



DOI:10.14188/j.ajsh.2018.06.006

水生昆虫对汞的吸收、富集和水-陆转移

王金迪^{1,2}, 王成业^{1,2*}, 赵敏^{1,2}, 冯颖^{1,2}

(1. 中国林业科学研究院 资源昆虫研究所, 云南 昆明 650233;

2. 国家林业局 资源昆虫培育与利用重点实验室, 云南 昆明 650233)

摘要: 汞是一种人体非必需且有剧毒的重金属元素, 全球性的汞污染因对人类健康具有损害而备受社会关注。自然界中的汞绝大部分会通过江河径流和雨雪尘土的沉降而进入水生生态系统, 每年进入水生生态系统的汞至少有 10 000 吨。水生昆虫作为重要的消费者生物存在于水生生态食物网中, 是其重要的组成部分, 在水生生态系统的物质循环中扮演着重要角色。本文介绍了近年来水生昆虫与汞之间的相关研究, 重点总结了水生昆虫对汞的吸收和富集程度, 分析了水生昆虫在汞的水-陆转移中的作用。研究数据表明, 水生昆虫对汞的吸收程度与环境因素有关, 并通过不同的途径转移到陆地生态系统中, 对陆地生态系统上层食物链的生物存在一定的威胁, 同时也需注意在对水生昆虫进行开发利用的同时, 考虑汞是否超标的因素。

关键词: 水生昆虫; 汞; 甲基汞; 吸收; 富集; 水-陆转移

中图分类号: Q143

文献标识码: A

文章编号: 2096-3491(2018)06-0507-05

Mercury absorption, enrichment and water-land transfer by aquatic insects

WANG Jindi^{1,2}, WANG Chengye^{1,2*}, ZHAO Min^{1,2}, FENG Ying^{1,2}

(1. Research Institute of Resource Insects, Chinese Academy of Forestry, Kunming 650233, Yunnan, China;

2. Key Laboratory of Cultivation and Utilization of Resource Insect, State Forestry Administration of P. R. China, Kunming, 650233, Yunnan, China)

Abstract: Mercury is a non-essential and toxic heavy metal element of the human body. Global mercury pollution has attracted much attention because of its damage to human health. Most of the mercury in nature enters aquatic ecosystems through river runoff and the deposition of rain and snow dust, with at least 10,000 tons of mercury entering the aquatic ecosystem each year. As an important consumer animal, aquatic insects are an important part of the aquatic ecological food network and play an important role in the material cycle of aquatic ecosystems. This paper introduces the related research between aquatic insects and mercury in recent years, focusing on the absorption and enrichment of mercury by aquatic insects, and analyzing the role of aquatic insects in the water-land transfer of mercury. The research data show that the degree of mercury absorption by aquatic insects is related to environmental factors and is transferred to terrestrial ecosystems through different pathways, which poses a certain threat to the organisms in the upper food chain of terrestrial ecosystems. At the same time of development and utilization of aquatic insects, whether the mercury exceeds the standard should be considered.

Key words: aquatic insect; mercury; methylmercury; absorption; enrichment; water-land transfer

收稿日期: 2018-09-17 修回日期: 2018-10-11

作者简介: 王金迪(1992-), 女, 硕士生, 研究方向为食用昆虫安全性。E-mail: jdwang666@163.com

* 通讯联系人: 王成业(1979-), 男, 副研究员, 博士, 现主要从事资源昆虫学研究。E-mail: cywang11@126.com

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(riricaf2014002Z)

引用格式: Wang J D, Wang C Y, Zhao M, *et al.* Mercury absorption, enrichment and water-land transfer by aquatic insects [J]. Biotic Resources, 2018, 40(6): 507-511.

王金迪, 王成业, 赵敏, 等. 水生昆虫对汞的吸收、富集和水-陆转移[J]. 生物资源, 2018, 40(6): 507-511.

