

DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2016.09.2016012803

朝格吉乐玛, 张瑞卿, 都达古拉, 等. 蒙古国乌兰巴托市水产市场 4 种鱼体中汞、硒和锌的含量及健康风险[J]. 环境化学, 2016, 35(9): 1876-1883

Tsogzolmaa, ZHANG Ruiqing, Dudagula, et al. Mercury, selenium and zinc contents and health risks in four fish species from the fishmarket in Ulaanbaatar, Mongolia[J]. Environmental Chemistry, 2016, 35(9): 1876-1883

蒙古国乌兰巴托市水产市场 4 种鱼体中汞、 硒和锌的含量及健康风险*

朝格吉乐玛^{1,2,3} 张瑞卿^{2,3**} 都达古拉⁴ 孙宇巍^{2,3} 何 江^{2,3}

(1. 内蒙古大学生命科学学院, 呼和浩特, 010021; 2. 内蒙古大学环境与资源学院, 呼和浩特, 010021;
3. 内蒙古大学环境地质研究所, 呼和浩特, 010021; 4. 内蒙古环境监测中心站, 呼和浩特, 010011)

摘 要 为评估蒙古国乌兰巴托市居民通过水产品中汞(Hg)、硒(Se)和锌(Zn)的暴露风险,测定了乌兰巴托水产市场 4 种鱼(高白鲑、江鲑、拟鲤和河鲈)肌肉中 Hg、Se 和 Zn 的含量,并利用目标危险系数(THQ)初步评估居民通过食用鱼类摄入 Hg、Se 和 Zn 的健康风险.结果显示,Hg、Se 和 Zn 在 4 种鱼体肌肉中的含量范围分别为 0.034—0.681 mg·kg⁻¹、0.140—0.308 mg·kg⁻¹和 4.396—8.333 mg·kg⁻¹.Hg、Se 和 Zn 在江鲑肌肉中含量最高,江鲑汞的含量超过了中国农产品安全质量——无公害水产品安全要求的标准值.乌兰巴托市民通过食用此 4 种鱼类摄入的 Hg、Se 和 Zn 的目标危险系数和总危险系数均小于 1,表现为较低的健康风险,其中汞的风险相对较大.Hg 和 Zn 的每周摄入量(0.640 μg·kg⁻¹和 22.4 μg·kg⁻¹)也低于世界卫生组织(WHO)提出的暂定每周允许摄入量(7000 μg·kg⁻¹).考虑到汞的高生物累积和放大效应,乌兰巴托居民需持续关注汞的摄入量及健康风险.

关键词 鱼, 汞, 硒, 健康风险, 乌兰巴托, 蒙古国.

Mercury, selenium and zinc contents and health risks in four fish species from the fishmarket in Ulaanbaatar, Mongolia

Tsogzolmaa^{1,2,3} ZHANG Ruiqing^{2,3**} Dudagula⁴ SUN Yuwei^{2,3} HE Jiang^{2,3}

(1. College of life sciences, Inner mongolia university, Hohhot, 010021, China;
2. College of environment and resources, Inner mongolia university, Hohhot, 010021, China;
3. Institute of environmental geology, Inner mongolia university, Hohhot, 010021, China;
4. Inner mongolia environment monitoring center station, Hohhot, 010011, China)

Abstract: In order to evaluate the exposure risk of mercury(Hg), selenium(Se) and zinc(Zn) in aquatic products in Ulaanbaatar, Hg, Se and Zn contents in muscles of four fish species from the fishmarket were determined. The health risk associated with these three elements were assessed based on the target hazard quotients (THQs) method. The results showed that the concentrations of Hg, Se and Zn in fish muscles ranged from 0.034 to 0.681 mg·kg⁻¹, from 0.140 to 0.308 mg·kg⁻¹ and from 4.396 to 8.333 mg·kg⁻¹, respectively. The levels of Hg, Se and Zn in muscles of burbot (*Lota lota*) was the highest, and the level of Hg in burbot exceeded the standard level in Safety Qualification for

2016 年 1 月 28 日收稿 (Received: January 28, 2016).

* 内蒙古大学高层次人才引进科研启动项目(135139), 内蒙古自治区自然科学基金(2014BS0402)资助.

Supported by Program of Higher level Talents of Inner Mongolia University (135139) and Inner Mongolia Natural Science Foundation (2014BS0402).

