

·综述·

DOI: 10.16605/j.cnki.1007-7847.2019.01.012

野生动物重金属污染研究进展

王祥生^a, 娄虎^b, 张明海^{a*}

(东北林业大学 a. 野生动物资源学院; b. 生命科学学院, 中国黑龙江 哈尔滨 150040)

摘要: 重金属污染问题已成为全球热点, 会对野生动物及环境造成严重危害。野生动物体内重金属主要来自食物链的传递, 植物从空气和土壤中吸收重金属离子及其化合物, 被采食后富集到草食性动物体内, 逐级传递, 最终会进入野生动物体内, 对野生动物健康造成严重危害。体内重金属超标会导致鸟类产生生殖障碍, 降低种群数量, 同时也会影响鸟类的行为。体内重金属超标会对哺乳动物骨骼发育、生殖健康等方面产生极大危害, 对哺乳动物繁衍生息产生影响。文中主要综述重金属污染对野生鸟类、野生哺乳动物生长发育的影响; 重金属在生物链传递过程的富集机制及其对野生鸟类、野生哺乳动物的毒理分子机制, 以期对重金属环境污染的预防与治理提供理论基础。

关键词: 野生动物; 重金属污染; 有毒金属; 生物积累

中图分类号: Q958.116, S863+9

文献标识码: A

文章编号: 1007-7847(2019)01-0078-09

Advances in Heavy Metal Pollution in Wildlife

WANG Xiang-sheng^a, LOU Hu^b, ZHANG Ming-hai^{a*}

(a. College of Wildlife Resources; b. College of Life Sciences, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China)

Abstract: Heavy metal pollution has become a global hotspot, causing serious damage to wildlife and environment. The heavy metals in wild animals are mostly from food chains. The plants absorb heavy metal ions and their compounds from air and soil. When the plants are eaten, heavy metals can be enriched in herbivores. They are passed among wild animals and eventually enter their bodies, thereby causing serious harm to them. Excessive amount of heavy metals stored in the body can cause reproductive disorders in birds, reduce their population size, and also affect their behavior. Excessive heavy metals in the body can also do great harm to mammalian bone development and reproductive health, having an impact on mammalian reproduction. Herein, the effects of heavy metal pollution on the growth and development of wild birds and mammals, the enrichment mechanism of heavy metals in the process of biological chain transfer and their toxicological molecular mechanisms were reviewed, which would provide theoretical basis for prevention and management of heavy metal pollution.

Key words: wildlife; heavy metal pollution; toxic metals; bioaccumulation

(*Life Science Research*, 2019, 23(1): 078~086)

随着人类社会的快速发展, 自然生态环境的破坏日趋严重。重金属在生活环境中无处不在, 许多生物种群对于重金属污染有指示作用, 是人类感知重金属超标的哨兵、先锋^[1-2]。重金属超标对鸟类的影响十分明显, 能够导致鸟类产生生殖障碍, 降低种群数量。重金属污染对于野生哺乳

动物的影响同样十分显著, 铅(Pb)、铜(Cu)、砷(As)等重金属能够影响哺乳动物的生殖健康, 使野生哺乳动物精子活力下降, 给生态系统的稳定带来灾难^[3-4]。我们关注的重金属主要包括生活垃圾中的重金属、重金属采矿区的重金属离子及化合物, 植物通过呼吸作用、根吸收将部分重金属吸收到

收稿日期: 2018-06-14; 修回日期: 2018-08-30

作者简介: 王祥生(1993-), 男, 河北沧州人, 硕士研究生; 王祥生和娄虎对本文的贡献相同, 为本文共同第一作者; * 通讯作者: 张明海(1961-), 男, 山东莱州人, 博士, 东北林业大学教授, 主要从事野生动植物生态学研究, Tel: 0451-82192076, E-mail: zhangminghai2004@126.com。

体内,而动物则通过呼吸、采食、反刍、捕食等行为将重金属富集在体内。这些途径都会使重金属在野生动物体内积累且不易排解出去^[5-11]。

目前,有关野生鸟类、野生哺乳动物的重金属污染问题,多数研究仅局限于选取不同组织或器官进行重金属含量的鉴定分析,而对于重金属超标导致的野生鸟类种群数量下降、野生哺乳动物精子活性降低的作用机制却很少深入研究,对于重金属污染如何损伤野生鸟类、野生哺乳动物组织系统的分子机制也有待进一步探索^[12-14]。最为关键的是,在发现、分析、解决重金属对于野生鸟类、野生哺乳动物毒害作用的同时,更需要长远考虑从根本解决重金属污染问题。例如:如何处理生产生活中产生的重金属垃圾;如何沉降空气中的重金属;如何在植物中对重金属进行沉淀和外排,使之不能随着食物链传递到下一营养级。此外,对于已经受到重金属污染的野生鸟类、野生哺乳动物,则需要研究其体内吸收和代谢重金属的途径,利用分子生物学手段对动物体内的重金属进行沉降和外排,把重金属积累的来源和传递途径细化,为后期缓解或治疗重金属污染所引起的野生鸟类畸形、野生哺乳动物组织损伤提供一定的理论和技术支持。本文围绕重金属污染对野生鸟类、野生哺乳动物带来的危害,综述当代研究者重点研究方向和研究现状,以及重金属对于野生动物危害的分子机制,展望如何防治和改善重金属污染的环境现状。

1 重金属对野生鸟类的影响

环境污染日益严重的今天,重金属污染仍为不能治理或很难治理的环境污染项目之一。金属离子作为生物细胞必不可少的功能性成分已有报道,比如:血红蛋白的铁离子是野生鸟类携氧能力的重要成分,野生鸟类缺铁会造成贫血,甚至死亡。但是,重金属污染破坏野生鸟类组织和神经系统的研究同样也有很多报道^[15-16]。重金属的来源之一是矿区开采,如 Cu 矿、Pb 矿、钴(Co)矿、金(Au)矿等,均会有重金属随意排放等污染问题^[17]。除矿区严重污染外,矿区附近重金属也已超标。这些重金属通过空气污染、废水排放、土壤污染等途径不断富集在植物、昆虫、无脊椎动物等体内,而野生鸟类通过采食植物、昆虫、无脊椎动物和海洋鱼类完成野生鸟类重金属污染的转移过程^[18-19]。野生鸟类受到重金属污染后,会在体内积累高浓

