cr、Ni，以及 Mn 和 Cr、Cd 等之间存在显著相关性。亚成体海龟主要在近岸浅海觅食（Goudarzi et al. 2024），易受人为活动影响。电镀、金属表面处理、印刷电路板制造等行业排放的废水会导致水体中 Cd 和 Cr 的增加（杨瑞香 2016）。近岸海水中一些重金属可能与船舶污染有关。如，船舶防污漆中通常含有 Pb、Cd、Cr 和 As，船舶防腐使用含有 Zn 和 Cu 的材料（曾维特等 2023）。海防工业区和港口区的人类活动可能向海洋环境释放 Cr、Mn、Ni 和 Pb，海洋运输也可能向海洋释放这些元素（Mostert et al. 2012）。这些人类活动所排放的重金属进入海洋环境，可通过饮水或食物摄入在海龟组织中累积（Andreani et al. 2008）。

玳瑁和绿海龟分别被 IUCN 濒危物种红色名录列为极度濒危和濒危级物种。本研究中玳瑁为海南岛近岸野外非正常死亡样本，绿海龟为野外搁浅后在救助救护期间死亡样本，这些海龟大多由于被船桨击中头部、渔网缠绕、摄入塑料垃圾或患肿瘤等原因致死。海南岛东部近岸（海南文昌、琼海和万宁等）及西沙等为我国南海海龟重要的觅食地和产卵场地（叶明彬等 2015, 2021）。建议加强对南海海龟觅食栖息地和海龟迁徙路径的研究；加强对海龟栖息地环境的污染监测，减少人为活动对海龟生

存的影响。同时, 建议增加对海龟救助救护机构的投入, 如增加水质检测和净化处理设施, 改善圈养环境, 减少救助过程中水质污染对海龟健康带来的风险。

参 考 文 献

- Abdallah M A M. 2023. Bioaccumulation and biomagnifications of toxic metals in tissues of loggerhead turtles (*Caretta caretta*) from the Mediterranean Sea coast, Egypt. *Scientific Reports*, 13: 7995.
- Alonso Aguirre A, Balazs G H, Zimmerman B, et al. 1994. Organic contaminants and trace metals in the tissues of green turtles (*Chelonia mydas*) afflicted with fibropapillomas in the Hawaiian islands. *Marine Pollution Bulletin*, 28(2): 109–114.
- Anan Y, Kunito T, Watanabe I, et al. 2001. Trace element accumulation in hawksbill turtles (*Eretmochelys imbricata*) and green turtles (*Chelonia mydas*) from Yaeyama Islands, Japan. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 20(12): 2802–2814.
- Andreani G, Santoro M, Cottignoli S, et al. 2008. Metal distribution and metallothionein in loggerhead (*Caretta caretta*) and green (*Chelonia mydas*) sea turtles. *Science of The Total Environment*, 390(1): 287–294.
- Barbieri E. 2009. Concentration of heavy metals in tissues of green turtles (*Chelonia mydas*) sampled in the Cananéia estuary, Brazil. *Brazilian Journal of Oceanography*, 57(3): 243–248.
- Bezerra M F, Lacerda L D, Rezende C E, et al. 2015. Food preferences and Hg distribution in *Chelonia mydas* assessed by stable isotopes. *Environmental Pollution*, 206: 236–246.
- Blanco M V, Cattoni D I, Carriquiriborde P, et al. 2014. Kinetics of bioaccumulation of heavy metals in *Odontesthes bonariensis* is explained by a single and common mechanism. *Ecological Modelling*, 274: 50–56.
- Bonanno G, Orlando-Bonaca M. 2018. Chemical elements in Mediterranean macroalgae. A review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 148: 44–71.
- Cai P J, Cai G Q, Chen X, et al. 2021. The concentration distribution and biohazard assessment of heavy metal elements in surface sediments from the continental shelf of Hainan Island. *Marine Pollution Bulletin*, 166: 112254.
- Cai P J, Cai G Q, Yang J S, et al. 2023. Distribution, risk assessment, and quantitative source apportionment of heavy metals in surface sediments from the shelf of the northern South China Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 187: 114589.
- Canzanella S, Danese A, Mandato M, et al. 2021. Concentrations of trace elements in tissues of loggerhead turtles (*Caretta caretta*) from the Tyrrhenian and the Ionian coastlines (Calabria, Italy). *Environmental Science and Pollution Research*, 28(21): 26545–26557.
- Chan Y, Robinson N J, Dourdeville K, et al. 2025. Heavy metal concentrations suggest pollution risk varies between sea turtle species in the northwest Atlantic Ocean. *Chemosphere*, 373: 144190.
- Cortés-Gómez A A, Romero D, Girondot M. 2017. The current situation of inorganic elements in marine turtles: a general review and meta-analysis. *Environmental Pollution*, 229: 567–585.
- da Silva C C, Varela A S Jr, Barcarolli I F, et al. 2014. Concentrations and distributions of metals in tissues of stranded green sea turtles (*Chelonia mydas*) from the southern Atlantic coast of Brazil. *Science of The Total Environment*, 466/467: 109–118.
- de Macêdo G R, Tarantino T B, Barbosa I S, et al. 2015. Trace elements distribution in hawksbill turtle (*Eretmochelys imbricata*) and green turtle (*Chelonia mydas*) tissues on the northern coast of Bahia, Brazil. *Marine Pollution Bulletin*, 94(1/2): 284–289.
- Duncan E M, Broderick A C, Fuller W J, et al. 2019. Microplastic ingestion ubiquitous in marine turtles. *Global Change Biology*, 25(2): 744–752.
- Eisler R. 1988. Lead Hazards to Fish, Wildlife, and Invertebrates: A Synoptic Review. U.S. Fish and Wildlife Service, Patuxent Wildlife Research Center, Laurel, MD, USA, 85: 1–14.
- Gardner S C, Fitzgerald S L, Acosta Vargas B, et al. 2006. Heavy metal accumulation in four species of sea turtles from the Baja California Peninsula, Mexico. *Biometals*, 19(1): 91–99.
- Goudarzi F, Doxa A, Hemami M R, et al. 2024. Thermal vulnerability of sea turtle foraging grounds around the globe. *Communications Biology*, 7(1): 347.
- Haynes D, Johnson J E. 2000. Organochlorine, heavy metal and polyaromatic hydrocarbon pollutant concentrations in the Great Barrier Reef (Australia) environment: a review. *Marine Pollution Bulletin*, 41(7/12): 267–278.
- Hopkins B C, Hepner M J, Hopkins W A. 2013. Non-destructive techniques for biomonitoring of spatial, temporal, and demographic patterns of mercury bioaccumulation and maternal transfer in turtles. *Environmental Pollution*, 177: 164–170.
- Jia Y Y, Wang J, Balazs G H, et al. 2019. Nest productivity for green turtles (*Chelonia mydas*) at Qilianyu of Xuande Islands, South China Sea, P. R. China: preliminary findings. *Chelonian Conservation and Biology*, 18(1): 116.