0 引言

食用昆虫的种类包括一部分水生昆虫,例如餐桌上常见的黄边大龙虱(*Cybister japonicus* Sharp)、大田鳖(*Kirkaldgia degrollei* Vuillefroy)、红蜻(*Crocothemis servilia* Drury)等。因其含有丰富的营养成分,成为近年来兴起的新型食品而备受人们喜爱。但水生昆虫作为水生食物链的一部分,也是汞污染的对象和中介。

汞(Hg),英文名mercury,位于元素周期表第6周期、第IIB族,是一种重要的人体非必需的剧毒重金属元素。原子序数80,熔点 -38.87°C ,沸点 356.6°C ,密度 13.59 g/cm^3 。汞在地壳中含量极少,主要存在于朱砂(硫化汞)、氯硫汞矿、硫锑汞矿和一些与硫化汞相连的矿物中。汞是闪亮的银白色重质液体,是常温常压下唯一以液态存在的金属元素,也是唯一可以以气象形式(Hg^0)存在的金属元素。

汞在环境中的存在形态按化学形式可分为金属汞、无机汞和有机汞三种,不同形态的汞毒性大小不同,其毒性大小的顺序按无机汞、金属汞和有机汞的顺序递增。无机汞中的汞蒸气与氯化汞(升汞)有剧毒, 0.3 g 氯化汞即可致人死亡。有机汞中的甲基汞毒性最大,具有高神经毒性、致癌性、心血管毒性、生殖毒性、免疫系统效应和肾脏毒性等。甲基汞脂溶性大,化学性质稳定,容易被生物吸收,且难以代谢消除,能在食物链中逐级传递放大,甲基汞在水生生物体内高度积累富集时浓度可达水中浓度的 $10\,000\sim 3\,000\,000$ 倍^[1]。甲基汞还可以通过水生生物等进入人体。进入人体后会在人体某些器官中大量积累,造成慢性汞中毒。震惊世界的日本“水俣病”就是因渔民长期食用含有高含量甲基汞的鱼造成的。截至2001年3月,日本官方确认水俣病患者2 955人,死亡1 784人,但仍有10 072人出现水俣病的症状但未得到官方确认。这是由慢性甲基汞中毒引起的一例世界上迄今为止最严重的环境公害事件,其深刻性和持久性史无前例^[2]。

由于自然界中的汞绝大部分会进入水中,水生生态系统对于汞的转移和循环起着重要作用。水生昆虫作为整个水生生态食物链的重要组成部分,在水生生态系统的物质循环中扮演着重要角色。了解水生昆虫对汞的吸收和富集程度,分析水生昆虫在汞的水-陆转移中的作用,对研究汞在食物链中的传递、汞如何进入陆地生态系统以及对更高营养层的潜在威胁具有重要意义。

1 水生昆虫对汞的吸收和富集

无论是必需的或非必需的重金属元素,当进入生物体的速度和数量超过生物体自身所能容纳的速度或数量后,它就会在生物体内各部位积累起来,有些还可以通过食物链传递给更高营养级。重金属在昆虫体内的累积是一个连续的、动态的过程,其积累水平主要取决于昆虫受胁迫时间的长短、取食量的大小以及对重金属的排泄能力等^[3]。汞是一种能被水生生物链中所有营养级富集的重金属,具有极强的生物可利用性,且能通过各营养级的传递放大,最终在营养级最高、年龄最大的大型肉食性水生物体内高度富集,使处于食物链顶层的捕食者存在很大的汞中毒风险。

1.1 水生昆虫对汞的吸收

汞在昆虫体内表现出显著的生物积累和放大效应,且相同环境下肉食性昆虫体内汞含量显著高于植食性昆虫^[4]。Hall等^[5]研究表明肉食性昆虫对汞的富集能力强于鱼类。由于水生生态系统是汞进入生物体的主要环境,分析水生昆虫对汞的吸收和富集尤为必要。水生昆虫是指一个或多个生活史阶段生活在水中或与水体有关的昆虫^[6]。昆虫纲相当繁盛,仅有命名的昆虫就超过了100万种。其中水生昆虫占到了10%左右^[7]。水生昆虫在水生生态系统功能实现中发挥着重要的作用,它们不仅直接影响水生动植物,而且与农业、渔业和人畜健康等关系密切。水生昆虫的生态功能已经成为了现代昆虫学研究的热点。

水生昆虫对汞的吸收包括体外直接吸收途径和取食途径。体外直接吸收包括在一定汞浓度的水体环境中,汞通过水生昆虫的表皮、呼吸等途径直接进入昆虫体内^[3]。取食途径则是通过食物链来实现的。以淡水湖泊为例,中国的湖泊生态系统主要是底栖食物网和浮游食物网。水生昆虫以大比例作为重要的底栖动物存在于底栖食物网中^[8]。浮游植物与沉水植物作为水生生态系统的重要生产者,处于底栖食物网的底层,汞及甲基汞可经水生植物富集并通过食物链的逐级传递,这是汞进入食物链的第一步。