* * 通讯联系人, Tel: 18647385270, E-mail: zruiqing2007@126.com

Corresponding author, Tel: 18647385270, E-mail: zruiqing2007@126.com

Agriculture Product-Safety Requirements for Non-Environmental Pollution Aquatic Products. The THQs and total THQs based on fish consumption for Hg, Se and Zn were less than 1, and it indicated low risk for health. The risk from Hg was relatively higher than those from Se and Zn. The estimated weekly intake values for Hg and Zn were also less than the provisional tolerable weekly intake value suggested by WHO. Considering the bioaccumulation and biomagnification potential of Hg, more attention should be paid to intake and health risk of Hg for residents in Ulaanbaatar.

Keywords: fish, mercury, selenium, health risk, Ulaanbaatar, Mongolia.

汞是受到普遍关注的全球性污染物,具有较高的生物累积和放大效应,即使地表水中汞的浓度与背景浓度相当,也可能在野生生物中检测到高的汞含量^[1].硒和锌为生物必须的微量元素,但是也具有生物累积性,在高含量或摄入过量时可对生物或人体产生毒害效应,其中硒的需要量和中毒量之间比较接近^[2].另外,有研究表明硒对汞的累积和毒性存在拮抗作用^[2].煤炭和化石燃料的开采、燃烧、采矿、工业排放、大气远距离传输及干湿沉降等自然和人为源都可能造成重金属污染^[3-4].金属元素通过多种途径进入水体,导致水环境中金属元素含量不断升高^[5].由于重金属的难降解性及生物累积性,鱼体可以通过皮肤、呼吸和摄食等各种途径累积重金属,进而通过食物链传递危害人体健康.人类作为最高营养级生物,对生物累积性物质具有最高的暴露风险,研究人类通过食用鱼类摄入汞、硒和锌的风险可以为居民合理和营养膳食提供科学依据.

乌兰巴托市是蒙古国首都及最大的城市,其人口占全国的 40%左右^[4].该城市是一个以燃煤为主的城市,有 3 个燃煤火力发电厂以及 10 万居民通过燃烧块煤取暖和煮饭^[6].随着蒙古国工业、农业、建筑业和采矿业的迅速发展以及人们对各种产品消费量的增加,可能造成大量重金属或微量元素释放进入环境^[7].有关蒙古国重金属研究主要集中在土壤污染^[8-10],而水生环境中重金属研究较为鲜见.有研究显示,由于煤炭燃烧等人为源的输入,乌兰巴托土壤和降尘汞为中度污染水平^[6].乌兰巴托郊区干式厕所收集物中的汞和锌对土地利用具有相对较高的暴露风险^[11].在乌兰巴托主要水源土拉河(Tuul River)中段,部分沉积物锌含量接近可能的效应水平^[12].近年来,各国有关鱼体内重金属累积、分布及健康风险研究已经开展了很多^[5,13-15],但在蒙古国相关研究还比较有限,对该区域水生环境中重金属的污染水平和环境风险还不清楚,特别是对于水产品市场上鱼体的重金属污染水平及食用风险研究还相对较少^[16-17].

本研究以蒙古国乌兰巴托市水产市场所售鱼类为研究对象,主要调查了高白鲑、江鳕、拟鲤和河鲈等 4 种鱼体中汞、硒和锌的含量,同时评价其可能存在的健康风险,以期为乌兰巴托水产品安全研究和食用风险预警提供科学依据.

1 材料与方法 (Materials and methods)

1.1 样品采集和处理

于 2014 年 2 月从蒙古国乌兰巴托市水产品批发市场随机购买高白鲑(*Coregonus peled*)、江鳕(*Lota lota*)、拟鲤(*Rutilus rutilus*)和河鲈(*Perca fluviatilis*)等 4 种食用鱼共 39 条(表 1).4 种鱼均为市民日常采购的食用鱼类,鱼的主要来源为周边湖泊和河流的野生和养殖鱼类.选取的鱼尽量大小、质量类似.样品购买后装入聚乙烯封口袋中,于冷冻状态下带回实验室,于-20 ℃冷冻保存.

表 1 4 种鱼的体长和体重
Table 1 Body length and weight for fishes

拉丁名 Latin name	中文学名 Chinese name	样本数 Sample size	体长 Body length/cm	体重 Body weight/g
<i>Lota lota</i>	江鳕	10	20—23	53—300
<i>Perca fluviatilis</i>	河鲈	9	14.5—15.6	54—67.5
<i>Coregonus peled</i>	高白鲑	10	31.5—38	400—880
<i>Rutilus rutilus</i>	拟鲤	10	18.5—21.8	109.6—165.8

分析前将样品在室温下解冻后,用自来水和去离子水冲洗两遍后擦干,测其体重和体长,然后用不锈钢刀取其肌肉,剪碎,匀浆.将样品冷冻干燥后,用玛瑙研钵将样品研磨至均匀粉末.