- Lacerda D, dos Santos Vergilio C, da Silva Souza T, et al. 2020. Comparative metal accumulation and toxicogenetic damage induction in three neotropical fish species with distinct foraging habits and feeding preferences. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 195: 110449.
- Ley-Quinónez C P, Zavala-Norzagaray A A, Réndon-Maldonado J G, et al. 2013. Selected heavy metals and selenium in the blood of black sea turtle (*Chelonia mydas agassizii*) from Sonora, Mexico. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 91(6): 645–651.
- Martínez-Estévez L, Steller D L, Zilliacus K M, et al. 2022. Foraging ecology of critically endangered Eastern Pacific hawksbill sea turtles (*Eretmochelys imbricata*) in the Gulf of California, Mexico. *Marine Environmental Research*, 174: 105532.
- McAloose D, Newton A L. 2009. Wildlife cancer: a conservation perspective. *Nature Reviews Cancer*, 9(7): 517–526.
- Mehouel F, Fowler S W. 2022. A mini-review of toxicokinetics and toxicity of heavy metals in marine and freshwater fish. *Journal of the Hellenic Veterinary Medical Society*, 73(1): 3561–3570.
- Mostert M M R, Ayoko G A, Kokot S. 2012. Multi-criteria ranking and source identification of metals in public playgrounds in Queensland, Australia. *Geoderma*, 173: 173–183.
- Khristoforova N K, Chernova E N. 2005. Comparison of the content of heavy metals in brown algae and seagrasses. *Doklady Biological Sciences*, 400(1): 61–63.
- Ng C K Y, Lam J C W, Zhang X H, et al. 2018. Levels of trace elements, methylmercury and polybrominated diphenyl ethers in foraging green turtles in the South China region and their conservation implications. *Environmental Pollution*, 234: 735–742.
- Riosmena-Rodríguez R, Talavera-Sáenz A, Acosta-Vargas B, et al. 2010. Heavy metals dynamics in seaweeds and seagrasses in Bahía Magdalena, B.C.S., México. *Journal of Applied Phycology*, 22(3): 283–291.
- Sakai H, Saeki K, Ichihashi H, et al. 2000. Species-specific distribution of heavy metals in tissues and organs of loggerhead turtle (*Caretta caretta*) and green turtle (*Chelonia mydas*) from Japanese coastal waters. *Marine Pollution Bulletin*, 40(8): 701–709.
- Sarkar M M, Rohani M F, Ali Reza Hossain M, et al. 2022. Evaluation of heavy metal contamination in some selected commercial fish feeds used in Bangladesh. *Biological Trace Element Research*, 200(2): 844–854.
- Seco J, Aparicio S, Brierley A S, et al. 2021. Mercury biomagnification in a Southern Ocean food web. *Environmental Pollution*, 275: 116620.
- Shaw K R, Lynch J M, Balazs G H, et al. 2021. Trace element concentrations in blood and scute tissues from wild and captive Hawaiian green sea turtles (*Chelonia mydas*). *Environmental Toxicology and Chemistry*, 40(1): 208–218.
- Storelli M M, Barone G, Storelli A, et al. 2008. Total and subcellular distribution of trace elements (Cd, Cu and Zn) in the liver and kidney of green turtles (*Chelonia mydas*) from the Mediterranean Sea. *Chemosphere*, 70(5): 908–913.
- Tanabe L K, Scott K, Dasari V, et al. 2022. An assessment of heavy metals in green sea turtle (*Chelonia mydas*) hatchlings from Saudi Arabia's largest rookery, Ras Baridi. *PeerJ*, 10: e13928.
- Velasquez-Vacca A, Seminoff J A, Jones T T, et al. 2024. Trophic history of Hawaiian green turtles as revealed by stable isotope ratios ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{34}\text{S}$) in the bones of museum specimens. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 34(1): e4063.
- Villaescusa-Celaya J A, Gutiérrez-Galindo E A, Flores-Muñoz G. 2000. Heavy metals in the fine fraction of coastal sediments from Baja California (Mexico) and California (USA). *Environmental Pollution*, 108(3): 453–462.
- Wang Y, Xu Z, Hang L, et al. 2023. *Lycoptera* fossil elemental imaging and paleoenvironment research via laser ionization time-of-flight mass spectrometry. *Atomic Spectroscopy*, 44(2): 55–64.
- Wilkinson A, Ariel E, van de Merwe J, et al. 2022. Trace element concentrations in forage seagrass species of *Chelonia mydas* along the Great Barrier Reef. *PLoS One*, 17(6): e0269806.
- Xu F J, Yan H M, Tian X, et al. 2016. Evaluation of heavy metal pollution in surface sediments in the continental shelf to the east of Hainan Island. *China Environmental Science*, 36(5): 1530–1539.
- Yamamura M, Suzuki K T. 1984. Isolation and characterization of metallothionein from the tortoise *Clemmys mutica*. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Comparative Pharmacology*, 79(1): 63–69.
- Yang S C, Sun K F, Liu J L, et al. 2022. Comparison of pollution levels, biomagnification capacity, and risk assessments of heavy metals in nearshore and offshore regions of the South China Sea. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(19): 12248.
- Yi S T, Song Z L, Lin J J, et al. 2024. Distribution, sources and influencing factors of heavy metals in the Ledong Sea, South

