

重金属污染对鸟类的影响

李 峰^{1,2}, 丁长青^{1,*}

(1. 中国科学院动物研究所, 北京 100080 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 : 鸟类属于高等脊椎动物, 是食物链中的高级消费者, 由于生物富集作用, 鸟类容易受到环境中污染物质的影响。鸟类羽毛和卵壳中的重金属浓度可以反映其所处环境中重金属的污染状况, 因此可以用鸟类作为指示生物来监测环境中的重金属污染。对重金属污染的来源和特征进行了介绍, 阐述了重金属污染对环境安全构成威胁的原因, 分析了汞、铅、镉、砷、铜等几种重金属元素在鸟体内富集的特点及其对鸟类的危害。重金属污染物在不同生物体内的浓度存在差异, 反映出它们通过食物链的生物富集和放大, 对环境和鸟类的毒害作用有所增加。建议选择野生鹭类、麻雀和喜鹊等鸟类作为指示生物监测环境中的重金属污染。

关键词 : 重金属污染; 鸟类; 环境监测; 指示生物

文章编号: 1000-0933 (2007) 01-0296-08 中图分类号: Q142, Q958, Q959.7 文献标识码: A

Effects of heavy metal pollution on birds

Li Feng^{1,2}, Ding Changqing^{1,*}

1 Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Acta Ecologica Sinica 2007 27 (1) 0296 ~ 0303.

Abstract : Many widespread and common bird species are at, or near, the top of the food chain and consequently prone to accumulating environmental pollutants. Because levels of heavy metals in the feathers and eggshells of birds reflect the background abundance of these pollutants birds can be useful indicators of heavy metal pollution in the environment. This paper introduces sources and characteristics of heavy metal pollution and describes the threats these substances pose to the environment, with particularly emphasis on the effects of specific heavy metals (Hg, Pb, Cd, As, Cu) on birds. Comparison of concentrations of heavy metals at different levels in the food chain indicates that processes of bioaccumulation and biomagnification cause these pollutants to reach significantly greater concentrations at higher trophic levels, which is where they pose the greatest threat to birds and the environment in general. Previous studies on birds as bioindicators of environmental pollution, the characteristics of heavy metal accumulation in the tissues of birds, directions for future research and guidelines for environmental monitoring are discussed. Herons (Ardeidae), sparrows (Passerinae) and common magpies (Corvidae) are suggested as useful bioindicators of environmental pollution.

Key Words : environmental pollution; bioaccumulation; biomagnification; bioindicator; food chain

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 30270265, 30570257)

收稿日期: 2005-11-30; 修订日期: 2006-06-15

作者简介: 李峰 (1980 ~), 男, 广西柳州人, 硕士生, 主要从事鸟类学和动物生态学研究. E-mail: lifeng@ioz.ac.cn

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: cqding@mx.cei.gov.cn

致谢: 中国科学院动物研究所许木启研究员对本文写作给予帮助, 新西兰鸟类学家 Ron Moorhouse 先生润色英文摘要, 特此致谢!

Foundation item : The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China (No. 30270265, 30570257)

Received date 2005-11-30; **Accepted date** 2006-06-15

Biography : Li Feng, Master candidate, mainly engaged in ornithology and bioecology. E-mail: lifeng@ioz.ac.cn

人类在改造客观世界、提高生活质量的同时 ,对环境的破坏日益加重。随着环境质量的下降 ,许多动物的栖息地遭到破坏 ,生物多样性和生态平衡受到严重威胁。20 世纪 60 年代 ,《寂静的春天》^[1]一书的出版唤起了公众对环境污染危害的关注。

环境中的污染物主要分为 4 类 ,即工业污染 (三废)、农药污染、放射性污染和噪音污染。人类生产生活中产生或排放的重金属对大气、水体、土壤、生物圈等造成的污染称为重金属污染。

重金属在空气、土壤和水体中的存在对生物有机体产生严重影响 ,并且因其在食物链中的生物富集与放大而极具危险性。例如在浮游植物→桡足类→鱼类这一典型海洋食物链的传递过程中 ,汞的浓度随营养级的升高而增加^[2]。随着日本 1953 ~ 1972 年水俣病 (汞污染 ,日本熊本县水俣湾的居民因食用被汞废水污染的鱼虾 ,导致近万人患中枢神经疾病 ,283 人甲基汞中毒 ,60 余人死亡)、1955 ~ 1972 骨痛病 (镉污染)以及 1961 年四日市哮喘 (SO₂和重金属粉尘复合污染)等事件的发生 ,重金属污染问题开始引起人们的高度重视。

鸟类属于高等脊椎动物 ,是食物链中的高级消费者 ,其体温高 ,新陈代谢旺盛 ,因此从环境中获取物质相对更多、“速率”更快 ,受到环境中污染物质的影响更为明显。鸟类生活在污染的环境中 ,取食受到污染的食物 ,不仅损害健康 ,而且某些物质还会在体内不断积累 ,因为营养级别越高的种类 ,有害物质积累的剂量越大 ,从而会导致中毒甚至死亡。