1.2 锌、硒和汞的测定

称取 0.1000 g 左右鱼肌肉样品于消解罐中,加入 8 mL 浓硝酸,选择设定好的消解程序对样品进行微波消解.具体设定温度、爬升时间和功率见表 2.对于锌,待消解结束后将消解液转移至聚四氟乙烯烧杯内,在电热板上于 150 ℃ 赶酸至 1 mL 左右,将消解液过 0.45 μm 滤膜后定容到 25 mL,待测.对于汞和硒,硝酸消解结束后再加入 30% 的双氧水 2 mL,用同一消解程序继续消解,然后于 120 ℃ 赶酸至 1 mL 左右;测硒的消解液冷却后加 6 mol·L⁻¹ 的盐酸 5 mL,继续加热至 1 mL 左右,并伴有大量白色浓烟,冷却后将消解液过 0.45 μm 滤膜后定容到 25 mL,待测;对于测汞的消解液,双氧水消解完成后即赶酸、过滤,加 1.25 mL 浓盐酸,最后定容.应用火焰原子吸收(AA800,美国 Perkin Elmer 公司)测定 Zn 的含量,用双道原子荧光光度计(AFS-3100,上海科创)测定 Hg 和 Se 的含量.同时,用相同方法做空白试验.

表 2 微波消解温控程序

Table 2 Temperature control procedure of microwave digestion				
步骤 Stage	功率 Power/W	温度 Temperature/℃	爬升时间 Ramp/min	保持时间 Hold/min
1	1600	120	5	1
2	1600	160	5	5
3	1600	180	4	15

1.3 质量控制

利用标准空白、样品空白、平行测定和标准样品进行质量控制.平行测定的标准偏差低于 5%.标准物质包括大虾(GBW10050(GSB-28)、猪肝 GBW10051(GSB-29)和扇贝 GBW10024(GSB-15).标样中汞、硒和锌的回收率分别为 74%—101%、92%—107% 和 92%—98%.所用试剂除各种酸为优级纯外,其余均为分析纯.

1.4 健康风险评估

本研究采用美国环境保护局^[18]提出的目标危险系数(THQ)法评估人体通过食物摄取重金属的风险^[19].在该方法中,假定人体摄入剂量等于吸收剂量,以计算的摄入量与参考剂量的比值作为评价标准,具体计算公式为:

$$THQ = \frac{EF \times ED \times FIR \times C}{RfD \times WAB \times TA} \times 10^{-3}$$

(1)

其中,EF 为人群暴露频率(365 d·a⁻¹);ED 为暴露时间(通常取平均寿命 70 a);FIR 为食品摄入率(g·d⁻¹),鱼类的每日摄取量为 36 g·d⁻¹^[20];C 为食物中的金属含量(mg·kg⁻¹,以湿重计);RfD 为口服参考剂量(mg·kg⁻¹·d⁻¹),其中锌为 0.3 mg·kg⁻¹·d⁻¹,汞为 0.0005 mg·kg⁻¹·d⁻¹^[21],硒为 0.005 mg·kg⁻¹·d⁻¹^[22];WAB 为人体平均体重(65.7 kg)^[23];TA 为非致癌性暴露平均时间(365 d×70 a).

当 THQ 比值大于 1 时表明暴露人群存在健康风险,反之,则认为无明显健康风险.考虑到重金属可以相互作用对人体健康产生危害,计算了重金属的总危险系数(TTHQ),即所研究重金属的 THQ 之和,计算公式为:

$$TTHQ = \sum THQ_{\text{单一金属}}$$

(2)

此外,基于摄入重金属总量的风险,世界卫生组织(WHO)提出了暂定每周允许摄入量(Provisional tolerable weekly intake, PTWI)为每种重金属推荐摄入量的安全阈值,其中 Hg^[24]和 Zn^[25]分别为 4 μg·kg⁻¹·week⁻¹和 7000 μg·kg⁻¹·week⁻¹,硒没有相关阈值.重金属的估计每周摄入量(Estimated weekly intake, EWI)的表达式为:

$$EWI = \frac{FIR \times C \times 7}{WAB}$$

(3)

其中,FIR 为食品摄入率(g·d⁻¹),C 为食物中的重金属含量(mg·kg⁻¹),WAB 为人体平均体重(kg).