水生昆虫在底栖食物网中扮演着消费者的角色,从第一营养级一直到最高营养级均存在着它们的食物。如蜉蝣目(Ephemeroidea)稚虫和摇蚊科(Chironomidae)幼虫以有机碎屑及附带的微生物群落为食,蜻蜓目(Odonata)稚虫以摇蚊科幼虫和蜉蝣目稚虫为食,粗腹摇蚊亚科(Tanypodinae)幼虫以轮

虫、甲壳类节肢动物和寡毛类动物为食,环足摇蚊(*Cricotopus bicintus* Meigen)以大型丝状绿藻水绵为食^[8]。鞘翅目(Coleoptera)水龟甲科(Hydrophilidae)幼虫可以螺蛳等小型软体动物为食,一些半翅目(Hemiptera)种类如负子蝽科(Belostomatidae)的若虫则可以捕食鱼苗和其它个体较大的脊椎动物,龙虱科(Dytiscidae)幼虫也可捕食小鱼苗。

水生昆虫的成虫可分为两种,一种是生活史全部在水中完成,包括鞘翅目龙虱科(Dytiscidae)和水龟甲科(Hydrophilidae),半翅目的负子蝽科(Belostomatidae)、划蝽科(Corixida)和仰蝽科(Noronectidae)等。另一种则只有部分生活史在水中完成,包括蜉蝣目(Ephemera)目、蜻蜓目(Odonata)和双翅目(Diptera)的摇蚊科(Chironomidae)和大蚊科(Tipulidae)等。龙虱科成虫和负子蝽科成虫为肉食者,两者均主要以水生昆虫为食,但前者可捕食鱼苗,后者可以捕食虾蟹等甲壳类节肢动物、个体较大的鱼类和螺蛳等脊椎动物。水龟甲科成虫食腐,多以腐烂的有机物为生。划蝽科也可取食腐烂的有机物,但主要取食藻类、有机碎屑和小型节肢动物。

从水生昆虫的食谱来看,吸收水生生态系统中的汞是必然的事。有研究统计,肉食性水生昆虫体内甲基汞含量要分别高于植食者和碎屑收集者约5.0和3.0倍,有些肉食性半翅目的水生昆虫体内甲基汞含量高于其它水生无脊椎动物;同时,某些肉食性半翅目昆虫以小鱼为食,具有更复杂的食物链,汞的来源也就更多样化^[9]。

1.2 水生昆虫对汞的富集

水生昆虫对汞的富集与水中汞的浓度有关。Hall等^[5]研究发现,在被洪水淹没后的湿地中,水中汞浓度增加了20倍,而像蜻蜓目等肉食性水生昆虫体内的汞浓度增加了3倍。比较加拿大魁北克北部的水库和其附近的自然湖不难发现,水库中甲基汞含量是天然湖泊的6倍,并且水库中昆虫体内甲基汞浓度要高于自然湖中昆虫3倍^[10,11]。

生物富集作用又叫生物浓缩,是指一些自然界不易(或不能)降解的污染物,最初在环境中的浓度并不高,但经过食物链的逐级积累、浓缩和传递,待至最高营养层次的生物体内,其浓度就能提高到数百乃至数万倍以上,甚至对生物机体构成毒害的现象^[12]。化学物质在沿着食物链转移的过程中产生生物富集作用,即每经过一种生物体,其浓度就有一次明显的提高。水生昆虫对汞的富集与食物链组成、食性、食物丰富程度和年龄有关,同时,水生昆虫富集汞的过程中体内甲基汞(MeHg)/总汞(THg)大

致保持在一个恒定的比例^[13]。

Xie等^[14]针对四种水生昆虫的研究发现,比较了溶解汞和饮食来源的汞的富集效果,结果发现溶解汞是水生昆虫累积汞总量的重要来源。水生昆虫分别暴露于含汞溶液和含汞膳食环境中,5 d后发现暴露在含汞溶液中的水生昆虫累积的汞量更多。而对于鱼类而言,来源于食物的汞才是鱼类富集甲基汞的主要途径,约85%的甲基汞都是通过食物富集的^[15]。