Rikuo 等^[3]研究了日本 Shiranui 海汞污染区域鸟类翼羽的汞浓度 (湿重) :食鱼鸟为 7.1 μg/g ,杂食性涉禽为 5.5 μg/g ,食肉鸟为 3.6 μg/g ,其它杂食性鸟为 1.5 μg/g ,食草涉禽为 0.9 μg/g。Hahn 等^[4]报道食鱼猛禽羽毛汞浓度最高 ,然后依次是陆生猛禽、杂食性鸟和草食性鸟。处于食物链越高等级的鸟类 ,重金属污染物富集的程度越高。

1 重金属污染

重金属污染是陆地生态系统中的重金属浓度超过自然背景水平且导致生态破坏或环境质量下降的一种现象。重金属主要是指汞、镉、铅、铜、铬以及类金属砷等生物毒性显著的重金属 ,以及具有一定毒性的锌、钴、镍、锡等。

由于重金属在人类生产和生活中得到越来越广泛的应用 ,这使得环境中存在着各种各样的重金属污染源。重金属污染的种类和来源如表 1 所示^[5]。

表 1 重金属污染的种类及来源

种类 Type	来源 Source	
	自然界 Natural	人为 Artificial
大气 Atmospheric	宇宙天体作用及地球上各种地质作用 Cosmic rays and various geological movements of the earth	工业生产、汽车尾气排放及汽车轮胎磨损产生的大量含重金属的有害气体和粉尘 A great deal of harmful gas and dust containing heavy metals are produced by industrial waste , automobile emissions and automobile tires
水体 Water	水与土壤、岩石的相互作用 Chemical interactions between water , soil and rocks	未经适当处理即向外排放的工矿业废水、生活污水 ;受流水作用影响的废弃物堆放场以及富含重金属的大气沉降物 Industrial waste water and untreated sewage , refuse dumps and atmosphere sinks containing heavy metals
土壤 Soil	母岩和残落的生物物质 Contaminated rocks and biomaterials	在金属矿床开发、城市化、固体废弃物堆积以及施用化肥、农药、污泥及污水灌溉 Mining , building , accumulated solid wastes , agrochemicals , and dirty water irrigation

2 重金属污染对鸟类的危害

重金属主要由消化道和呼吸道进入生物体内 ,少量可通过皮肤和粘膜吸收。重金属污染的特点是 : (1) 水体中的某些重金属可在微生物作用下转化为毒性更强的金属化合物 ,如汞的甲基化作用 ; (2) 重金属的价态不同 ,其活性与毒性不同。其形态可随 pH 值和氧化还原条件而转化 ; (3) 在天然水体中只要有微量重金属

(一般为 $1 \sim 10 \text{ mg/L}$)即可产生毒性效应,汞和镉的毒性更强,致毒浓度为 $0.01 \sim 0.001 \text{ mg/L}$; (4)食物链中的低等级生物从环境中摄取的重金属,可通过生物富集和放大作用,在较高等级生物体内成千上万倍地富集起来,造成慢性中毒。

2.1 汞 (Hg)

汞是一种能够引发生物机体不可逆损伤的重金属。汞污染已造成日本的水俣病、伊拉克的氯化甲基汞污染粮食和瑞典野鸭大量死亡等事件。因此,汞被认为是重金属污染的“主犯”。汞的污染源主要有:氯碱生产、油漆颜料、电气仪表制造、矿石的开采和冶炼等行业排放的工业三废,各种燃烧源排放的含汞废气及城市含汞污水。

有机汞毒性较大,其中以甲基汞为最。汞在鸟类体内的分布具有较强的选择性,主要蓄积于肝脏和肾脏^[6]。卵中的 Hg 含量超过 $1.5 \sim 18 \text{ mg/kg}$ 就足以导致卵重下降、畸形、孵化率降低、生长率以及雏鸟成活率的降低^[7]。环颈雉 (*Phasianus colchicus*) 肝脏中的汞达到 $3 \sim 13 \text{ mg/kg}$ 时孵化率显著降低^[8]。甲基汞还会导致绿头鸭 (*Anas platyrhynchos*) 的雏鸟警戒反应减少^[9]。

研究表明,硒、锌、铜、维生素 C 和维生素 E 对汞的毒性具有一定的拮抗作用^[10,11]。

2.2 铅 (Pb)

铅是污染物中毒性很大的一种重金属元素。铅 (Pb) 中毒的来源广泛,主要有:油漆、涂料、蓄电池、做屋顶的铅薄膜、钓鱼用的重铅、子弹头、润滑油、铅矿废物、煤燃烧产生的工业废气、汽车尾气等。

铅在动物体内具有蓄积作用,90% 沉积在骨骼中,当重新进入血液时可引起铅中毒,导致神经系统、造血器官和肾脏等发生病变。铅在麻雀 (*Passer montanus*) 的死亡和疾病个体中的含量要比健康个体中的高^[12]。铅可以对免疫系统细胞产生损伤,引起免疫功能的损害^[13]。铅中毒还可直接作用于鸡红细胞,引起细胞核浓缩^[14]。