- China Sea. Marine Pollution Bulletin, 202: 116396.
- Yousuf S, Donald A N, Hassan M, et al. 2022. A review on particulate matter and heavy metal emissions; impacts on the environment, detection techniques and control strategies. *MOJ Ecology & Environmental Sciences*, 7(1): 1–5.
- 金路, 初凤友, 赵建如, 等. 2011. 南海西北部浅海沉积物重金属污染的综合评价. *海洋学研究*, 29(2): 24–34.
- 牟剑锋, 陶翠花, 丁晓辉, 等. 2013. 中国沿岸海域海龟的种类和分布的初步调查. *应用海洋学报*, 32(2): 238–242, 294.
- 彭紫亭. 2022. 海南 11 种大型可食用海藻中重金属的差异化生物累积及健康风险评估. 海口: 海南大学硕士学位论文.
- 滕德强, 崔振昂, 袁晓婕, 等. 2020. 北部湾海域表层沉积物中重金属元素分布特征及潜在生态危害评价. *中国地质调查*, 7(6): 79–85.
- 夏中荣, 古河祥. 2016. 海龟解剖. 广州: 暨南大学出版社.
- 杨瑞香. 2016. 水体重金属污染源及治理技术研究进展. *资源节约与环保*, (4): 66.
- 叶明彬, 陈华灵, 古河祥, 等. 2015. 人工培育幼年绿海龟的卫星追踪试验. *四川动物*, 34(1): 15–20.
- 叶明彬, 陈华灵, 观玉安, 等. 2021. 惠东幼年绿海龟的洄游规律及觅食地选择. *动物学杂志*, 56(4): 522–534.
- 曾维特, 张东强, 刘兵, 等. 2023. 海南岛北部海湾表层海水重金属分布特征、主控因素及污染评价. *热带海洋学报*, 42(6): 156–167.