2 结果与讨论(Results and discussion)

2.1 鱼肌肉组织中汞、硒和锌的含量

研究结果显示,Hg、Se 和 Zn 在 4 种鱼体肌肉中的含量范围分别为 0.034—0.681 mg·kg⁻¹、0.140—0.308 mg·kg⁻¹和 4.396—8.333 mg·kg⁻¹(表 3).其中 Zn 的含量最高,这与其他学者的研究结果一致^[3,26],可能与 Zn 和 Se 是有机体生理调节机制所必须的微量元素有关^[27].在不同种类的鱼中 3 种元素的含量顺序不同,高白鲑和河鲈中含量顺序为 Zn>Se>Hg;江鳕和拟鲤中重金属顺序为 Zn>Hg>Se.

表 3 4 种鱼中汞、硒和锌含量(mg·kg⁻¹)
Table 3 Content of mercury, selenium and zinc in fishes (mg·kg⁻¹)

鱼类 Fish species	Hg		Se		Zn	
	范围 Range	平均值 Mean	范围 Range	平均值 Mean	范围 Range	平均值 Mean
高白鲑	0.034—0.090	0.064	0.152—0.211	0.175	4.516—8.333	5.796
江鳕	0.060—0.681	0.367	0.200—0.308	0.246	5.393—6.933	6.167
拟鲤	0.093—0.270	0.168	0.140—0.185	0.159	4.960—6.512	5.679
河鲈	0.037—0.093	0.068	0.196—0.241	0.219	4.396—7.296	5.728

除 Zn 以外,不同鱼肌肉中 Hg 和 Se 含量存在明显差异.4 种鱼中 Hg 的平均含量顺序为江鳕>拟鲤>河鲈>高白鲑, Hg 的平均含量均小于 GB2762—2012《食品安全国家标准食品中污染物限量》^[28]、(NY5073—2006)《无公害食品水产品中有毒有害物质限量》^[29]和(MNS4504—2008)《蒙古国食品安全国家标准食品中重金属限量》^[30]中的限值(Hg:0.5 mg·kg⁻¹).但值得注意的是 3 条江鳕的 Hg 含量超过了 0.5 mg·kg⁻¹,江鳕肌肉中汞的含量超过了中国农产品安全质量无公害水产品安全要求规定^[31]的汞含量安全限值(0.3 mg·kg⁻¹).Se 的含量顺序为江鳕>河鲈>高白鲑>拟鲤;Zn 的含量顺序为江鳕>高白鲑>河鲈>拟鲤.

江鳕和河鲈属肉食性鱼类,拟鲤和高白鲑分别属于杂食性和滤食性鱼类.江鳕体内汞的含量比其他 3 种鱼类高几倍,硒和锌在江鳕体内也相对较高,可能与汞的高生物累积和放大效应有关.同样属肉食性鱼类的河鲈汞含量较低,可能与其个体较小及生长期短有关.

2.2 与其他区域或研究中鱼体肌肉中汞、硒和锌含量的对比

将本研究结果与不同国家或地区鱼体中汞、硒和锌含量比较(表 4),发现本研究鱼体中汞的含量高于文献报道的中国不同地区水体以及其它国家或地区.硒的含量低于中国西藏地区高原湖泊和河流以及澳大利亚湖泊鱼体.锌的含量低于中国太湖、长江流域、北京市场、东北地区 and 纳木错湖及澳大利亚和俄罗斯等的研究结果.与小浪底水库鱼体相当,高于羊卓雍错湖和拉萨河等区域研究结果.

乌兰巴托市能源消费结构以煤炭燃烧为主,燃煤是该区域汞的主要来源之一^[6],对乌兰巴托土壤汞研究表明其含量低于中国长春、抚顺和厦门等城市土壤.另外,据 2004 年丹麦和格陵兰地质调查报告^[32],乌兰巴托北部在提取金的过程中每年有 500 kg 汞释放进入环境,而且数量每年都在增长.有研究显示,在蒙古国中北部的土拉河和鄂尔浑河流域支流沉积物中,汞和锌的含量呈现极大和中等程度提高,与周边的采矿活动有关^[33].可见燃煤、采矿和提炼等人类活动导致了蒙古国环境中汞的含量增加,然后汞通过地表径流和大气沉降等方式进入水生环境,在鱼体内累积,从而对野生生物和人体健康产生危害.随着经济发展水平、人口数量及人们对环境改造能力的增加,可能会加剧蒙古国重金属的污染.