此外,水生昆虫对汞的富集可能与环境中的pH值和溶解有机碳(DOC)有关。Harding等^[16]通过研究黑蝇(*Simulium* spp.),发现汞和甲基汞进入食物网与pH值有很强的负相关。在Kalbitz等^[17]的研究中发现,河流中的pH越低,水体中汞和甲基汞的浓度越高,而降低水体中pH值有利于提高DOC浓度。Burns等^[18]研究发现,在哈德逊河流域及湿地中,无机汞和甲基汞浓度与DOC呈正相关。在Poste等^[19]的研究中提到,当水体中增加DOC含量时,可能会导致更高的甲基汞浓度,特别是在清澈的湖泊中。这将会增加汞的生物可利用比例,并导致生物体内汞的生物累积增多。

2 水生昆虫对汞的水-陆转移

早期对甲基汞的研究一般存在于水生生物中,因为汞在水生生态系统中转化为甲基汞的形式存在。然而有学者在某些陆地消费者的体内发现了高浓度的甲基汞。例如,Cristol等^[20]发现一种鸣鸟通过捕食陆地蜘蛛而富集了高浓度甲基汞,而蜘蛛体内存在甲基汞则是由于蜘蛛捕食了含甲基汞的水生昆虫。Raikow等^[21]认为,蜉蝣目和双翅目的幼虫生存于水生生态环境中富集了汞,在成虫期保留了幼虫期所积累的甲基汞,并被蝙蝠、蜘蛛和鸟类捕食从而将甲基汞带入陆地食物链。而Hall等^[5]也发现美洲斑潜蝇体内的甲基汞显著影响着陆地捕食者体内的汞含量。

水生昆虫从物理环境富集了甲基汞,接着水生昆虫被鱼类捕食,造成了甲基汞在鱼类中的富集,陆生动物再捕食鱼类,这是汞的水陆转移的重要途径之一^[22]。池塘中的昆虫群落是介导甲基汞从池塘流向周围陆地景观的主要决定因素,其途径是昆虫羽化出水后(例如蜻蜓、豆娘、蜉蝣、摇蚊等)被陆地捕食者捕食^[23]。

Speir等^[24]通过¹⁵N同位素示踪法对一种海岸线长颚黄金蛛(*Tetragnatha* sp.)进行了研究,发现其用蛛网捕食小型水生昆虫,证明了长颚黄金蛛连接

着水生食物链和陆地食物链,是汞从水生生态系统进入陆地生态系统的门户之一。Lauren等^[25]通过¹³C同位素示踪法证明了黄腰莺(yellow-rumped warblers)和木兰莺(magnolia warblers)在春季迁徙途中捕食蜉蝣目昆虫和蚊虫来补充能量,这也是水体汞进入陆地生态系统的一个途径。

3 总 结

由上可见,汞可以通过水-陆通道进入陆地食物链,水生昆虫在其中起着重要的作用。近年来,由于昆虫体内含有丰富的氨基酸、蛋白质、维生素和矿物质等营养成分,使其成为一种新型的食品,正逐渐走上人们的餐桌。而食用昆虫的种类中包括一部分水生昆虫,例如餐桌上常见的龙虱、大田鳖、水蚤等。由于水生昆虫是汞的水-陆转移的中介,食用这些昆虫无疑增加了人类接触汞的风险。关注水生昆虫体内汞含量的另一个原因是,相比于哺乳动物或鸟类等脊椎动物,水生昆虫类肠道菌群内存在可以使汞甲基化的细菌^[26],这使得问题更加严重,因为甲基汞有更强的毒性。

人们一直在寻找解决和降低汞的方法。硒是人体及动物维系生命活动所必需的微量元素之一,对汞等重金属的毒性具有显著的拮抗作用。Parizek等^[27]早在1967年就报道了硒对无机汞毒性的缓解作用,并且在哺乳动物组织中描述了亚硒酸钠和氯化汞之间拮抗作用的化学机制。Belzile等^[28]的研究表明硒在生物系统中具有很高的化学亲和力,能形成不溶性的汞化合物,将汞从生物体中分离出来并中和其毒性作用。生物体从水体和食物吸收大量的硒时(超出正常体内的含量但未出现中毒现象),生物体内代谢产物如 Se^{2-} (HSe^-)、 CH_3Se^- 和硒代半胱氨酸与 CH_3Hg^+ 具有强的结合能力,从而减少 CH_3Hg^+ 与生物体的结合,有利于促进 CH_3Hg^+ 排出体外^[29]。硒和汞在鱼类^[30]、鸟类^[31]、哺乳动物^[32]等脊椎动物中都具有良好的拮抗关系。然而在上述的这些可食用水生昆虫种类中,硒是否可以拮抗汞的毒性作用,还有待科研工作者进一步研究。