附录 1 海龟的详细信息

Appendix 1 Detailed information on sea turtles

性别 Sex	发育阶段 Developmental stage	弯曲甲壳长度/弯曲甲壳宽度 Curved carapace length/curved carapace width CCL/CCW (cm)	死亡时间 (年-月) Death time (Year-month)	来源 Source	死亡原因 Death reason
绿海龟 <i>Chelonia mydas</i>					
NA	成体 Adult	75.0/70.0	2019-07	海南岛近岸 The coastal area of Hainan Island	搁浅救助后死亡 Death after stranding rescue
NA	亚成体 Sub-adult	30.2/27.6	NA	陵水 Lingshui	搁浅救助后死亡 Death after stranding rescue
NA	亚成体 Sub-adult	34.0/31.9	NA	海南岛近岸 The coastal area of Hainan Island	搁浅救助后死亡 Death after stranding rescue
雌性 Female	亚成体 Sub-adult	60.0/56.5	2020-04	海南岛近岸 The coastal area of Hainan Island	搁浅救助后死亡 Death after stranding rescue
雄性 Male	亚成体 Sub-adult	63.0/60.5	2021-04	海口 Haikou	搁浅救助后死亡 Death after stranding rescue
NA	亚成体 Sub-adult	42.0/39.5	2021-07	海南岛近岸 The coastal area of Hainan Island	搁浅救助后死亡 Death after stranding rescue
NA	成体 Adult	77.4/70.8	NA	海南岛近岸 The coastal area of Hainan Island	搁浅救助后死亡 Death after stranding rescue
雌性 Female	亚成体 Sub-adult	54.5/47.5	2022-03	三沙市石岛 Shidao, Sansha	野外非正常死亡 (罚没放生龟) Non-natural death in the wild (confiscated and released turtles)
玳瑁 <i>Eretmochelys imbricata</i>					
雌性 Female	成体 Adult	58.0/54.0	2021-07	海口 Haikou	野外非正常死亡 Non-natural death in the wild
NA	亚成体 Sub-adult	44.5/40.0	2020-07	琼海 Qionghai	野外非正常死亡 Non-natural death in the wild
雌性 Female	成体 Adult	68.0/58.0	2020-10	海口 Haikou	野外非正常死亡 Non-natural death in the wild

NA. 未获得数据。NA. Data not available.

附录 2 本研究与其他地区绿海龟和玳瑁组织中重金属含量比较 (µg/g, 干重)
Appendix 2 Comparison of heavy metal concentrations in the tissues of Green Turtles *Chelonia mydas* and Hawksbill Turtles *Eretmochelys imbricata* inhabiting the study region and other regions (µg/g, dry weight)