度的重金属,表现出骨骼畸形、癌变等症状,故人们可以利用野生鸟类对环境重金属变化的敏感性,将其用于重金属环境污染的生物监测研究^[20]。相关团队对加州燕鸥(California least tern, *Sterna antillarum*)、红嘴巨鸥(caspian tern, *Hydroprogne caspia*)、角鸬鹚(double-crested cormorant, *Phalacrocorax auritus*)、西美鸥(western gull, *Larus occidentalis*) 4 种海鸟的觅食策略展开研究,结果表明体型小的水鸟体内所富集的重金属更能够反映水体或鱼类重金属污染的程度,有利于作为重金属污染的环境监测者^[9-10]。研究者对意大利部分地区 1994-1995 年收集到的 56 种鸟类和 11 种哺乳动物进行了 Pb、镉(Cd)、铬(Cr)、汞(Hg)含量的分析,数据表明这些鸟类是海洋淡水食物链中的一环,其中苍鹭(grey heron, *Ardea cinerea*)是 Hg 污染最严重的食鱼鸟类,对于意大利重金属 Hg 在野生鸟类体内的积累有一定的指示作用^[11]。此外,人们在猫头鹰(*Bubo bubo*)中对不同羽毛重金属 Hg 的浓度进行了检测,发现脱皮对于羽毛中的重金属浓度没有影响,推荐使用野生鸟类的羽毛进行重金属污染的检测^[21]。与海洋沉积物、大型底栖动物、鱼类相比较,野生鸟类群体由于易取样、易分析检测等优点仍是检测海岸线重金属污染的首要选择。但是由于野生鸟类随着季节有迁徙运动,所到之处均有采食行为,因此鸟类体内的重金属来源不能得到较好的确定。野生鸟类重金属检测的物种选择需要综合考虑多种因素,例如:是否具有代表性;是否便于收集材料等。

目前重金属元素对鸟类影响的研究主要集中在 Pb、Hg、Cd 中,对于野生鸟类而言,这并不能够全面反映环境中的污染程度,需要研究者更为细致地探索不同重金属对野生鸟类组织破坏的机制。随着对重金属破坏野生鸟类组织器官原理的探索,研究者发现,一定程度的重金属浓度是允许的。这就涉及到重金属污染物的关键阈值,野生鸟类受到超过某一浓度的重金属后,其生长发育就会受到严重破坏^[22-24]。

Abbasi 等^[14]检测了 48 个巴基斯坦鸟类的羽毛样品,发现尽管已有规定限制重金属的排放,但是在羽毛中检测到的重金属含量仍超出标准范围,说明需要更为严格的标准来限制重金属排放,也需要制定相关策略解决已存在的重金属污染问题。Burger 等^[25]在 1989-2011 年期间对新泽西州大白鹭(great egret, *Ardea alba*)羽毛中砷(As)、Cd、

Cr、Pb、锰(Mn)、Hg 和硒(Se)的含量进行了检测,结果显示:从 1989 年开始实施废弃电池的回收后白鹭羽毛中的铅和镉含量明显下降。然而,汞含量差别很大,特别是以海洋鱼类为食物的物种中汞含量严重超标,这些超出标准的汞是人类大量燃烧化石燃料的结果。表 1 综合给出了重金属污染野生鸟类的检测结果,这些信息表明:1) 使用野生鸟类的羽毛作为重金属污染的“指示剂”,具有较好的检测效果;2) 食鱼野生鸟类体内的 Hg 含量较高;3) 重金属 Pb 可以导致野生鸟类畸形和组织器官癌变。

2 重金属对野生哺乳动物的影响

重金属污染是一个持续性的、不能很快解决的、逐渐富集的过程,土壤和作物的重金属污染是当前世界共同面对的一个难题,不断影响着野生哺乳动物的健康^[35]。矿业开采在给人类社会带来

飞速发展和经济繁荣的同时,也带来了严重的环境问题。矿区重金属多以离子或其化合物形式存在,严重污染着矿区附近的土壤、空气、水体,其中浓度较高的重金属包括 Cd、Cr、Cu、Mn、镍(Ni)、Pb、锌(Zn)、As、Hg、Au、银(Ag)、铁(Fe)、Co 等。植物中的重金属主要来自土壤和空气,动物则通过空气、水体以及采食植物进行重金属的富集^[13,36]。

重金属对野生哺乳动物健康的影响是值得关注的问题。有关单一重金属元素 Cd、Pb、As 超标对野生哺乳动物影响的研究均表明:这些单一重金属污染物对野生哺乳动物肝脏、生殖系统以及内分泌系统都有一定破坏作用^[37-38]。比如: Cd 中毒会使野生哺乳动物出现心肌变性和蜡状坏死,肝细胞浊肿,有些还会出现骨骼肌变性等现象^[39]; Pb 中毒会造成野生哺乳动物体重减轻、中枢神经系统受损,并且会持续降低野生动物的免疫力,使野生哺乳动物在竞争中处于劣势,种群数量不断下降^[39]。