在许多国家都有使用铅制成的霰弹狩猎的习俗,因此在湖沼等湿地底部堆积了大量铅砂。狩猎散落的铅砂被天鹅、雁、鸭类等误认为是砂粒而取食。在美国,每年放出铅弹 $2400 \sim 3000 \text{ t}$,有 $160 \sim 240$ 万只水禽因此丧生;在日本北海道的宫岛沼泽,1989 年和 1990 年有 100 只以上的小天鹅 (*Cygnus columbianus*) 和白额雁 (*Anser albifrons*) 因铅中毒死亡。英国因误食钓鱼铅坠所致铅中毒的疣鼻天鹅 (*Cygnus olor*) 每年达 3000 只以上。Stevenson 等^[15]对 1997 年加拿大第一个禁止使用铅弹区建立前后游禽和潜鸭翼骨的铅含量进行了对比研究,发现 2000 年在绿头鸭和北美黑鸭 (*Anas rubripes*) 翼骨中检验出的铅的含量比 1989 年和 1990 年显著降低 ($11 \mu\text{g/g} \rightarrow 4.8 \mu\text{g/g}$, $P < 0.01$)。

王君^[16]报道铁缺乏会加重机体铅的蓄积和毒性,增加体内铁含量有可能降低铅的毒性作用。锌和硒对铅的毒性具有一定的拮抗作用^[17]。

2.3 镉 (Cd)

镉污染已成为危害生态环境和人畜健康最严重的公害之一。1972 年世界粮农组织 (FAO) 与世界卫生组织 (WHO) 联合专家委员会指出镉是仅次于黄曲霉毒素和砷的食品污染物。1984 年联合国环境规划署将镉列为全球范围内 12 种有害物质中的首位。镉的主要来源是采矿、冶炼、废物焚烧等排放的废弃物。

肾脏是镉的主要靶器官,蓄积最多,其次是肝脏、肺和肌肉^[18]。镉能显著降低禽类的生殖和生长性能,造成贫血、生长受阻、产卵量下降、蛋壳品质降低、孵化率下降和死亡率增加等^[19]。野生小蓝鹭 (*Egretta caerulea*) 生长率和出飞率的降低与体内 Cd、Pb 的积累相关^[20]。氯化镉中毒,可造成鸭严重贫血,抑制生长,引起肝、胆、胃、甲状腺病变^[21]。近年,我国江西等地先后报道了鸡、鸭镉中毒的自然病例。

2.4 砷 (As)

砷是一种半金属元素,兼有金属与非金属的性质。砷在自然界分布范围很广,在含砷金属矿的开采、冶炼,以及用砷作原材料生产玻璃、颜料、药物、纸张以及燃煤的过程中所产生的三废都含有砷及其化合物。据估计,全球每年自然释放到环境中的砷约 5000 t ,而人为污染所导致的砷释放则超过 23600 t 。

元素砷毒性很低,而砷化合物均有毒性,其毒性排序如下: $\text{AsH}_3 > \text{As}^{3+} > \text{As}^{5+} > \text{RAsX}$ (有机砷化合物) $> \text{As}^0$ 。砷在体内排泄缓慢,可造成蓄积性中毒,神经系统、肝脏、肾脏、细胞免疫系统和生殖系统是主要靶器官。砷及其化合物有致癌作用,长期接触无机砷化合物可引起皮肤癌、肺癌,可能还有肝癌。禽类砷中毒后出现下肢麻痹、瘫痪,最后进入嗜睡状态直至死亡。砷可导致成鸭体重及肝脏重量减轻并使孵蛋时间延长、蛋重量减轻、蛋壳变薄、雏鸭生长缓慢。砒霜 (As_2O_3) 对肉鸡口服的 LD_{50} (半数致死量) 为 24.4934mg/kg [22]。

戴宇飞等 [23] 研究表明,硒可促进砷从血液中排出,对砷毒性具有一定的拮抗作用。

2.5 铜 (Cu)

铜大量存在于各种岩石和矿物中,也是生物体内最基本的微量营养元素之一,作为氧化还原催化剂或氧载体,至少存在于 30 多种酶中。大量冶炼和使用铜的过程中排放的三废,造成了铜对环境的污染和对生物的伤害。

铜中毒损害的靶器官是肝脏、肾脏、心脏、胃肠道和免疫器官,组织器官受损和功能障碍可导致鸟类死亡 [24]。1989 年日本鸟取县 8 只疣鼻天鹅因摄入过量外源性铜而中毒死亡 [25]。有研究报道,日粮铜添加 850mg/kg 可造成雏鸭慢性中毒,出现生长发育缓慢,血红蛋白含量和红细胞数量显著降低,红细胞变形和变性,红细胞数量和血红蛋白含量显著降低,血清谷丙转氨酶、谷草转氨酶活性显著升高,血清铜蓝蛋白活性下降等血液指标的变化等症状,并导致雏鸭淋巴细胞线粒体受损明显,诱导细胞凋亡 [24~26]。

连祥霖 [27] 研究发现锌对铜的甲状腺毒性具有一定的拮抗作用。

2.6 锌 (Zn)

锌参与体内 200 多种酶的合成和活化,是动物生长发育及维持正常生理机能所必须的微量元素,对动物的生长发育、生产性能、繁殖和免疫功能等方面均有着重要的影响,但摄入过量的锌会导致机体代谢紊乱。