2.3 健康风险评价

依据美国环保局风险评价方法及相关参数,计算得到乌兰巴托市民通过食用 4 种鱼类摄入 Hg、Se 和 Zn 的 THQ 和 EWI 如表 5 所示.4 种鱼体中 Hg、Se 和 Zn 的 THQ 均小于 1,说明人体通过食用这些鱼类摄入的 Hg、Se 和 Zn 对健康不具有毒害风险.对于单一重金属而言,鱼类重金属的 THQ 大小顺序为: Hg>Se>Zn,与污染水平一致.几种鱼体 Hg、Se 和 Zn 的 TTHQ 也均小于 1.对于不同鱼体而言,摄入江鳕的风险相对更大,其次是拟鲤,这与汞含量的分布一致.通过生物累积和放大效应,汞在肉食性鱼类江鳕

体内累积了较高的含量,可能是其相对风险较高的主要原因.因此,居民日常消费肉食性鱼类比食用其他食性鱼类具有更大的暴露风险.

表 4 不同区域鱼类肌肉中汞、硒和锌含量(mg·kg⁻¹)

Table 4 Contents of mercury, selenium and zinc in fish muscle from different regions (mg·kg ⁻¹)				
地区 Region	汞 Mercury	硒 Selenium	锌 Zinc	参考文献 Reference
乌兰巴托水产市场	0.169(0.034—0.681)	0.2(0.140—0.308)	5.85(4.396—8.333)	本研究
太湖 ^{A, B}	—	—	3.2—26	[34]
长江上游 ^A	0.015—0.074	—	29.8—38.7	[35]
长江中下游 ^A	nd—0.054	—	0.793—50.8	[36]
广州市场	—	—	6.37	[37]
小浪底水库	0.111±0.042	—	5.81±3.26	[38]
北京市场	—	—	0.630—33.3	[39]
贵州水库	0.066	—	—	[40]
东北地区渔场	nd—0.175	—	1.68—27.2	[14]
纳木错湖	—	0.36	6.9	[3]
羊卓雍错湖	—	1.0	4.4	[3]
拉萨河 ^A	—	0.18—0.31	2.5—5.3	[3]
Lake Macquarie, New South Wales, Australia ^{A, B}	0.0—0.19	0.27—3.16	2.8—15.08	[26]
Pasvik River, Russia ^B	0.032—0.178	—	3.4—12.6	[41]

注:“—”表示未找到相关数据;“nd”为未检出;“A”表示含量为平均值的范围;“B”为按照 80% 的含水量转换成湿重.
note: “—” not date; “nd” not detected; “A” range of average values; “B” the content is derived based on water content of 80%.

乌兰巴托市民通过食用鱼类每周摄入 Hg、Se 和 Zn 的量分别为 0.640、0.766、22.4 μg·kg⁻¹.因 Se 没有对应的 PTWI 值而无法比较外,居民通过摄食鱼类对 Hg 和 Zn 的 EWI 均未超过 PTWI,占 PTWI 的比例分别为 16% 和 0.32%.尽管风险都较低,但是由于汞存在生物累积和放大效应,乌兰巴托居民需要持续关注汞的健康风险.

表 5 4 种鱼体中汞、硒和锌的健康风险评价

Table 5 Health risk assessment of mercury, selenium and zinc in the four types of fish body										
鱼类 Fish species	含量 Content/(mg·kg ⁻¹)			估计每周摄入量 EWI/(μg·kg ⁻¹)			目标危险系数 THQ			总危险系数 TTHQ
	Hg	Se	Zn	Hg	Se	Zn	Hg	Se	Zn	
高白鲑	0.064	0.175	5.796	0.245	0.671	22.2	0.070	0.019	0.011	0.100
江鳕	0.367	0.246	6.167	1.408	0.944	23.7	0.402	0.027	0.011	0.440
拟鲤	0.168	0.159	5.679	0.644	0.610	21.8	0.184	0.017	0.010	0.212
河鲈	0.068	0.219	5.728	0.261	0.840	22.0	0.075	0.024	0.010	0.109
EWI 平均值				0.640	0.766	22.4				
PTWI				4		7000				
EWI/PTWI				16%		0.32%				

本研究针对乌兰巴托市 4 种常见食用鱼进行研究,测定了 3 种元素的含量并利用美国环保局风险评价方法对其进行了风险分析,为该地区居民饮食安全评价提供了参考依据,但是评价结果也存在一定的不确定性.风险评价的不确定性主要体现在暴露量、参考剂量和风险表征方法的选择等.许多研究表明,鱼体中其他器官,如肝脏、头、鳃中重金属含量比肌肉中更高^[42].本研究选择测定鱼体肌肉组织中汞、锌和硒含量以评价鱼类的食用性风险,但目前也有人选择食用鱼脑、鱼皮、鱼鳃和鱼骨等鱼体的其他组织器官,因此在今后的研究中需要更加详细的饮食信息和暴露分析以减少风险评价中关于暴露量估计的不确定性.目前,关于污染物通过食物链途径进入人体的健康风险评价,采用的评价方法不尽相同,而各参数的选择对评价结果影响尤其大.公式中所采用的居民鱼类食用量为 WHO 的推荐值,并非所研