表 1 重金属污染鸟类的检测及结果

Table 1 Detection and results of heavy metal contamination in birds

Species	Detection indicator	Detection site	Result	Author, year, reference
<i>Hydroprogne caspia/Phalacrocorax auritus/Larus occidentalis</i>	Hg, Se, As	Ovum	Birds that feed on fish contain higher levels of Hg	Clatterbuck, 2017, [10]
<i>Columba livia</i>	Pb	Feather	High Pb content in summer	Kouddane, 2016, [26]
<i>Bubo bubo</i>	Hg	Feather	The molting has no effect on the Hg concentration in the feathers	Espin, 2014, [21]
<i>Bubulcus ibis</i>	Zn, Fe, Ni, Cu, Cd, Mn, Cr, As, Li	Ovum and feather	Using feathers to detect heavy metals is better than using eggs, which can affect bird reproduction	Abdullah, 2015, [27]
<i>Sterna sandvicensis</i>	Pb, Cd, Cr, Hg	Feather	Birds that feed on insects have high levels of heavy metals	Alleva, 2006, [12]
<i>Percnopterus</i>	Pb, Cd, Cr, Ni, Co, Cu, Fe, Zn, Mn	Feather	Controlling heavy metal emissions in the environment can effectively solve heavy metal pollution problems	Abbasi, 2015, [14]
<i>Ardea alba</i>	As, Cd, Cr, Pb, Mn, Hg, Se	Feather	Mercury content is seriously exceeded, and some selenium content exceeds the standard	Burger, 2013, [25]
<i>Gyps fulvus</i>	Pb, Hg, Cr	Blood	Cadmium and mercury levels are normal, lead content exceeds the standard	Carneiro, 2015, [28]
<i>Somateria mollissima</i>	Se, As, Cd, Cr, Pb, Cu, Zn	Blood	Lead affects redox reaction in bird blood	Fenstad, 2016, [29]
<i>Branta canadensis/Anas platyrhynchos/Agelaius phoeniceus/Cistothorus palustris</i>	Pb, As, Cd, Hg	Liver, muscle, ovum, feather	Pb content in eggs and feathers is higher than other grassland birds	Tsipoura, 2011, [30]
<i>Anas platyrhynchos</i>	Cr, Cu, Zn, Ag, Cd, Hg, Pb	Feather, liver, muscle	Mercury content is feather>liver>muscle	Plessl, 2017, [31]
<i>Cardinalis cardinalis</i>	As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Se, Zn	Blood, feather	Heavy metals are not sensitive to red bird species	Cooper, 2017, [32]
<i>Bubulcus ibis/Egretta garzetta</i>	Fe, Zn, Pb, Mn, Cd, Cr, Li, Cu, Ni	Eggshell	Fe>Zn>Pb>Mn>Cd>Cr> Li>Cu>Ni	Hashmi, 2013, [33]
<i>Buteo buteo</i>	Cu, Mn, Zn, Pb, Cd	Feather, liver, kidney, lung, intestine, muscle	Use feathers to monitor environmental pollution	Naccari, 2009, [34]

此外, As 中毒也会对神经系统造成损伤^[38]。Hg 作为毒性最高的重金属之一, 在几十年的生活及工业生产中排放量很大。Hg 在野生哺乳动物的脑、肝脏和肾脏中含量最高, 严重影响着野生哺乳动物的正常代谢。雌性野生动物在采食或捕食了汞含量较高的植物或猎物后, 其分泌的乳汁中很快会出现汞, 严重影响了幼仔的健康^[4]。由此可见, 重金属污染严重威胁着野生哺乳动物的生态平衡。单一重金属元素污染的研究已有许多报道, 多种重金属元素共同污染影响野生哺乳动物健康的研究也在逐渐被探索, 如: 大鼠组织受到重金属 Pb、Cu 和 Zn 的共同污染时, Pb 对大鼠体内的 Cu 和 Zn 平衡产生很大的影响, 降低了 Cu 和 Zn 的浓度。Pb 已被证明在几种情况下能够诱导金属硫蛋白(metallothioneins, MTs)的合成, Cu 和 Zn 可以结合 MTs, Cu 和 Zn 在肾脏和心脏中的积累表明这两种金属通过配体形成金属复合物, 这种复合物会在肾脏和心脏中沉积, 影响肾脏和心脏的功能, 也能造成哺乳动物神经紊乱^[3, 40-41]。研究者探究了重金属 Cd、Pb、As 对 HepG2 和 KERTr 细胞活力以及诱导 MTs 合成的影响, 结果表明: 随着重金属 Cd、Pb、As 浓度的增加, 细胞活力下降; 被 Cd、Pb 共同污染的 HepG2 和 KERTr 细胞中, MTs 蛋白被大量诱导。MTs 蛋白水平的升高会导致更高的致癌风险。以上信息提示, 长期接触重金属污染后, 野生哺乳动物体内会大量合成 MTs 蛋白, 最终会影响野生哺乳动物的健康。重金属对野生哺乳动物的单独危害很严重, 但是令人不能理解的是, 当发生两种或多种重金属的共同污染(如 Pb、As)时, 它们具有拮抗作用, 虽然危害也是很严重, 但症状比两种重金属单独破坏组织器官时的情况要轻^[42-44]。

Reglero 等^[7]研究了土壤和水体沉积物中 Pb、Zn、Cd、Cu、As 和 Se 的污染程度, 结果显示: 在河流沉积物中, 污染区比正常区有更高的重金属浓度; 奥尔卡霍矿(Horcajo)垃圾堆旁边一条小溪沉积物 Pb 和 As 的浓度最高, 说明垃圾污染的水源是重金属 Pb、As 含量较高的区域。Pb 能抑制牛羊血红素的合成, 导致贫血, 对牛羊的健康产生影响^[45]。Pb 污染不仅使野生哺乳动物贫血, 还能够降低成年马鹿(red deer, *Cervus elaphus*)的骨重建率, 使马鹿骨骼发育异常, 原因是 Pb 污染使得马鹿成骨细胞的活性降低, 而 Pb 污染也会在骨骼形成的不同阶段产生影响, 使骨骼提前成熟, 且