组织 Tissue	国家 Country	地区、海湾 Region, bay	生命非必需元素 Non-essential elements					生命必需元素 Essential elements					参考文献 Reference
			Hg	Pb	Cd	Cr	Ni	Mn	Zn	Fe	Cu		
绿海龟 <i>Chelonia mydas</i>													
巴西 Brazil		巴伊亚海岸 ^a Bahia coast	1.34 ± 0.61	0.53 ± 0.45	18.8 ± 10.6	0.60 ± 0.58	0.79 ± 0.34	—	132 ± 22.0	—	—	36.7 ± 9.30	de Macêdo et al. 2015
巴西 Brazil		南大西洋海岸 ^a South Atlantic coast	ND	4.5 ± 0.5	5.9 ± 0.9	ND	ND	—	45.0 ± 2.9	—	—	100.9 ± 15.9	da Silva et al. 2014
肝 Liver	日本 Japan	地中海 ^a Mediterranean	ND	ND	4.26 ± 3.02	ND	ND	—	34.5 ± 13.3	—	—	32.75 ± 16.42	Storelli et al. 2008
	中国 China	八重山 ^a Yaeyama	0.42 ± 0.19	0.507 ± 0.412	18.2 ± 9.7	2.2 ± 0.6	—	—	4.74 ± 2.06	87.2 ± 30.6	—	139 ± 86	Anan et al. 2001
	中国 China	香港 ^a Hong Kong	—	8.6 ± 8	42 ± 35	3 ± 3.4	1.7 ± 0.96	7.5 ± 4	190 ± 81	—	—	200 ± 160	Ng et al. 2018
	墨西哥 Mexico	下加利福尼亚半岛 ^c Baja California Peninsula	—	—	3.3 (ND - 102)	—	0.01 (ND - 7.40)	0.06 (ND - 6.74)	62.91 (1.32 - 166)	14.35 (ND - 1.765)	—	60.04 (6.79 - 133)	Gardner et al. 2006
	中国 China	南海 ^d South China Sea	0.326	0.159	0.558	0.276	0.079	7.88	98	915	—	68	本研究 This study
	日本 Japan	八重山 ^a Yaeyama	0.04 ± 0.07	0.094 ± 0.051	0.238 ± 0.167	1.4 ± 0.2	—	0.457 ± 0.10	47.7 ± 18.6	—	—	0.879 ± 0.424	Anan et al. 2001
肌肉 Muscle	墨西哥 Mexico	下加利福尼亚半岛 ^c Baja California Peninsula	—	0.01 (ND - 1.25)	0.01 (ND - 39.24)	—	0.03 (ND - 4.0)	0.003 (ND - 7.75)	38.26 (10.44 - 134)	20.99 (ND - 225)	—	0.03 (ND - 13.76)	Gardner et al. 2006
	中国 China	南海 ^d South China Sea	0.074	0.039	0.039	0.292	0.136	0.635	74.3	101	—	8.11	本研究 This study
	巴西 Brazil	巴伊亚海岸 ^a Bahia coast	0.36 ± 0.14	0.15 ± 0.14	54.5 ± 21.2	1.55 ± 0.59	1.92 ± 1.41	—	151 ± 21	—	—	13.6 ± 6.5	de Macêdo et al. 2015
	巴西 Brazil	南大西洋海岸 ^a South Atlantic coast	ND	5.4 ± 0.4	28.3 ± 2.3	ND	ND	—	54.3 ± 4.1	—	—	12.2 ± 1.1	da Silva et al. 2014
肾 Kidney	日本 Japan	地中海 ^a Mediterranean	ND	ND	5.06 ± 2.23	ND	ND	—	26.39 ± 10.51	—	—	8.20 ± 4.20	Storelli et al. 2008
	墨西哥 Mexico	八重山 ^a Mediterranean	0.30 ± 0.14	0.813 ± 0.559	142 ± 64	2.2 ± 0.7	—	5.60 ± 1.38	169 ± 61	—	—	8.27 ± 4.06	Anan et al. 2001
	中国 China	下加利福尼亚半岛 ^b Baja California Peninsula	—	0.01	121	—	1.15	0.31	128	44.09	—	5.67	Gardner et al. 2006
	中国 China	南海 ^d South China Sea	0.122	0.124	1.5	0.212	0.509	3.14	104	536	—	10.3	本研究 This study

续附录 2

组织 Tissue	国家 Country	地区、海湾 Region, bay	生命非必需元素 Non-essential elements				生命必需元素 Essential elements							参考文献 Reference
			Hg	Pb	Cd		Cr	Ni	Mn	Zn	Fe	Cu		
脂肪 Fat	墨西哥 Mexico	下加利福尼亚半岛 ^c Baja California Peninsula	—	0.03 (ND - 1.11)	0.002 (ND - 1.47)	—	0.02 (ND - 13.42)	0.003	49.82	2.63	0.01	Gardner et al. 2006		
	中国 China	南海 ^d South China Sea	0.010	0.040	0.019	0.488	0.073	0.415	146	51.2	4.55	本研究 This study		
<i>Eretmochelys imbricata</i>														
肝 Liver	巴西 Brazil	巴伊亚海岸 ^a Bahia coast	1.36 ± 0.61	0.27 ± 0.19	20.1 ± 5.4	0.68 ± 0.37	0.75 ± 0.39	—	144 ± 21	—	21.8 ± 9.2	de Macêdo et al. 2015		
	日本 Japan	八重山 ^a Yaeyama	0.87 ± 1.87	0.169 ± 0.130	7.05 ± 6.37	0.85 ± 0.68	—	8.29 ± 4.26	109 ± 54	—	54.9 ± 116	Anan et al. 2001		
	墨西哥 Mexico	下加利福尼亚半岛 ^b Baja California Peninsula	—	—	0.49	—	2.48	0.74	25.89	71.88	2.47	Gardner et al. 2006		
	中国 China	南海 ^d South China Sea	0.246	0.087	0.334	0.264	0.017	2.14	27.1	468	4.6	本研究 This study		
日本 Japan	八重山 ^a Yaeyama	0.04 ± 0.03	0.043 ± 0.051	0.068 ± 0.039	1.1 ± 1.1	—	0.70 ± 0.519	48.6 ± 26.1	—	0.962 ± 0.316	Anan et al. 2001			
肌肉 Muscle	墨西哥 Mexico	下加利福尼亚半岛 ^b Baja California Peninsula	—	0.38	1.02	—	—	1.78	102	258	3.68	Gardner et al. 2006		
	中国 China	南海 ^d South China Sea	0.104	0.046	0.018	0.204	0.091	0.723	105	106	4.57	本研究 This study		
肾 Kidney	巴西 Brazil	巴伊亚海岸 ^a Bahia coast	0.57 ± 0.42	0.07 ± 0.09	76.2 ± 38.1	0.90 ± 0.21	0.72 ± 0.39	—	121 ± 30	—	7.03 ± 2.95	de Macêdo et al. 2015		
	日本 Japan	八重山 ^a Yaeyama	1.30 ± 1.20	0.270 ± 0.236	93.7 ± 76.3	1.60 ± 0.80	—	13.2 ± 2.75	120 ± 32.0	—	7.04 ± 2.79	Anan et al. 2001		
	墨西哥 Mexico	下加利福尼亚半岛 ^b Baja California Peninsula	—	—	4.20	—	1.61	7.62	82.45	362	3.89	Gardner et al. 2006		
	中国 China	南海 ^d South China Sea	0.091	0.081	0.643	0.362	0.098	1.63	62.7	266	3.45	本研究 This study		
脂肪 Fat	墨西哥 Mexico	下加利福尼亚半岛 ^b Baja California Peninsula	—	—	0.430	—	—	2.53	42.39	11.14	0.72	Gardner et al. 2006		
中国 China	南海 ^d South China Sea	0.009	0.027	0.013	0.364	0.027	0.123	112	65.1	3.36	本研究 This study			