究区域实际调查值;所采用体重为人群平均值,这些都可能增加评价结果的不确定性.根据有关报道儿童和成人食用鱼类的健康风险有显著差异^[5],因此按照人群年龄进行分类研究风险很有必要.本研究由于缺乏相关数据没有进行进一步分析,完善人群基本信息是今后该区域风险研究的重点之一.另外,环境中存在多种污染物,生物体表现出的毒性效应往往是多种污染物共同作用的结果,共存污染物的联合作用风险也有必要考虑.但是,以单个重金属危险系数之和代表复合污染的总危险系数存在一定的不确定性.重金属间的相互作用包括协同、加和和拮抗,不止是简单的加和作用.比如汞和硒之间就存在拮抗作用,两者共存时对彼此的毒性都有抑制^[43-44],因此需要根据金属间相互作用对每一个重金属的风险做进一步分析.

3 结论 (Conclusion)

乌兰巴托水产市场 4 种鱼体肌肉中 Hg、Se 和 Zn 的含量范围分别为 0.034—0.681 mg·kg⁻¹、0.140—0.308 mg·kg⁻¹和 4.396—8.333 mg·kg⁻¹.肉食性的江鳕汞含量最高,超过了中国农产品安全质量—无公害水产品安全要求规定.由于燃煤和采矿等可能存在的人为污染源,本研究中鱼体汞的含量高于部分文献报道的含量.

健康风险评价结果表明,乌兰巴托市民通过食用此 4 种鱼类摄入的 Hg、Se 和 Zn 的 THQ 和 TTHQ 均小于 1,表现为较低的健康风险.Hg 和 Zn 的 EWI 也低于 PTWI,但 Hg 的 EWI 值在 PTWI 中的占比较高(16%).考虑到汞具有较高生物累积和放大效应,乌兰巴托居民需持续关注汞的摄入量及健康风险.

参考文献 (References)

- [1] LIU G, YONG C, PHILIPPI T, et al. Distribution of total and methylmercury in different ecosystem compartments in the everglades: Implications for mercury bioaccumulation[J]. Environmental Pollution, 2008, 153(2): 257-265.
- [2] PETERSON S A, RALSTON N V C, PECK D V, et al. How might selenium moderate the toxic effects of mercury in stream fish of the western U.S. [J]. Environmental Science & Technology, 2009, 43(10): 3919-3925.
- [3] YANG R, YAO T, XU B, et al. Accumulation features of organochlorine pesticides and heavy metals in fish from high mountain lakes and Lhasa River in the Tibetan Plateau[J]. Environment International, 2007, 33(2): 151-156.
- [4] BATJARGAL T, OTGONJARGAL E, BAEK K, et al. Assessment of metals contamination of soils in Ulaanbaatar, Mongolia[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 184(1/3): 872-876.
- [5] 储昭霞, 王兴明, 涂俊芳, 等. 重金属 (Cd, Cu, Zn 和 Pb) 在淮南塌陷塘鲫鱼体内的分布特征及健康风险[J]. 环境化学, 2014, 33(9): 1433-1438.
- CHU ZH X, WANG X M, TU J F, et al. Distribution and health risk of healthy metals (Cd, Cu, Zn and Pb) in Crucian carp (*Carassius auratus Gibelio*) collected from subsidence pools Huainan coal field [J]. Environmental Chemistry, 2014, 33(9): 1433-1438 (in Chinese).
- [6] CHUNG S, CHON H T. Assessment of the level of mercury contamination from some anthropogenic sources in Ulaanbaatar, Mongolia[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2014, 147: 237-244.
- [7] BALJINNYAM N, FRONTASYEVA M V, ALEKSIAYENAK Y V. Inaa for determination of trace elements in bottom sediments of the Selenga River Basin in Mongolia[J]. Physics of Particles & Nuclei Letters, 2014, 11(11): 199-208.
- [8] 呼日乐达瓦, 蒙古国部分草地及公园土壤中 OCPs、PCBs 与重金属的分布特征[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学学位论文, 2014.
- HURILEDABA. The distribution characteristics of OCPs, PCPs and heavy metals in grandland and park soil of Mongolia [D]. Huhehot: Inner Mongolia University, 2014 (in Chinese).
- [9] NATALIA E. KOSHELEVA N S K, DECHINGUNGAA DORJGOTOV, et al. Soil pollution with heavy metals in the industrial cities of Mongolia[J]. Mongolian Journal of Biological Sciences 2011, 9 (1/2): 1-2.
- [10] BALJINNYAM N G S, GANBOLD G, et al. Heavy metals in the environmental objects of non-ferrous industrial region of Mongolia, the town of erdenet[C]. The 2nd International Conference on X-Ray Analysis, 2009:185-193.
- [11] LIU X, LI Z F, BOSCH E, et al. Assessment of metals in dry-toilet collected matters from suburban areas of Ulaanbaatar, Mongolia, using biosolids quality guidelines and potential ecological risk index[J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 2014, 8(5): 710-718.
- [12] DALAI B, ISHIGA H. Geochemical evaluation of present-day tuul river sediments, Ulaanbaatar basin, Mongolia[J]. Environmental Monitoring & Assessment, 2013, 185(3): 2869-2881.
- [13] 余杨, 王雨春, 周怀东, 等. 三峡水库蓄水初期鲤鱼重金属腹肌特征及健康风险评价[J]. 环境科学学报, 2013, 33(7):