不利于骨骼损伤的恢复^[46]。人们对 Pb 污染环境下的马鹿和野猪(wild boar, *Sus scrofa*)进行研究, 发现 Pb 污染对马鹿骨骼发育及维生素 A 和维生素 D 促进骨骼发育的功能有影响。Pb 使马鹿骨骼中碳酸盐含量下降, 增加骨折风险, 而野猪较马鹿情况更为严重, 这可能是由于饮食差异造成的。维生素 D 有助于钙和磷的矿化, 使其稳定, 维生素 A 能够调节骨形成细胞的增殖和分化, 并通过维生素 A 受体调节维生素 D 内稳态的平衡, Pb 可通过影响维生素 A 和维生素 D 对野猪和马鹿的骨骼发育产生影响^[45-47]。此外, Pb 对动物体内许多酶如谷胱甘肽(glutathione, GSH)、超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)、谷胱甘肽过氧化物酶(GSH peroxidase, GPX)都有影响。研究者对马鹿在不同饲养条件下(Pb 矿区与正常条件)的睾丸及精子进行取样, 对精子活性进行分析得出: Pb 矿区饲养条件下马鹿睾丸和精子中的 GPX 和 SOD 活性较正常条件下均降低, Pb 污染条件下马鹿睾丸质量和体积增大, 精子膜活力和顶体完整性降低^[41]。相关团队针对 Pb 污染野生有蹄类动物肝脏抗氧化剂展开研究, 发现 Pb 污染降低了马鹿体内的 GSH 水平, 但是雄性野猪体内的 GSH 水平却不受影响; 野猪的 GPX 活性和 Se 水平高于马鹿, 马鹿对 Pb 诱导的氧化应激可能比野猪更敏感^[48]。表 2 综合分析了重金属污染野生哺乳动物的检测结果, 提示重金属污染对于野生哺乳动物有着严重、深远的影响。

3 重金属对野生鸟类和野生哺乳动物影响的分子机制

金属作为生物必不可缺的元素一直被人们所关注, 在空气、土壤、水体、生物体内均有不同浓度且发挥着极其重要的作用。现代工业发展, 通过大量化石燃料燃烧、金属冶炼、工业制造等活动破坏了金属在生态环境中的循环速度, 加速了许多重金属在野生鸟类和野生哺乳动物体内的积累^[53]。每年矿山提炼生产的金属有数百万吨, 这些金属在用于人类生活及商业时, 又会随着生物圈重新分散在空气、植物、动物、水体、土壤中, 最终随食物链传递到野生鸟类、野生哺乳动物体内, 造成组织器官损伤, 甚至危害人类健康。Pb、Cd、As 和 Hg 等重金属对动物胚胎发育有致畸作用, 甚至可以导致动物胚胎死亡。其他重金属如 Mn、Co、Zn 和 Se 等, 被认为是哺乳动物所必需的元

表 2 重金属污染野生哺乳动物的检测及结果
Table 2 Detection and results of heavy metal contamination in mammals

Species	Detection indicator	Detection site	Result	Author, year, reference
<i>Cervus elaphus</i>	Pb, Zn, Cu, Cd, As, Se	Testicle, sperm	Heavy metal Pb reduces sperm activity	Reglero, 2009, [3]
<i>Microtus pennsylvanicus</i>	As	Heart, kidney, lung, intestine, liver, stomach	The accumulation of arsenic in prairie voles is mainly transmitted through the food chain	Saunders, 2010, [49]
<i>Cervus elaphus/Sus scrofa</i>	Pb, Zn, Cu, Cd, As, Se	Liver, palm	Heavy metals affect the redox reaction of red deer and wild boar liver	Reglero, 2008, [7]
<i>Cervus elaphus/Sus scrofa</i>	Pb	Liver, bone	Red deer are more sensitive to lead-induced oxidative stress than wild boar	Rodriguez-Estival, 2013, [5]
<i>Cervus elaphus</i>	Pb	Sperm	Lead pollution increases the chromatin rupture of the red deer sperm and reduces the integrity of the acrosome	Castellanos, 2015, [50]
<i>Cervus elaphus/Capreolus capreolus</i>	Pb	Internal organs	Through the X-ray film, the lead warhead has a profound impact on animals	Knott, 2010, [51]
<i>Muroidea</i>	Pb, Zn, Cu	Blood, liver, kidney, heart, spleen, brain	Lead contamination causes changes in the levels of copper and zinc in the blood, kidneys, heart and spleen of rats, affecting the function of the kidneys and heart, and causing neurological disorders	Ademuyiwa, 2010, [40]
<i>Clethrionomys/Microtus</i>	Pb, Mn, Ni, Zn, Cd, Cr, Cu, Mn	Liver, head	Parasitic and non-parasitic rodent livers are more reliable as heavy metal contamination detection	Jankovská, 2009, [41]
<i>Cervus elaphus</i>	Pb	Liver	Red deer tissue accumulates lead through the food chain	Reglero, 2008, [7]
<i>Cervus elaphus</i>	Pb, Cu	Testicle, sperm	The sperm membrane activity of red deer is reduced, and the decrease of SOD activity affects sperm quality	Castellanos, 2010, [52]

素,对动物生殖发育不同阶段都有重要影响。过量的重金属污染物是工业发展所带来的负面影响,需要我们去研究重金属污染的分子机制^[54]。

Pb、Cu 和 Zn 作为研究较为普遍的重金属在哺乳动物体内的影响较为广泛。Pb 在生物体内可进行多种生化效应,破坏相关的组织、器官。有关野生动物、家禽、家畜的研究已经报道了 Pb 对野生哺乳动物、家禽、家畜的肾毒性、肝毒性、神经毒性、血细胞毒性、免疫毒性、生殖系统毒性等^[3, 5-6, 55-57]。铅中毒不仅能引起肾脏疾病,还会对心脏和神经造成损伤。已有的研究也表明,低浓度的铅对肾脏可能有着潜在影响,会通过细胞表面金属转运蛋白将金属离子转运到细胞内,造成细胞内部分蛋白质变性,导致细胞凋亡,加速肾衰竭的速度^[57]。有蹄类对 Pb 十分敏感,少量的 Pb 便可使其中毒。这些结果表明,在 Pb 进入细胞的过程中,重金属转运蛋白存在可饱和和吸收机制或一些其他限制机制,能够限制细胞对 Pb 的吸收^[58-61]。最近有报道指出,在马鹿的肠、肾、脑、肝中存在高亲和力的 Pb 结合蛋白,如钙敏感受体(calcium-sensing receptor)、胸腺素 4 (thymosin 4)、乙酰辅酶 A 结合蛋白(acyl-CoA binding protein)和 MTs, Pb 进入肠、肾、脑和肝后,这些蛋白质结合重金属 Pb 使其积