— 无数据记录, ND 为未检出。a、b、c、d 为数据类型, a 为平均值 ± 标准差, b 为平均值, c 为平均值 (范围), d 为中位数。

—, No data recorded; ND, Not detected. a, b, c, and d represent mean ± standard deviation, mean, mean (range), and median, respectively.

续附录 3

种类 Species	国家 Country	地区、海湾 Region, bay	生命非必需元素 Non-essential elements				生命必需元素 Essential elements					参考文献 Reference
			Hg	Pb	Cd		Cr	Ni	Mn	Zn	Fe	
沉积物 Sediment (干重 Dry weight, $\mu\text{g/g}$)	中国 China	南海北部 ^b northern South China Sea	—	26.8	—	80.69	25.26	—	70.5	—	14.97	Cai et al. 2021
		地中海 ^c Mediterranean	0.01 - 0.28	3.06 - 219	0.03 - 8.09	8.15 - 231	2.13 - 9.53	52.8 - 262	0.72 - 305	243 - 31 310	0.85 - 710	Bonanno et al. 2018
	澳大利亚 Australia	昆士兰州, 大堡礁 ^c The Great Barrier Reef, Queensland	< 0.3	< 13	< 1	2 - 8	1.5 - 60	139 - 244	0.72 - 41	4871 - 16 000	0.76 - 32	Haynes et al. 2000
		地中海 ^c Mediterranean	0.08 - 0.49	0.14 - 52.9	0.00 - 3.40	0.12 - 2.42	3.61 - 38.8	0.28 - 12.0	0.40 - 145	2.17 - 1 227	0.40 - 24.0	Bonanno et al. 2018
海水 Seawater (干重 Dry weight, $\mu\text{g/L}$)	中国 China	海南岛 ^b Hainan Island	—	25.9	0.06	0.85	5.59	60.7	3.03	566	0.32	彭紫亭 2022
	澳大利亚 Australia	昆士兰州, 大堡礁 ^c The Great Barrier Reef, Queensland	—	< 0.06 - 0.77	< 0.02 - 0.32	—	0.08 - 0.28	—	0.08 - 2.19	—	0.13 - 0.38	Haynes et al. 2000

—: 无数据记录, a 是中位数 (范围), b 是平均值, c 是范围。

—: No data recorded; a, b, and c represent median (range), mean, and range, respectively.

附录 4 绿海龟和玳瑁组织中重金属元素含量[中位数(极小值 - 极大值), $\mu\text{g/g}$, 干重]
Appendix 4 Contents of heavy metals in the tissues of Green Turtle *Chelonia mydas* and Hawksbill Turtle *Eretmochelys imbricata* [median (min - max), $\mu\text{g/g}$, dry weight]