2012-2019.

- YU Y, WANG Y C, ZHOU H D, et al. Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals in carp (*Cyprinus carpio*) from the Three Gorges Reservoir after 175m impoundment[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, 33(7):2012-2019 (in Chinese).
- [14] 覃东立, 汤施展, 白淑艳, 等. 东北地区鲤、鲫、草鱼肌肉中重金属含量评价[J]. *农业环境科学学报*, 2014(2): 264-270.
- QIN D L, TANG SH Z, BAI S Y, et al. Heavy metal concentration in muscle of fishes from the northeast China[J]. *Agro-Envireomnt Science*, 2014(2): 264-270 (in Chinese).
- [15] 肖明松, 王松, 鲍方印, 等. 淮河蚌埠段采样点鱼虾贝类重金属的富集[J]. *环境科学研究*, 2011, 24(8): 942-948.
- XIAO M S, WANG S, BAO F Y, et al. Enrichment of heavy metals in economic aquatic animals in Huaihe river segment of Bengbu sampling points[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2011, 24(8): 942-948(in Chinese).
- [16] 夏泽慧, 王兴明, 楼巧婷, 等. 合肥市场 6 种淡水鱼体内 Cu、Pb 和 Cd 的分布及食用风险[J]. *环境科学研究*, 2012, 25(3): 311-315.
- XIA Z H, WANG X M, LOU Q T, et al. Distribution and consumption risk assessment of Cu, Pb and Cd in six freshwater fishes from the main market in Hefei[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2012, 25(3): 311-315 (in Chinese).
- [17] 张磊. 青岛市售贝类中总汞含量分布及人群健康风险[J]. *环境化学*, 2014, 33(8): 1326-1333.
- ZHANG L. Mercury contents in shellfish sold in Qingdao City and their health risk: Distribution and health risk assessment [J]. *Environmental Chemistry*, 2014, 33(8): 1326-1333 (in Chinese).
- [18] USEPA, US EPA. Risk-based concentration table[R]. Washington DC, United States Environmental Protection Agency: Philadelphia PA, 2000.
- [19] WANG X, SATO T, XING B, et al. Health risks of heavy metals to the general public in tianjin, China via consumption of vegetables and fish[J]. *Science of the Total Environment*, 2005, 350(s1/3): 28-37
- [20] FAO, Statistical databases[DB/OL]. [2015-12-15]2005. <http://faostat.fao.org>.
- [21] USEPA, Risk-based concentration table [R]. United States Environmental Protection Agency: Philidelphia, Pa, 2009.
- [22] USEPA, Integrated risk information system (iris), chemical assessment summary-selenium and compounds[R]. National Center for Environmental Assessment, Environmental Protection Agency, USA, 1991.
- [23] WHO, Mongolian steps survey on the prevalence of noncommunicable disease and injury risk factors-2009[M]. World Health Organization: Geneva, 2010, Chapter 3:57.
- [24] WHO, Evaluation of certain food additives and contaminants. Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives[R]. India, 2011.
- [25] WHO, Evaluation of certain food additives and contaminants. Joint FAO/WHO Expert Committee on food Additives[R]. Geneva, 1982.
- [26] ROACH A C, MAHER W, KRIKOWA F. Assessment of metals in fish from lake macquarie, new south wales, australia[J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2007, 54(2): 292-308.
- [27] MCGEER J C, BRIK K V, SKEAFF J M, et al. Inverse relationship between bioconcentration factor and exposure concentration for metals: Implications for hazard assessment of metals in the aquatic environment[J]. *Environmental Toxicology & Chemistry*, 2003, 22(5): 1017-1037.
- [28] GB 2762—2012. 食品安全国家标准-食品中污染物限量[S]. 北京: 中华人民共和国卫生部, 2012.
- GB 2762—2012. Standard of food safety-limit of pollutants in food product[S]. Beijing: Ministry of Health of the People's Republic of China, 2012(in Chinese).
- [29] NY 5073—2006. 无公害食品-水产品中有毒有害物质限量[S]. 北京: 中华人民共和国农业部, 2006.
- NY 5073—2006. Safety food-limit of toxic elements in aquatic food[S]. Beijing: Ministry of Agriculture of the People's Republic of China, 2006 (in Chinese).
- [30] MNS 4504—2008. Хүнсний бүтээгдэхүүн дэх хүнд металлын үлдэгдлийн зөвшөөрөгдөх дээд хэмжээ [S]. Улаанбаатар: СТАНДАРТ М У, 2008.
- MNS 4504—2008. Maxium residue limit of heavy metals in food products[S]. Ulaanbaatar: Standard of Mongolia, 2008(in Mongolian).
- [31] GB 18406.4—2001. 农产品安全质量-无公害水产品安全要求[S]. 北京: 中华人民共和国-国家质量监督检验检疫总局, 2001.
- GB 18406.4—2001. Safety quality of agricultural products-requirement of safety in aquatic food[S]. Beijing: General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine o of the People's Republic of China, 2001 (in Chinese).
- [32] LEE J, YUN S T, LEE Y J, et al. Joint pilot studies between korea and mongolia on assessment of environmental management system in gold mining industry of Mongolia (II) [M]. Seoul: Korea Environment Institute, 2005: 1-122.
- [33] BRUMBAUGH W G, TILLITT D E, MAY T W, et al. Environmental survey in the tuul and Orkhon River Basins of north-central Mongolia, 2010: Metals and other elements in streambed sediment and floodplain soil[J]. *Environmental Monitoring & Assessment*, 2013, 185(11): 8991-9008.
- [34] CHI Q Q, ZHU G W, LANGDON A. Bioaccumulation of heavy metals in fishes from Taihu Lake, China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2007, 19(12): 1500-1504.
- [35] 蔡深文, 倪朝辉, 李云峰, 等. 长江上游珍稀、特有鱼类国家级自然保护区鱼体肌肉重金属残留调查与分析[J]. *中国水产科学*, 2011, 18(6): 1351-1357.