累在器官中,破坏正常器官的功能^[61]。此外,脾脏的正常功能也会被重金属 Pb 破坏,然而 Pb 结合蛋白在脾脏中的作用机制尚未被证实,需要进一步的研究。野生哺乳动物受到 Pb 污染的情况下,肾和心脏会积聚 Cu 和 Zn,但原因尚不清楚。Pb 已经被证明能够诱导 MTs 的合成,使野生哺乳动物器官产生癌变^[62-63]。Cu 和 Zn 可以结合 MTs,而 Cu 和 Zn 在肾脏和心脏中积累的浓度较高,这一结果表明两种金属通过某一未知配体和两种金属之间的复合物在这些器官中一起沉积,MTs 可能是这种配体^[44]。

尽管研究者已经发现重金属 Pb、Cu 和 Zn 能够诱导 MTs 的产生,对野生哺乳动物的器官造成损伤。但是重金属 Pb、Cu 和 Zn 通过钙敏感受体、胸腺素 4 和乙酰辅酶 A 结合蛋白这 3 种蛋白质在野生哺乳动物体内积累的机制还有待阐明。金属螯合蛋白是野生鸟类和野生哺乳动物面对重金属污染时的一种解毒机制。这类蛋白质能够在野生鸟类、野生哺乳动物的组织、细胞中结合超标的重金属,并将复合物转运到细胞外,从而减轻重金属污染对于野生鸟类和野生哺乳动物等的毒害作用。此外,许多重金属对野生动物免疫系统表现为免疫抑制作用,如:重金属 Cd 能诱导淋巴细

胞 SOD 抗氧化活性升高,不利于机体免疫功能的正常作用。同时,重金属 Cd 可通过抑制 T 淋巴细胞的增殖引起 T 淋巴细胞亚群改变,比如: L3T4+ 和 L3T4+/Lyt2+ 亚群降低, Lyt2+ 亚群升高。Cd 还可以抑制巨噬细胞的活性,导致免疫力下降,给有机体带来危害^[50, 52]。

4 展望

重金属污染在野生鸟类和野生哺乳动物中的影响日益增加,越来越受到世界各国的重视,重金属 Hg 和 Pb 是常见的野生鸟类和野生哺乳动物污染物。下面我们将结合重金属污染问题的最新进展,展望对于重金属污染问题的预防 and 解决措施,以达到消除重金属污染的目的,具体表现在以下几个方面: 1) Hg 重金属超标会使雌性哺乳动物乳汁含 Hg 超标,致使野生哺乳动物幼崽畸形,增加肾脏和肝脏的衰竭,严重影响野生哺乳动物的生长发育。针对该现象,可以从以下几点开展深入探讨: 重金属 Hg 在哺乳动物母体中是通过什么途径分泌到乳汁中的? 我们是否能够阻断重金属进入乳汁中的途径从而保护幼崽的安全? 重金属 Hg 又是如何破坏幼崽的正常生长发育? 2) 自然环境中废旧电池随意排放,产生的 Hg 和 Pb 都是野生鸟类和野生哺乳动物最易接触到的重金属污染物。已有报道显示, Pb 污染降低了成年马鹿精子的顶体完整性; 重金属 Pb 能够致使精子中 GSH 过氧化物酶活性增加,精子 DNA 损伤增高。那么重金属 Pb 如何进入睾丸? 与何种物质结合? 又怎么影响精原细胞的减数分裂? 重金属 Pb 如何调控精子中相关基因的表达? 又如何从分子生物学的角度解释顶体完整性被破坏的分子机制? 3) 随着分子生物学的发展,利用微生物氧化还原反应对环境中的重金属离子进行还原,生成纳米金属颗粒、纳米金属化合物等已经取得成功。研究者可利用微生物的氧化还原反应去治理重金属矿区和生活垃圾排放到环境中的重金属,使其不能够被植物、动物吸收,不能够扩散到环境中,从源头解决重金属污染问题^[64]; 4) 显微技术的进步,特别是荧光标记技术和电子显微镜技术,极大地促进了重金属对野生动物污染分子机制的研究。研究者可以利用模式动物,结合荧光标记显微技术来确定重金属进入动物体内后作用于哪些细胞中; 5) 植物作为重金属传递给野生鸟类、野生哺乳动物中重要的食物链一环,我们可在

植物吸收重金属后采取相关措施,使得重金属固定在植物体内或者从植物体内排出,从而使其不能传递给下一营养级; 6) 铜离子转运蛋白及其他金属在植物根系吸收过程中的分子机制已经被报道出来,可以利用植物吸收转化重金属的功能,将土壤、大气、水源等中的重金属转移到植物体内,随后通过处理重金属超标的植物来治理重金属污染区域,恢复正常生态^[65]; 7) 目前有关重金属污染对野生哺乳动物尤其是大型兽类影响的研究仍较少,可能是物种个体不易取材、个体稀缺等原因,为了保护濒危物种,需要进一步开展相关工作。

重金属在生物体内难以代谢,对野生鸟类、野生哺乳动物造成的伤害和危害往往是不可逆的,甚至会影响野生动物后代乃至种群,从而造成生态失衡。无论是从保护野生动物还是从生态安全角度出发,治理重金属污染都迫在眉睫。由于重金属一旦污染,难以消除,而且各种重金属元素的消除方法也不尽相同,治理过程非常困难。因此,加强环境监测、加强重工业管理是可行的、从源头解决重金属污染的措施之一。此外,改良土壤、合理施肥可以减少植物对重金属的吸收,减少对下一营养级的传递。对于野生鸟类、野生哺乳动物而言,我们需要共同保护它们的栖息地环境,实现可持续发展。

参考文献(References):