肝脏、肾脏、胰脏、骨和心肌贮存锌的能力较强。过量的锌是一种作用迅速的中枢神经毒素,通过对神经细胞的直接损害及对体内各种物质的拮抗而影响脑功能。有报道鹦鹉因啃咬镀锌铁丝制成的鸟笼而普遍出现神经症状。高锌还可明显抑制红细胞的免疫功能,造成雏鸡肝、脾的结构和功能受损 [28]。日粮锌 (ZnSO_4) 添加为 1300mg/kg 时,会导致雏鸭患白肌病,肌胃、小肠平滑肌、骨骼肌和心肌受损 [29]。

2.7 其他

铬 (Cr) 是人和动物不可缺少的微量元素,具有提高生长和免疫能力、改善家禽胴体品质和繁殖性能、缓解应激反应等作用。铬广泛存在于土壤、大气、水和动植物体内。铬的各种化合物毒性强弱不一,三价铬毒性较小,六价铬毒性较大。六价铬可进入细胞,在细胞内还原成三价铬,导致遗传效应,产生遗传毒性 [30]。绿头鸭的卵在 $50\mu\text{g/L}$ 的三价铬溶液中浸泡 30min 后,孵化后雏鸟的畸形率达 30% [31]。

锰 (Mn) 是机体必需的微量元素之一,作为某些代谢酶的组成部分或酶的催化剂,参与许多生物化学反应。但摄入过量的锰,则会对机体产生不良作用,对神经、免疫、生殖等系统产生不同程度的损害 [32]。

镁 (Mg) 是一种生命必需元素,对于骨骼、呼吸、消化等系统均具有重要的作用。正常成人体中镁含量为 21~25g,约占体重的 0.05%。过量的镁会对神经肌肉有明显的毒害作用,还会引起钙自体内丧失、白细胞升高和骨化机制障碍等 [33]。

3 鸟类在重金属污染监测中的作用

生物监测是环境预警的有效途径,可以直观地了解环境变化对生物造成影响的程度。利用食物链上不同营养级的许多生物作为指示生物,可以对湿地及其他生态系统进行监测和评估 [34~37]。

由于顶级捕食动物体内的重金属水平可以揭示这些污染物在生态系统中转移的过程,因此对处于较高营养级的顶级捕食者体内重金属富集特征研究日益受到重视 [38~41]。鸟类作为食物链中的高级消费者,国内外许多学者将其作为环境的指示生物,用于环境污染物的生物监测 [34~38, 42, 43]。20 世纪 70 年代,海鸟体内重金属聚积与栖息地的研究曾一度成为环境研究的热点,近年来对鸟类监测的研究更向细化发展,研究的时间跨度和地理尺度更大,研究的种类及包含的营养级更丰富 [37, 44~47]。中国在这些方面尚有所欠缺。

Erry 等^[54]研究了英格兰西南部砷污染地区和苏格兰西南部非污染地区红隼 (*Falco tinnunculus*) 体内的砷浓度 (干重)。英格兰红隼的肝、肾和肌肉中的砷浓度分别为 0.346、0.278 μg/g 和 0.187 μg/g, 而苏格兰红隼肝、肾和肌肉中砷的浓度分别为 0.121、0.094 μg/g 和 0.057 μg/g。英格兰砷污染地区红隼组织中砷的浓度是苏格兰未污染地区红隼相应组织中的 3 倍。羽毛是鸟类排出体内积累过多重金属的重要途径之一。秋季红胸滨鹑 (*Calidris ruficollis*) 的新羽可反映该鸟当年换羽时所在栖息地的重金属污染状况, 对于研究迁徙鸟类越冬地和繁殖地的环境质量变化具有一定的意义^[55]。Beyer 等^[56]测定了哥斯达黎加和美国佛罗里达州的黑头鸚鵡 (*Mycteria americana*) 胸羽汞的浓度 (干重)。结果表明, 哥斯达黎加黑头鸚鵡胸羽的汞浓度比美国的低, 反映了两地环境本底汞浓度的差异。以上研究结果都表明鸟类富集重金属的水平能反映环境中重金属浓度的差异, 可以通过测定鸟类羽毛、组织和卵中的重金属来监测环境中的重金属污染^[36~38, 42~50]。

利用鸟类羽毛和卵壳作为生物指示物具有如下优点: 采样容易、方便; 大量采样时不危及种群; 不干扰生殖延续; 节省解剖的时间和费用; 可不间断地进行个体采样, 以监测组织中的浓度因生长、食物改变或食物链污染等随时间的变化而发生改变^[51]。重金属在鸟体组织中蓄积存在以下一些差异:

3.1 组织差异

鸟的不同组织对不同元素的积累能力是存在差异的。汞在麻雀体内有选择性地积累在羽毛和肾、肝等内脏器官中^[52]。重金属元素在环颈雉不同组织中的分布也不相同, 镉、锰主要积累于骨骼和肝脏, 锌主要积累于骨骼, 铜主要分布于肝脏中^[53]。

3.2 性别差异

Gochfeld & Burger^[54]发现, 几种鸭组织中的重金属浓度有性别差异, 雌性斑背潜鸭 (*Aythya marila*) 铅和镁的浓度比雄鸭更高。由于雌雄两性对重金属的排泄能力存在差异, 美洲鸛鹬 (*Pelecanus erythrorhynchos*) 雄鸟肝脏中的重金属含量一般都高于雌鸟^[55]。