参考文献

- [1] Boening D W. Ecological effects, transport, and fate of mercury: a general review [J]. Chemosphere, 2000, 40 (12): 1335-1351.
- [2] Feng X B, Chen J B, Fu X W, *et al.* Progresses on environmental geochemistry of mercury [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2013, 23 (5): 503-530.
- 冯新斌,陈玖斌,付学吾,等. 汞的环境地球化学研究进展[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2013, 23 (5): 503-530.
- [3] Hu M M, Wang Q, Yang Y Z. Accumulation, distribution and excretion of heavy metals in insects [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012, 28(18): 213-217. 胡蒙蒙,王青,杨益众. 重金属在昆虫体内的累积、分布与排泄[J]. 中国农学通报, 2012, 28(18): 213-217.
- [4] Kasun A, Ao M, Goodle E, *et al.* Mercury and selenium in arthropods and their bioaccumulation across food webs [J]. Chinese Journal of Ecology, 2016, 35(4): 1031-1037. Kasun A, 敖明, Goodle E, 等. 节肢动物体内汞、硒分布及食物链传递特征[J]. 生态学杂志, 2016, 35(4): 1031-1037.
- [5] Hall B D, Rosenberg D M, Wiens A P. Methyl mercury in aquatic insects from an experimental reservoir [J]. Can J Fish Aquat Sci, 1998, 55(9): 2036-2047.
- [6] Wang Q, Yuan X Z, Liu H. Community and biodiversity of aquatic insects attached on the stones in upland headwater stream of southwestern China: a case study of yudu stream in Chongqing [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2011, 35(5): 887-892. 王强,袁兴中,刘红. 西南山地源头溪流附石性水生昆虫群落特征及多样性——以重庆鱼肚河为例[J]. 水生生物学报, 2011, 35(5): 887-892.
- [7] Peng Z R. Community characteristics of aquatic insects and bioassessment of water quality in the Poyang lake (sand lake) [D]. Nanchang: Nanchang University, 2015. 彭昭荣. 鄱阳湖(沙湖)水生昆虫群落特征及水质生物评价[D]. 南昌: 南昌大学, 2015.
- [8] Liu X Q. Food composition and food webs of zoobenthos in Yangtze lakes [D]. Wuhan: Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, 2006. 刘学勤. 湖泊底栖动物食物组成与食物网研究[D]. 武汉: 中国科学院水生生物研究所, 2006.
- [9] Cleckner L B, Garrison P J, Hurley J P, *et al.* Trophic transfer of methyl mercury in the northern Florida Everglades [J]. Biogeochemistry, 1998, 40(2/3): 347-361.
- [10] Tremblay A, Cloutier L, Lucotte M. Total mercury and methylmercury fluxes via emerging insects in recently flooded hydroelectric reservoirs and a natural lake [J]. Sci Total Environ, 1998, 219(2-3): 209-221.
- [11] Tremblay A, Lucotte M, Rheault I. Methylmercury in a benthic food chain of two hydroelectric reservoirs and a natural lake of northern Québec (Canada) [J]. Water Air Soil Pollut, 1996, 91(3-4): 255-269.
- [12] Liu Z R. Discussion on the concept of 'bioaccumulation' and other three terms [J]. China terminology,