- [1] SCHALIE W H, GARDNER H J, BANTLE J A, *et al.* Animals as sentinels of human health hazards of environmental chemicals[J]. *Environmental Health Perspectives*, 1999, 107(4): 309-315.
- [2] BACKER L C, GRINDEM C B, CORBETT W T, *et al.* Pet dogs as sentinels for environmental contamination[J]. *Science of the Total Environment*, 2001, 274(1-3): 161-169.
- [3] REGLERO M M, TAGGART M A, CASTELLANOS P, *et al.* Reduced sperm quality in relation to oxidative stress in red deer from a lead mining area[J]. *Environmental Pollution*, 2009, 157(8-9): 2209-2215.
- [4] BEYER W N, GASTON G, BRAZZLE R, *et al.* Deer exposed to exceptionally high concentrations of lead near the Continental Mine in Idaho, USA[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2007, 26(5): 1040-1046.
- [5] RODRIGUEZ-ESTIVAL J, ALVAREZ-LLORET P, RODRIGUEZ-NAVARRO A B, *et al.* Chronic effects of lead (Pb) on bone properties in red deer and wild boar: relationship with vitamins A and D₃[J]. *Environmental Pollution*, 2013, 174: 142-149.
- [6] RODRIGUEZ-ESTIVAL J, BARASONA J A, MATEO R. Blood Pb and delta-ALAD inhibition in cattle and sheep from a Pb-polluted mining area[J]. *Environmental Pollution*, 2012, 160(1): 118-124.

- [7] REGLERO M M, MONSALVE-GONZALEZ L, TAGGART M A, *et al.* Transfer of metals to plants and red deer in an old lead mining area in Spain[J]. *Science of the Total Environment*, 2008, 406(1-2): 287-297.
- [8] STANLEY W, ROSCOE D E, HAWTHORNE E, *et al.* Food chain aspects of chlordane poisoning in birds and bats[J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2001, 40(2): 285-291.
- [9] FACEMIRE C F, GROSS T S, GUILLETTE L J. Reproductive impairment in the Florida panther: nature or nurture?[J]. *Environmental Health Perspectives*, 1995, 103(suppl. 4): 79-86.
- [10] CLATTERBUCK C A, LEWISON R L, DODDER N G, *et al.* Seabirds as regional biomonitors of legacy toxicants on an urbanized coastline[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 619-620: 460-469.
- [11] ZHANG W W, MA J Z. Waterbirds as bioindicators of wetland heavy metal pollution[J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2011, 10: 2769-2774.
- [12] ALLEVA E, FRANCIÀ N, PANDOLFI M, *et al.* Organochlorine and heavy-metal contaminants in wild mammals and birds of Urbino-Pesaro Province, Italy: an analytic overview for potential bioindicators[J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2006, 51(1): 123-134.
- [13] KAABI R, ABDERRABBA M, GÓMEZ-RUIZ S, *et al.* Bioinspired materials based on glutathione-functionalized SBA-15 for electrochemical Cd (II) detection[J]. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2016, 234: 336-346.
- [14] ABBASI N A, JASPERS V L, CHAUDHRY M J, *et al.* Influence of taxa, trophic level, and location on bioaccumulation of toxic metals in bird's feathers: a preliminary biomonitoring study using multiple bird species from Pakistan[J]. *Chemosphere*, 2015, 120: 527-537.
- [15] KOIVULA M J, EEVA T. Metal-related oxidative stress in birds[J]. *Environmental Pollution*, 2010, 158(7): 2359-2370.
- [16] GARCIA-FERNANDEZ A J, ESPIN S, MARTINEZ-LOPEZ E. Feathers as a biomonitoring tool of polyhalogenated compounds: a review[J]. *Environmental Science Technology*, 2013, 47(7): 3028-3043.
- [17] SANCHEZ-VIROSTA P, ESPIN S, GARCIA-FERNANDEZ A J, *et al.* A review on exposure and effects of arsenic in passerine birds[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 512-513: 506-525.
- [18] 周立志, 李进华, 尹华宝, 等. 三种重金属元素在鹭卵中富集特征的初步研究[J]. *应用生态学报*(ZHOU Li-zhi, LI Jin-hua, YIN Hua-bao, *et al.* Enrichment characteristics of heavy metals in heron eggs[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*), 2005, 16(10): 1932-1937.
- [19] 阮禄章, 张迎梅, 赵东芹, 等. 白鹭作为无锡太湖地区环境污染指示生物的研究[J]. *应用生态学报*(RUAN Lu-zhang, ZHANG Ying-mei, ZHAO Dong-qin, *et al.* *Egretta garzetta* as a bioindicator of environmental pollution in Tai Lake region[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*), 2003, 14(2): 263-268.
- [20] LODENIUS M, SOLONEN T. The use of feathers of birds of prey as indicators of metal pollution[J]. *Ecotoxicology*, 2013, 22(9): 1319-1334.
- [21] ESPIN S, MARTINEZ-LOPEZ E, LEON-ORTEGA M, *et al.* Factors that influence mercury concentrations in nestling eagle owls (*Bubo bubo*)[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 470-471: 1132-1139.
- [22] RAINIO M J, KANERVA M, SALMINEN J P, *et al.* Oxidative status in nestlings of three small passerine species exposed to metal pollution[J]. *Science of the Total Environment*, 2013, 454-455: 466-473.
- [23] 宫茜茜, 金志民, 邹红菲. 鸡西地区[树]麻雀组织中铅、镉、铬的残留量[J]. *东北林业大学学报*(GONG Qian-qian, JIN Zhi-min, ZOU Hong-fei. Concentrations of lead, cadmium and chromium in *Passer montanus* at Jixi Mining Area in Heilongjiang Province[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2012, 40(6): 95-98.
- [24] 吕尤, 宫茜茜, 李自亲. 牡丹江市工业区麻雀体内重金属残留分析[J]. *生态与农村环境学报*(LÜ You, GONG Qian-qian, LI Zi-qin. Heavy metal contents in organs of sparrow in Mudanjiang[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*), 2008, 24(3): 94-96.
- [25] BURGER J. Temporal trends (1989-2011) in levels of mercury and other heavy metals in feathers of fledgling great egrets nesting in Barnegat Bay, NJ[J]. *Environmental Research*, 2013, 122: 11-17.
- [26] KOUDDANE N, MOUHIR L, FEKHAOU M, *et al.* Monitoring air pollution at Mohammedia (Morocco): Pb, Cd and Zn in the blood of pigeons (*Columba livia*)[J]. *Ecotoxicology*, 2016, 25(4): 720-726.
- [27] ABDULLAH M, FASOLA M, MUHAMMAD A, *et al.* Avian feathers as a non-destructive bio-monitoring tool of trace metals signatures: a case study from severely contaminated areas[J]. *Chemosphere*, 2015, 119: 553-561.
- [28] CARNEIRO M, COLACO B, BRANDAO R, *et al.* Assessment of the exposure to heavy metals in griffon vultures (*Gyps fulvus*) from the Iberian Peninsula[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2015, 113: 295-301.
- [29] FENSTAD A A, BUSTNES J O, BINGHAM C G, *et al.* DNA double-strand breaks in incubating female common eiders (*Somateria mollissima*): comparison between a low and a high polluted area[J]. *Environmental Research*, 2016, 151: 297-303.
- [30] TSIPOURA N, BURGER J, NEWHOUSE M, *et al.* Lead, mercury, cadmium, chromium, and arsenic levels in eggs, feathers, and tissues of Canada geese of the New Jersey Meadowlands[J]. *Environmental Research*, 2011, 111(6): 775-784.
- [31] PLESSL C, JANDRISITS P, KRACHLER R, *et al.* Heavy metals in the mallard *Anas platyrhynchos* from eastern Austria[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 580: 670-676.
- [32] COOPER Z, BRINGOLF R, COOPER R, *et al.* Heavy metal bioaccumulation in two passerines with differing migration strategies[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 592: 25-32.