3.3 年龄差异

北京地区成年麻雀体内的汞、镉、铅和铜的浓度都高于幼鸟^[57]。Burger^[56]指出, 大多数成鸟组织中的汞和铅浓度比幼鸟相应组织的汞、铅浓度高。

3.4 地区差异

麻雀体内的重金属污染状况因污染源不同而异^[56]。Burger^[55]研究表明, 雏鸟羽毛中积累的重金属铅、汞、镉、锰等元素的含量存在地区差异, 雏鸟的羽毛可以作为环境中金属含量的生物指示物。

4 展望与建议

随着现代工农业的发展, 重金属污染问题日趋严重。重金属污染, 不同于其它类型污染, 具有隐蔽性、长期性和不可逆转等特点。重金属可直接对环境中大气、水和土壤造成污染, 在土壤→植物→动物→人体之间的食物链中, 不仅鸟类作为高级消费者会受到威胁, 人类也会深受其害。

防治重金属污染, 应当提高全民素质、增强环保意识, 从根本上消除污染源; 要坚决杜绝工业“三废”的直接排放, 规划城市垃圾的堆放, 严格控制含有重金属的化肥、农药的使用; 加强对野生鸟类的监测, 对鸟类意外伤害病和不明原因死亡的现象及时开展调查并采取相应的补救措施。

虽然鸟类作为重金属污染的监测物种具有其优势性, 但是, 由于食性、栖息地、换羽等原因, 目前还未能制订出一套准确反映环境污染状况的检测标准。建议将实验室研究与野外调查相结合, 找到对环境变化敏感且分布比较广泛的鸟类, 监测环境质量的变化及其对人类的影响。野生鸺类、喜鹊 (*Pica pica*) 和麻雀等鸟类比较适合作为环境重金属污染的指示生物^[58]。

重金属污染已经成为导致鸟类遭受生存威胁的重要原因之一, 由于水在重金属扩散方面的促进作用, 依赖于清洁水体的鸟类的污染状况更为严重。我国湿地面积约占全球湿地总面积的 10%, 是东半球水鸟的主要越冬地、世界水鸟的主要繁殖地, 同时也是亚太地区鸟类迁徙路线的重要组成部分。《亚洲受胁鸟类红皮书》^[59]共收录在我国分布的鸟类 136 种, 其中以湿地和水域为主要生境的鸟类有 46 种, 占总数的 33.8%。将

水鸟特别是濒危鸟类作为研究重点,可以真实地反映环境状况。某些水鸟,如鹭类、鹤类、鸛类,它们的营养级与人类相同,可作为人类环境遭受潜在威胁的指示物种,在研究中也广泛利用^[60]。

在国外许多环境研究中心、大学已建立起冷冻室,保存在野外收集到的死亡鸟类及鸟类组织或器官。这些材料对外开放,提供给有需要的研究单位或个人^[61]。我国的科研单位和大专院校也应建立相应的冷冻室,对有确切来源地的、没收的或意外死亡的鸟类予以保存,建立相关档案,为今后的环境监测和科学研究服务。

Reference :