物种 Species	组织 Tissue	生命非必需元素 Non-essential elements										生命必需元素 Essential elements										
		Hg	Pb	Cd	As	Ni	Cr	Mn	Zn	Fe	Cu	Sr	Ba	Ni	Cr	Mn	Zn	Fe	Cu	Sr	Ba	
绿海龟 <i>Chelonia mydas</i>	脂肪	0.010	0.040	0.019	0.639	0.073	0.488	0.415	146	51.2	2.08	0.059	0.032 - 0.502	0.231 - 0.753	0.097 - 2.59	17.8 - 830	14.2 - 349	1.22 - 176	0.553 - 11.9	0.006 - 0.778		
	Fat	(0 - 0.075)	(0.003 - 0.214)	(0.003 - 0.144)	(0.096 - 1.37)	(0.032 - 0.502)	(0.231 - 0.753)	(0.097 - 2.59)	(17.8 - 830)	(14.2 - 349)	(0.553 - 11.9)	(0.006 - 0.778)										
	肾	0.122	0.124	1.50	1.45	0.509	0.212	3.14	104	536	28.9	0.794	0.174 - 1.6	0.171 - 0.311	1.95 - 4.46	86.7 - 145	229 - 786	6.16 - 16.1	6 - 45.8	0.056 - 1.92		
	Kidney	(0.021 - 0.227)	(0.049 - 0.283)	(0.445 - 2.3)	(0.278 - 2.26)	(0.174 - 1.6)	(0.171 - 0.311)	1.95 - 4.46	86.7 - 145	229 - 786	6.16 - 16.1	6 - 45.8										
	肝	0.326	0.159	0.558	0.81	0.079	0.276	7.88	98	915	2.60	0.053	0.015 - 0.375	0.144 - 14.4	0.524 - 13.8	42.4 - 131	399 - 1868	8.21 - 167	1.13 - 13	0.025 - 0.284		
	Liver	(0.226 - 1.410)	(0.028 - 0.333)	(0.163 - 11.1)	(0.086 - 6.06)	(0.015 - 0.375)	(0.144 - 14.4)	0.524 - 13.8	42.4 - 131	399 - 1868	8.21 - 167	1.13 - 13										
	肌肉	0.074	0.039	0.039	1.52	0.136	0.292	0.635	74.3	101	4.89	0.037	0.034 - 0.319	0.126 - 1.49	0.359 - 1.65	27.7 - 147	21.4 - 168	1.34 - 105	1.49 - 17.6	0.015 - 0.719		
	Muscle	(0.001 - 0.955)	(0.016 - 0.117)	(0.012 - 1.29)	(0.147 - 5.7)	(0.034 - 0.319)	(0.126 - 1.49)	0.359 - 1.65	27.7 - 147	21.4 - 168	1.34 - 105	1.49 - 17.6										
	脂肪	0.009	0.027	0.013	0.556	0.027	0.364	0.123	112	65.1	1.15	—	0.002 - 0.022	0.007 - 0.078	0.002 - 0.014	0.248 - 0.927	0.019 - 0.034	0.186 - 0.465	0.413			
	Fat	(0.000 1 - 0.148)	(0.007 - 0.078)	(0.002 - 0.014)	(0.248 - 0.927)	(0.019 - 0.034)	(0.186 - 0.465)	0.413														
玳瑁 <i>Eretmochelys imbricata</i>	肾	0.091	0.081	0.643	0.749	0.098	0.362	1.63	62.7	266	4.44	0.100	0.050 - 0.117	0.246 - 0.479	1.09 - 12.8	36.6 - 133	117 - 709	2.96 - 11.8	3.86 - 16	0.046 - 0.393		
	Kidney	(0.000 1 - 0.148)	(0.013 - 0.143)	(0.046 - 1.13)	(0.129 - 0.908)	(0.050 - 0.117)	(0.246 - 0.479)	1.09 - 12.8	36.6 - 133	117 - 709	2.96 - 11.8	3.86 - 16										
	肝	0.246	0.087	0.334	0.303	0.017	0.264	2.14	27.1	468	1.03	0.029	0.012 - 0.036	0.242 - 0.385	1.21 - 2.45	23.6 - 41.9	402 - 650	3.74 - 15.1	0.94 - 1.95	0.020 - 0.039		
	Liver	(0.037 - 0.291)	(0.016 - 0.127)	(0.107 - 0.373)	(0.096 - 0.47)	(0.012 - 0.036)	(0.242 - 0.385)	1.21 - 2.45	23.6 - 41.9	402 - 650	3.74 - 15.1	0.94 - 1.95										
	肌肉	0.104	0.046	0.018	2.24	0.091	0.204	0.723	105	106	3.01	0.072	0.049 - 0.422	0.020 - 0.084	0.011 - 0.055	0.538 - 2.54	0.073 - 0.159	0.19 - 0.56	0.073 - 0.159	0.19 - 0.56	0.073 - 0.159	0.19 - 0.56
Muscle	(0.049 - 0.422)	(0.020 - 0.084)	(0.011 - 0.055)	(0.538 - 2.54)	(0.073 - 0.159)	(0.19 - 0.56)	0.723	105	106	3.01	0.072											

—: 为未检出数值。 —: Not detected.