- [33] HASHMI M Z, MALIK R N, SHAHBAZ M. Heavy metals in eggshells of cattle egret (*Bubulcus ibis*) and little egret (*Egretta garzetta*) from the Punjab Province, Pakistan[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2013, 89: 158–165.
- [34] NACCARI C, CRISTANI M, CIMINO F, *et al.* Common buzzards (*Buteo buteo*) bio-indicators of heavy metals pollution in Sicily (Italy)[J]. *Environment International*, 2009, 35(3): 594–598.
- [35] FERREIRA D S E, FREIRE A P, SALGUEIRO A R, *et al.* Quantitative-spatial assessment of soil contamination in S. Francisco de Assis due to mining activity of the Panasqueira mine (Portugal)[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, 20(11): 7534–7549.
- [36] SEYFFERTH A L, MCCURDY S, SCHAEFER M V, *et al.* Arsenic concentrations in paddy soil and rice and health implications for major rice-growing regions of Cambodia[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(9): 4699–4706.
- [37] LI J, LI C, SUN H J, *et al.* Arsenic relative bioavailability in contaminated soils: comparison of animal models, dosing schemes, and biological end points[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(1): 453–461.
- [38] CHANG C Y, XU X H, LIU C P, *et al.* Heavy metal accumulation in balsam pear and cowpea related to the geochemical factors of variable-charge soils in the Pearl River Delta, South China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, 16(7): 1790–1798.
- [39] SINGH R D, TIWARI R, KHAN H, *et al.* Arsenic exposure causes epigenetic dysregulation of IL-8 expression leading to proneoplastic changes in kidney cells[J]. *Toxicology Letters*, 2015, 237: 1–10.
- [40] ADEMUYIWA O, AGARWAL R, CHANDRA R, *et al.* Effects of sub-chronic low-level lead exposure on the homeostasis of copper and zinc in rat tissues[J]. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 2010, 24(3): 207–211.
- [41] JANKOVSKÁ I, MIHOLOVA D, LANGROVA I, *et al.* Influence of parasitism on the use of small terrestrial rodents in environmental pollution monitoring[J]. *Environmental Pollution*, 2009, 157(8–9): 2584–2586.
- [42] XUE S, SHI L, WU C, *et al.* Cadmium, lead, and arsenic contamination in paddy soils of a mining area and their exposure effects on human HEPG2 and keratinocyte cell-lines[J]. *Environmental Research*, 2017, 156: 23–30.
- [43] KWOK C K, YANG S M, MAK N K, *et al.* Ecotoxicological study on sediments of Mai Po marshes, Hong Kong using organisms and biomarkers[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2010, 73(4): 541–549.
- [44] CHASAPIS C T, LOUSIDOU A C, SPILIOPOULOU C A, *et al.* Zinc and human health: an update[J]. *Archives of Toxicology*, 2012, 86(4): 521–534.
- [45] DITTMER K E, THOMPSON K G. Vitamin D metabolism and rickets in domestic animals: a review[J]. *Veterinary Pathology*, 2011, 48(2): 389–407.
- [46] AHMADIEH H, ARABI A. Vitamins and bone health: beyond calcium and vitamin D[J]. *Nutrition Reviews*, 2011, 69(10): 584–598.
- [47] ROBBINS J A, ARAGAKI A, CRANDALL C J, *et al.* Women's Health Initiative clinical trials: interaction of calcium and vitamin D with hormone therapy[J]. *Menopause*, 2014, 21(2): 116–123.
- [48] RODRIGUEZ -ESTIVAL J, MARTINEZ -HARO M, MONSALVE -GONZALEZ L, *et al.* Interactions between endogenous and dietary antioxidants against Pb-induced oxidative stress in wild ungulates from a Pb polluted mining area [J]. *Science of the Total Environment*, 2011, 409(14): 2725–2733.
- [49] SAUNDERS J R, KNOPPER L D, KOCH I, *et al.* Arsenic transformations and biomarkers in meadow voles (*Microtus pennsylvanicus*) living on an abandoned gold mine site in Montague, Nova Scotia, Canada[J]. *Science of the Total Environment*, 2010, 408(4): 829–835.
- [50] CASTELLANOS P, DEL OLMO E, FERNÁNDEZ-SANTOS M R, *et al.* Increased chromatin fragmentation and reduced acrosome integrity in spermatozoa of red deer from lead polluted sites[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 505: 32–38.
- [51] KNOTT J, GILBERT J, HOCCOM D G, *et al.* Implications for wildlife and humans of dietary exposure to lead from fragments of lead rifle bullets in deer shot in the UK[J]. *Science of the Total Environment*, 2010, 409(1): 95–99.
- [52] CASTELLANOS P, REGLERO M M, TAGGART M A, *et al.* Changes in fatty acid profiles in testis and spermatozoa of red deer exposed to metal pollution[J]. *Reproductive Toxicology*, 2010, 29(3): 346–352.
- [53] NRIAGU J O. A silent epidemic of environmental metal poisoning?[J] *Environmental Pollution*, 1988, 50(1–2): 139–161.
- [54] YOKEL R A, LASLEY S M, DORMAN D C. The speciation of metals in mammals influences their toxicokinetics and toxicodynamics and therefore human health risk assessment[J]. *Journal of Toxicology and Environmental Health Part B: Critical Reviews*, 2006, 9(1): 63–85.
- [55] ABAM E, OKEDIRAN B S, ODUKOYA O O, *et al.* Reversal of ionoregulatory disruptions in occupational lead exposure by vitamin C[J]. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 2008, 26(3): 297–304.
- [56] ADEMUYIWA O, UGBAJA R N, ROTIMI S O, *et al.* Erythrocyte acetylcholinesterase activity as a surrogate indicator of lead-induced neurotoxicity in occupational lead exposure in Abeokuta, Nigeria[J]. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 2007, 24(2): 183–188.
- [57] ADEMUYIWA O, UGBAJA R N, OJO D A, *et al.* Reversal of aminolevulinic acid dehydratase (ALAD) inhibition and reduction of erythrocyte protoporphyrin levels by vitamin C in occupational lead exposure in Abeokuta, Nigeria[J]. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 2005, 20(3): 404–411.
- [58] HU H, ARO A, PAYTON M, *et al.* The relationship of bone and blood lead to hypertension. The Normative Aging Study[J]. *JAMA*, 1996, 275(15): 1171–1176.