- [1] Carson R. In : Silent Spring. Boston , US : Houghton Mifflin Company , 2002.
- [2] Bryan G W. Pollution due to heavy metals and their compounds. Marine Ecology , 1984 , 5 , 1289 — 1430.
- [3] Rikuo D , Hideki O , Masazumi H. Mercury in feathers of wild birds from mercury-polluted area along the shore of Shiranui Sea , The Science of the Total Environment , 1984 , 40 , 155 — 167.
- [4] Hahn E , Hahn K , Stoeppler M. Bird feathers as bioindicators in areas of the German Environmental Specimen Bank-bioaccumulation of mercury in food chains and exogenous deposition of atmospheric pollution with lead and cadmium. The Science of the Total Environment , 1993 , 139/140 , 259 — 270.
- [5] Jia G N. Harm and Defence of Heavy Metals. Non-ferrous mining and metallurgy , 2004 , 20 (1) 39 — 42.
- [6] Xu X H , Liu H Q. Toxic Blood and Tissues Analysis of Chickens by Mercury. Chinese Journal of Animal Quarantine , 2002 , 19 (6) : 26 — 27.
- [7] Burger J , Gochfeld M. Risk , Mercury levels , and birds : relating adverse laboratory effects to field biomonitoring. Environmental Research , 1997 , 75 , 160 — 172.
- [8] Fimreite N. Effects of dietary methylmercury on Ring-necked Pheasants , with special reference to reproduction. Can. Wildl. Serv. Occas. Pap. , 1971 , 9 , 1 — 39.
- [9] Heinz G H. Methylmercury , reproductive and behavioral effects on three generations of mallard ducks. J. Wildl. Mgmt. , 1979 , 43 , 394 — 401.
- [10] Lian X L. Comparison of antagonistic effects of Se, Zn and Mo on Mercury intoxication in mice. Chinese J. Ind. Med. , 1998 , 11 (1) : 19 — 21.
- [11] Yang J H , Xu Z F , Ying Z W , et al. Antagonistic Effects of VC and VE on Toxicity of Mercury. Chin J Public Health , 2004 , 20 (4) : 453 — 454.
- [12] Pinowski J , Romanowski J , Barkowska M , et al. Lead and Cadmium in relation to body weight and mortality of the House Sparrow *Passer domesticus* and Tree Sparrow *Passer montanus* nestlings. Acta Ornithologica , 1993 , 28 (1) : 63 — 68.
- [13] Youssef S A H , El-Sanousi E L , Afifi N A , et al. Effect of subclinical Lead toxicity on the immune response of chickens to Newcastle disease virus vaccine. Research in Veterinary Science , 1996 , 60 , 13 — 16.
- [14] Wang S Z , Zhao B Q , Dong W , et al. Pyknotic cell death of red blood cells in chick with plumbum. Chinese Journal of Comparative Medicine , 2005 , 15 (2) : 79 — 83.
- [15] Stevenson A L , Scheuhammer A M , Chan H M. Effects of nontoxic shot regulations on lead accumulation in ducks and American woodcock in Canada. Arch. Environ. Contam. Toxicol. , 2005 , 48 , 405 — 413.
- [16] Wang J. Effects of Lead Toxicity by Iron. Foreign Medical Sciences : Hygiene Sectes , 2001 , 28 (5) : 273 — 275 , 284.
- [17] Zhang C X , Jiang Z Q. Current Status of Effects of Zinc , Selenium on Lead Toxicity. China Public Health , 2001 , 17 (12) : 1147 — 1148.
- [18] Guo D L , Zhou M S , Huang S P. Distribution and comparative study of Zinc and Cadmium in tissues of Ring-Necked Pheasants from Taiyuan City and Zijin Mountain area of Xing County , Shanxi. Acta Ecologica Sinica , 1997 , 17 (3) : 272 — 276.
- [19] Feng J , Yue X Y , Feng Z G. Pathology of experimental Cd poisoning in broiler chickens. Acta Veterinaria et Zootechnica Sinica , 2001 , 32 (5) : 468 — 475.
- [20] Spahn S A , Sherry T W. Cadmium and lead exposure associated with reduced growth rates , poorer fledging success of Little Blue Heron Chicks (*Egretta caerulea*) in South Louisiana Wetlands , Arch. Environ. Contam. Toxicol. , 1999 , 37 , 377 — 384.
- [21] Tian S Q , Long H , Huang Z H , et al. Research of experimental duck Cadmium toxicity. Journal of Southwest University for Nationalities Nature Science Edition , 2001 , 27 (2) : 225 — 228.
- [22] Xu S W , Li S , Hou R P. A study on broiler acute-poisoning by As₂O₃ for experiment. Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine , 2000 , (6) : 18.
- [23] Dai Y F , Chen Y , Gao Y , et al. Antagonism of selenium on Arsenic toxicity. China Public Health , 2002 , 18 (10) : 1187 — 1189.
- [24] Cui H M , Chen H T , Deng J L , et al. Pathology of experimental Copper toxicity in ducklings. Acta Veterinaria et Zootechnica Sinica , 2005 , 36 (7) : 715 — 721.
- [25] Yoshiyasu K. Copper poisoning broke out in Mute Swans (*Cygnus olor*). J. Vet. Med. Sci. , 1992 , 54 , 229 — 233.