附录 5 海龟组织中重金属含量间的相关性分析

Appendix 5 Correlation analysis of heavy metal contents in the tissues of sea turtles

	Hg	Pb	Cd	Ni	Cr	As	Mn	Zn	Fe	Cu	Sr
肝 Liver											
Hg											
Pb	0.286										
Cd	0.544	0.264									
Ni	0.665*	0.505	0.863**								
Cr	0.044	-0.346	0.396	0.324							
As	-0.319	0.093	0.176	-0.005	0.016						
Mn	0.429	0.621*	0.000	0.071	-0.681*	0.066					
Zn	0.467	0.247	0.566*	0.582*	-0.016	0.396	0.390				
Fe	0.181	0.242	0.571*	0.703**	0.401	-0.060	-0.258	0.451			
Cu	0.319	0.549	0.484	0.643*	-0.088	0.429	0.346	0.835**	0.637*		
Sr	0.346	0.286	0.462	0.681*	0.055	-0.115	0.000	0.654*	0.802**	0.720**	
Ba	0.377	0.328	0.638*	0.809**	0.116	-0.304	-0.109	0.225	0.699*	0.383	0.827**
肾 Kidney											
Hg											
Pb	0.139										
Cd	-0.188	-0.139									
Ni	0.176	0.491	0.576								
Cr	-0.419	-0.176	-0.267	-0.542							
As	0.188	0.127	0.600	0.800**	-0.492						
Mn	-0.273	0.152	0.358	0.245	-0.009	0.064					
Zn	-0.006	0.285	0.176	0.573	-0.096	0.245	0.518				
Fe	0.006	0.200	0.176	0.391	0.036	0.373	0.745**	0.700*			
Cu	0.273	0.321	0.273	0.655*	-0.314	0.318	0.691*	0.709*	0.645*		
Sr	0.261	0.358	0.491	0.591	-0.907**	0.518	0.127	0.045	-0.036	0.318	
Ba	0.127	0.079	0.370	0.582	-0.779**	0.709*	-0.018	0.018	-0.027	0.236	0.845**
肌肉 Muscle											
Hg											
Pb	0.243										
Cd	-0.050	-0.431									
Ni	-0.110	0.127	0.088								
Cr	0.143	0.193	-0.011	0.330							
As	-0.215	-0.541	0.357	-0.011	0.121						
Mn	0.564*	0.238	0.005	0.533	0.687**	0.148					
Zn	0.429	-0.006	-0.049	0.121	0.181	-0.379	0.308				
Fe	0.702**	0.011	0.357	0.346	0.489	0.077	0.797**	0.555*			
Cu	0.624*	0.210	0.038	0.473	0.462	-0.401	0.681*	0.495	0.681*		
Sr	0.077	-0.276	0.363	0.489	0.275	-0.016	0.401	0.692**	0.599*	0.505	
Ba	0.668*	0.423	0.127	0.459	0.484	-0.245	0.803**	0.451	0.784**	0.718**	0.358

续附录 5

	Hg	Pb	Cd	Ni	Cr	As	Mn	Zn	Fe	Cu	Sr
脂肪 Fat											
Hg											
Pb	0.252										
Cd	0.293	0.365									
Ni	0.482	0.209	0.320								
Cr	0.362	0.393	0.768**	0.594*							
As	-0.480	0.011	0.249	-0.299	0.081						
Mn	0.197	0.288	0.713**	0.425	0.719**	0.297					
Zn	0.276	0.270	0.174	0.480	0.284	-0.116	-0.174				
Fe	0.462	0.134	0.704**	0.266	0.516	0.292	0.613*	0.095			
Cu	0.599*	-0.002	0.042	0.444	0.385	-0.213	-0.042	0.657*	0.200		
Sr	0.685**	0.305	0.488	0.854**	0.648*	-0.393	0.380	0.516	0.363	0.556*	
Ba	0.487	0.396	-0.054	0.396	0.288	-0.414	0.883**	-0.198	0.414	-0.018	0.577

* 在 0.05 级别（双尾），相关性显著；** 在 0.01 级别（双尾），相关性显著。

* At the 0.05 level (two-tailed), the correlation is significant; ** At the 0.01 level (two-tailed), the correlation is significant.

（上接 728 页）



图 1 黄腹山鹪莺

Fig. 1 Yellow-bellied Prinia *Prinia flaviventris*

周敏军^{①②} 王任翔^② 郑炜^③ 李欣^{④⑤} 周婷婷^{④⑤} 冯育青^{④⑤*} 谢冬^{⑤⑥}

① 苏州工业园区绿绣眼生态咨询工作室 苏州 215100; ② 苏州市林学会 苏州 215011;

③ 苏州高新区狮山萤火虫生态环境咨询工作室 苏州 215011; ④ 苏州市湿地保护管理站 苏州 215000;

⑤ 太湖湿地生态系统国家定位观测研究站 苏州 215000; ⑥ 南京林业大学生物与环境学院 南京 210037