- [59] MUNTNER P, HE J, VUPPUTURI S, *et al.* Blood lead and chronic kidney disease in the general United States population: results from NHANES III[J]. *Kidney International*, 2003, 63(3): 1044–1050.
- [60] LIN J L, LIN-TAN D T, HSU K H, *et al.* Environmental lead exposure and progression of chronic renal diseases in patients without diabetes[J]. *The New England Journal of Medicine*, 2003, 348(4): 277–286.
- [61] MENKE A, MUNTNER P, BATUMAN V, *et al.* Blood lead below 0.48 micromol/L (10 microg/dL) and mortality among US adults[J]. *Circulation*, 2006, 114(13): 1388–1394.
- [62] HANDLOGTEN M E, SHIRAIISHI N, AWATA H, *et al.* Extracellular Ca(2+)-sensing receptor is a promiscuous divalent cation sensor that responds to lead[J]. *American Journal of Physiology*, 2000, 279(6): F1083–F1091.
- [63] QU W, DIWAN B A, LIU J, *et al.* The metallothionein-null phenotype is associated with heightened sensitivity to lead toxicity and an inability to form inclusion bodies[J]. *American Journal of Physiology*, 2002, 160(3): 1047–1056.
- [64] BOZDAG G O, KAYA A, KOC A, *et al.* Characterization of a cDNA from beta maritima that confers nickel tolerance in yeast[J]. *Gene*, 2014, 538(2): 251–257.
- [65] MARTÍNEZ-LÓPEZ S, MARTÍNEZ-SÁNCHEZ M J, PÉREZ-SIRVENT C, *et al.* Screening of wild plants for use in the phytoremediation of mining-influenced soils containing arsenic in semiarid environments[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2014, 14(4): 794–809.

(上接第 64 页)

- [52] FRAGA R, RODRÍGUEZ H, GONZÁLEZ T. Transfer of the gene encoding the *NapA* acid phosphatase of *Morganella morganii* to a *Burkholderia cepacia* strain[J]. *Acta Biotechnologica*, 2001, 21(4): 359–369.
- [53] TORRIANI-GORINI A, YAGIL E, SILVER S. Phosphate in Microorganisms: Cellular and Molecular Biology[M]. Washington: American Society for Microbiology Press, 1994: 1–4.
- [54] POMPEI R, CORNAGLIA G, INGIANNI A, *et al.* Use of a novel phosphatase test for simplified identification of species of the tribe *Proteeae*[J]. *Journal of Clinical Microbiology*, 1990, 28(6): 1214–1218.
- [55] POMPEI R, INGIANNI A, FODDIS G, *et al.* Patterns of phosphatase activity among enterobacterial species[J]. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 1993, 43(1): 174–178.
- [56] WACKETT L P, SHAMES S L, VENDITTI C P, *et al.* Bacterial carbon-phosphorus lyase: products, rates, and regulation of phosphonic and phosphinic acid metabolism[J]. *Journal of Bacteriology*, 1987, 169(2): 710–717.
- [57] KERTESZ M, ELGORRIAGA A, AMRHEIN N. Evidence for two distinct phosphonate-degrading enzymes (C-P lyases) in *Arthrobacter* sp. GLP-1[J]. *Biodegradation*, 1991, 2(1): 53–59.
- [58] BHARGAVA T, DATTA S, RAMACHANDRAN V, *et al.* Virulent *Shigella* codes for a soluble apyrase: identification, characterization and cloning of the gene[J]. *Current Science*, 1995, 68: 293–300.
- [59] PATEL K J, SINGH A K, NARESHKUMAR G, *et al.* Organic-acid-producing, phytate-mineralizing rhizobacteria and their effect on growth of pigeon pea (*Cajanus cajan*)[J]. *Applied Soil Ecology*, 2010, 44(3): 252–261.
- [60] GILES C D, HSU P C, RICHARDSON A E, *et al.* Plant assimilation of phosphorus from an insoluble organic form is improved by addition of an organic anion producing *Pseudomonas* sp.[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 68(1): 263–269.