- [26] Cui H M , Chen H T. Effect of Copper toxicity on lymphocyte apoptosis of lymphoid organs in duckling. *Acta Veterinaria et Zootechnica Sinica* , 2005 , 36 (4) : 370 — 375.
- [27] Lian X L. Antagonistic Effects of Zinc on Mercury and Copper thyroid toxicity. *Journal of Fujian Medical College* , 1993 , 27 (2) : 150 — 151.
- [28] Cui H M , Zhao C Y , Li D B , *et al.* Effect of high Zinc on immune function in chicken. *Acta Veterinaria et Zootechnica Sinica* , 2005 , 36 (3) : 240 — 245.
- [29] Cui H M , Peng X , Fang J , *et al.* Studies on pathology of Zinc toxicity in ducklings. *Acta Veterinaria et Zootechnica Sinica* , 2004 , 35 (2) : 217 — 221.
- [30] Zhang Z Y , Gang B Q. Current status of genetics toxicity of Chromium and its compounds. *Industrial Health and Occupational Diseases* , 1995 , 21 (4) : 245 — 250.
- [31] Kert sz V , F ncsi T. Adverse effects of (surface water pollutants) Cd , Cr and Pb on the embryogenesis of the mallard. *Aquatic Toxicology* , 2003 , 65 : 425 — 433.
- [32] Hu C L , Shao W. Current status of Manganese toxicity in China. *J. Health Toxicology* , 2000 , 14 (3) : 185 — 187.
- [33] Zeng Z H , Zeng X P. Formation of Magnesium in the ground water and its relationship with human health. *Acta Geologica Sichuan* , 2001 , 21 (3) : 168 — 170.
- [34] Erry B V , Macnair M R , Meharg A A , *et al.* Arsenic residues in predatory birds from an area of Britain with naturally and anthropogenically elevated arsenic levels. *Environmental Pollution* , 1999 , 106 , 91 — 95.
- [35] He W S , Lu J J. The accumulation of heavy metals in waders and its significance of environmental monitoring. In : Chinese Zoological Society ed. *Zoological studies in China*. Beijing : China Forest Publishing House , 1999. 558 — 566.
- [36] Beyer W N , Saplding M , Morrison D. Mercury concentrations in feathers of wading birds from Florida. *Ambio* , 1997 , 26 (2) : 97 — 100.
- [37] Odsjo T , Roos A , Johnels A G. The tail feathers of osprey nestlings (*Pandion haliaetus* L.) as indicators of change in mercury load in the environment of southern Sweden (1969 ~ 1998) : A case study with a note on the simultaneous intake of selenium. *Ambio* , 2004 , 33 (3) : 117 — 121.
- [38] Ruan L Z , Zhang Y M , Zhao D Q , *et al.* Egretta garzetta as a bioindicator of environmental pollution in Tai Lake region , Chin J Appl Ecol. , 2003 , 14 (2) : 263 — 268.
- [39] Turle R , Collins B. Validation of the use of pooled samples for monitoring of contaminants in wildlife. *Chemosphere* , 1993 , 25 : 463 — 469.
- [40] von Storch H , Hangner C. Controlling lead concentrations in human blood by regulating the use of lead in gasoline. *Ambio* , 2004 , 33 (3) : 110 — 116.
- [41] Pain D J , Meharg A , Sinclair G , *et al.* Levels of cadmium and zinc in soil and plants following the toxic spill from a pyrite mine , Aznalcolar , Spain. *Ambio* , 2003 , 32 (1) : 52 — 57.
- [42] Burger J , Gochfeld M. Biomonitoring of heavy metals in the pacific basin using avian feathers. *Environ Toxicol Chem* , 1995 , 14 : 1233 — 1239.
- [43] Goede A A , M de Bruin. The use of bird feather parts as a monitor for metal pollution. *Environ. Pollut. (Series B)* , 1984 , 8 (4) : 281 — 298.
- [44] Burger J , Gochfeld M. Metal levels in feathers of 12 species of seabirds from Midway Atoll in the northern Pacific Ocean. *The Science of the Total Environment* , 2000 , 257 : 37 — 52.
- [45] Burger J , Gochfeld M. Metals in albatross feathers from Midway Atoll : influence of species , age , and nest location. *Environmental Research Section A* , 2000 , 82 : 207 — 221.
- [46] Goutnera V , Papagiannish I , Kalfakakou V. Lead and cadmium in eggs of colonially nesting waterbirds of different position in the food chain of Greek wetlands of international importance. *The Science of the Total Environment* , 2001 , 267 : 169 — 176.
- [47] Custer T W , Hines R K , Melancon M J , *et al.* Contaminant concentrations and biomarker response in Great Blue Heron eggs from 10 colonies on the upper Mississippi River , USA. *Environ Toxicol Chem* , 1997 , 16 : 260 — 271.
- [48] Dauwe T , Bervoets L , Blust R , *et al.* Can excrement and feathers of nestling songbirds be used as biomonitors for heavy metal pollution ? Arch. Environ. Contam. Toxicol. , 2000 , 39 , 541 — 546.
- [49] Zhou L Z , Li J H , Zhang L , *et al.* Residues of three heavy metals in egrets eggs from Yingshang Bailihe Reserve. *Chinese Journal of Zoology* . 2006 , 41 (2) : 48 — 52.
- [50] Zhou L Z , Li J H , Yin H B , *et al.* Enrichment characteristics of heavy metals in heron egg. *Chinese Journal of Applied Ecology* , 2005 , 16 (10) : 1932 — 1937.
- [51] Zhang F J , Fan J G , Zhang Y W. Indicators for monitoring environmental pollution by heavy metals : large mammals , birds and pollinators. *Journal of Liaoning Forestry Science & Technology* , 2004 , (3) : 31 — 33.
- [52] Zhang P Q , Zhou Y M. Distribution of Mercury in tissues and organs of Tree Sparrow. *Journal of Shanxi University (Nat. Sci. Ed.)* , 1998 , 21 (3) : 272 — 275.

[53] Guo D L , Zhou M S , Zhu J. Distribution rules of heavy metals in tissues of Ring-Necked Pheasants. *Acta Zoologica Sinica* , 2001 , 47 (Suppl) , 134 — 138.

[54] Gochfeld M , Burger J. Heavy metal concentrations in the liver of three duck species :influence of species and sex. *Environmental Pollution* , 1987 , 45 , 1 — 5.

[55] Donaldson G M , Braune B M. Sex-Related levels of Selenium , heavy metals , and organochlorine compounds in American White Pelicans (*Pelecanus erythrorhynchos*) , *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* , 1999 , 37 (1) : 110 — 114.

[56] Burger J. Metals in avian feathers : bioindicators of environmental pollution. *Review of Environmental Toxicology* , 1994 , 5 , 203 — 211.

[57] Pan C , Zheng G M , Zhang Z W , *et al.* Metal contamination in tree sparrows in different locations of Beijing. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* , 2003 , 71 (1) : 142 — 147.

[58] Dmowski , Krzysztof. Birds as bioindicators of heavy metal pollution : Rview and examples concerning European species. *Acta Ornithologica Warsaw* , 1999 , 34 , 1 — 25.

[59] Birdlife International. Threatened birds of Asia : the Birdlife International Red Data Book. Cambridge , UK : Birdlife International , 2001.

[60] Kushlan J A. Colonial waterbirds as bioindicators of environmental change. *Colonial Waterbirds* , 1993 , 16 (2) : 223 — 251.