- 2007, 9(3): 52-53.
- 刘志荣. “生物积累”等三个术语概念的探讨[J]. 中国科技术语, 2007, 9(3): 52-53.
- [13] Mason R P, Laporte J M, Andres S. Factors controlling the bioaccumulation of mercury, methylmercury, arsenic, selenium, and cadmium by freshwater invertebrates and fish [J]. Arch Environ Contam Toxicol, 2000, 38(3): 283-297.
- [14] Xie L, Flippin J L, Deighton N, *et al.* Mercury(II) bioaccumulation and antioxidant physiology in four aquatic insects [J]. Environ Sci Technol, 2009, 43(3): 934-940.
- [15] Kainz M, Telmer K, Mazumder A. Bioaccumulation patterns of methyl mercury and essential fatty acids in lacustrine planktonic food webs and fish [J]. Sci Total Environ, 2006, 368(1): 271-282.
- [16] Harding K M, Gowland J A, Dillon P J. Mercury concentration in black flies *Simulium* spp. (Diptera, Simuliidae) from soft-water streams in Ontario, Canada [J]. Environ Pollut, 2006, 143(3): 529-535.
- [17] Kalbitz K, Wennrich R. Mobilization of heavy metals and arsenic in polluted wetland soils and its dependence on dissolved organic matter [J]. Sci Total Environ, 1998, 209(1): 27-39.
- [18] Burns D A, Riva-Murray K, Bradley P M, *et al.* Landscape controls on total and methyl Hg in the upper Hudson River basin, New York, U S A [J]. J Geophys Res-Biogeosci, 2015, 117(G1): 221-221.
- [19] Poste A E, Braaten H F V, De Wit H A, *et al.* Effects of photodemethylation on the methylmercury budget of boreal Norwegian lakes [J]. Environ Toxicol Chem, 2015, 34(6): 1213-1223.
- [20] Cristol D A, Brasso R L, Condon A M, *et al.* The movement of aquatic mercury through terrestrial food webs [J]. Science, 2008, 320(5874): 335-335.
- [21] Raikow D F, Walters D M, Fritz K M, *et al.* The distance that contaminated aquatic subsidies extend into lake riparian zones [J]. Ecol Appl, 2011, 21(3): 983-990.
- [22] Tweedy B N. Effects of fish on emergent insects and their transport of methyl mercury from ponds [D]. Oklahoma: Oklahoma Baptist University, 2012.
- [23] Williams E B, Chumchal M M, Drenner R W, *et al.* Seasonality of odonate-mediated methyl mercury flux from permanent and semi-permanent ponds and potential risk to red-winged blackbirds (*Agelaius phoeniceus*) [J]. Environ Toxicol Chem, 2017, 36(10): 2833-2837.
- [24] Speir S L, Chumchal M M, Drenner R W, *et al.* Methyl mercury and stable isotopes of nitrogen reveal that a terrestrial spider has a diet of emergent aquatic insects [J]. Environ Toxicol Chem, 2014, 33(11): 2506-2509.
- [25] Macdade L S, Rodewald P G, Hatch K A. Contribution of emergent aquatic insects to refueling in spring migrant songbirds [J]. Auk, 2011, 128 (1): 127-137.
- [26] Podar M, Gilmour C C, Brandt C C, *et al.* Global prevalence and distribution of genes and microorganisms involved in mercury methylation [J]. Sci Adv. 2015, 1 (9): e1500675.
- [27] Parízek J, Ostádalová I. The protective effect of small amounts of selenite in sublimate intoxication [J]. Experientia, 1967, 23(2): 142-143.
- [28] Belzile N, Chen Y W, Yang D Y, *et al.* Selenium bioaccumulation in freshwater organisms and antagonistic effect against mercury assimilation [J]. Environ Bioindic, 2009, 4(2): 3-21.
- [29] Mailman M, Stepnuk L, Cicek N, *et al.* Strategies to lower methyl mercury concentrations in hydroelectric reservoirs and lakes: a review [J]. Sci Total Environ, 2006, 368 (1): 224-235.
- [30] Wang X, Wang W X. Selenium induces the demethylation of mercury in marine fish [J]. Environ Pollut, 2017, 231(2): 1543-1551.
- [31] Kalisinska E, Gorecki J, Okonska A, *et al.* Hepatic and nephric mercury and selenium concentrations in common mergansers, *Mergus merganser*, from baltic region, Europe [J]. Environ Toxicol Chem, 2014, 33(2): 421-430.
- [32] Kehrig H A, Hauserdavis R A, Seixas T G, *et al.* Mercury species, selenium, metallothioneins and glutathione in two dolphins from the southeastern Brazilian coast: mercury detoxification and physiological differences in diving capacity [J]. Environ Pollut, 2016, 213: 785-792.

□