[61] Kubiak T J , Harris H J , Smitll L M. Microcontaminants and reproductive impairment of the Forster's tern on Green Bay , Lake Michigan-1983. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* , 1989 , 18 , 706 — 727.

参考文献：

[5] 贾广宁. 重金属污染的危害与防治. 有色矿冶, 2004 , 20 (1) : 39.

[6] 徐洪鑫, 刘焕奇. 雏鸡汞中毒血液及组织的残留分析. 中国动物检疫, 2002 , 19 (6) : 26 ~ 27.

[10] 连祥霖. 硒、锌、铜对汞中毒拮抗作用的比较. 中国工业医学杂志, 1998 , 11 (1) : 19 ~ 21.

[11] 杨敬华, 徐兆发, 尹忠伟, 等. 维生素 C 和维生素 E 对汞毒性的拮抗作用. 中国公共卫生, 2004 , 20 (4) : 453 ~ 454.

[14] 王思珍, 赵宝全, 董武, 等. 铅诱发雏鸡红细胞核浓缩. 中国比较医学杂志, 2005 , 15 (2) : 79 ~ 83.

[16] 王君. 铁对铅毒性作用的影响. 卫生学分册, 2001 , 28 (5) : 273 ~ 275 , 284.

[17] 张彩霞, 蒋卓勤. 锌、硒对铅毒性的拮抗作用研究进展. 中国公共卫生, 2001 , 17 (12) : 1147 ~ 1148.

[18] 郭东龙, 周梅素, 黄淑萍. Zn, Cd 在太原工业区和紫金山非工业区环颈雉不同组织中的分布及比较研究. 生态学报, 1997 , 17 (3) : 272 ~ 276.

[19] 冯健, 岳秀英, 冯泽光. 肉鸡实验性镉中毒的病理学研究. 畜牧兽医学报, 2001 , 32 (5) : 468 ~ 475.

[21] 田淑琴, 龙虎, 黄志宏, 等. 实验性肉鸭铜中毒研究. 自然科学版, 2001 , 27 (2) : 225 ~ 228.

[22] 徐世文, 李术, 侯瑞, 萍. 肉鸡三氧化二砷急性毒性试验研究. 黑龙江畜牧兽医, 2000 , (6) : 18.

[23] 戴宇飞, 陈艳, 高耘, 等. 硒对砷毒性的拮抗作用研究. 中国公共卫生, 2002 , 18 (10) : 1187 ~ 1189.

[24] 崔恒敏, 陈怀涛, 邓俊良, 等. 实验性雏鸭铜中毒症的病理学研究. 畜牧兽医学报, 2005 , 36 (7) : 715 ~ 721.

[26] 崔恒敏, 陈怀涛. 铜中毒对雏鸭免疫器官细胞凋亡影响的研究. 畜牧兽医学报, 2005 , 36 (4) : 370 ~ 375.

[27] 连祥霖. 锌对汞, 铜致甲状腺毒性的拮抗作用. 福建医学院学报, 1993 , 27 (2) : 150 ~ 151.

[28] 崔恒敏, 赵翠燕, 黎得兵, 等. 高锌对雏鸡免疫功能影响的研究. 畜牧兽医学报, 2005 , 36 (3) : 240 ~ 245.

[29] 崔恒敏, 彭西, 方静, 等. 实验性雏鸭铜中毒症的病理学研究. 畜牧兽医学报, 2004 , 35 (2) : 217 ~ 221.

[30] 张忠义, 刚葆琪. 铬及其化合物的遗传毒性研究进展. 工业卫生与职业病, 1995 , 21 (4) : 245 ~ 250.

[32] 胡存丽, 邵文. 我国锰毒性研究现况. 卫生毒理学杂志, 2000 , 14 (3) : 185 ~ 187.

[33] 曾昭华, 曾雪萍. 地下水中镁的形成及其与人群健康的关系. 四川地质学报, 2001 , 21 (3) : 168 ~ 170.

[35] 何文珊, 陆健健. 迁徙滨鹬对重金属的富集及其环境监测意义. 见：中国动物学会 编. 中国动物科学研究. 北京：中国林业出版社, 1999. 558 ~ 566.

[38] 阮祿章, 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. 应用生态学报. 2003 , 14 (2) : 263 ~ 268.

[49] 周立志, 李进华, 张磊, 等. 颖上八里河自然保护区鹭卵 3 种重金属残留分析. 动物学杂志. 2006 , 41 (2) : 48 ~ 52.

[50] 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. 应用生态学报. 2005 , 16 (10) : 1932 ~ 1937.

[51] 张凤杰, 范俊岗, 张玉伟. 环境重金属污染监测研究的指示物——大型野生哺乳动物、鸟类和花粉虫媒. 辽宁林业科技. 2004 , (3) : 31 ~ 33.

[52] 张培勤, 周英梅. 重金属汞在树麻雀体内不同组织和器官中分布规律的研究. 山西大学学报：自然科学版, 1998 , 21 (3) : 272 ~ 275.

[53] 郭东龙, 周素梅, 朱军. 重金属在环颈雉不同组织中的分布规律. 动物学报, 2001 , 47 (专刊) : 134 ~ 138.