- CAI SH W, NI ZH H, LI Y F, et al. Heavy metal residues in the muscle of fishes from the rare and endemic fishes national nature reserve in the upper reaches of the Yangtze River, China[J]. *Fishery Sciences of China*, 2011, 18(6): 1351-1357 (in Chinese).
- [36] YI Y, YANG Z, ZHANG S. Ecological risk assessment of heavy metals in sediment and human health risk assessment of heavy metals in fishes in the middle and lower reaches of the Yangtze River basin[J]. *Environmental Pollution*, 2011, 159(10): 2575-2585.
- [37] 陈红红, 毋福海, 黄丽玫, 等. 广州市场食用鱼中 5 种重金属含量分析及评价[J]. *中国卫生检验杂志*, 2008, 18(12): 2736-2738. CHEN H H, WU F H, HUANG L M, et al. Analysis and evaluation of five heavy metals in edible fish in a market in Guangzhou[J]. *Chinese Journal of Health Laboratory Technology*, 2008, 18(12): 2736-2738 (in Chinese).
- [38] 程柳, 王海邻, 索乾善. 小浪底水库鲢鱼体内重金属的富集及健康风险评估[J]. *环境与健康杂志*, 2014, 31(5): 454-455. CHENG L, WANG H L, SUO Q S. Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals in Bighead carp (*Aristichthys nobilis*) from the Xiaolangdi reservoir[J]. *Environmental Health*, 2014, 31(5): 454-455 (in Chinese).
- [39] 刘平, 周益奇, 臧利杰. 北京农贸市场 4 种鱼类体内重金属污染调查[J]. *环境科学*, 2011, 32(7): 2062-2068. LIU P, ZHOU Y Q, ZANG L J. Investigation of heavy metal contamination in four kinds of fishes from the different farmer markets in Beijing[J]. *Environmental Science*, 2011, 32(7): 2062-2068 (in Chinese).
- [40] YAN H, RUSTADBAKKEN A, YAO H, et al. Total mercury in wild fish in Guizhou Reservoirs, China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2010, 22(8): 1129-1136.
- [41] AMUNDSEN P A, STALDVIK F J, LUKIN A A, et al. Heavy metal contamination in freshwater fish from the border region between Norway and Russia[J]. *Science of The Total Environment*, 1997, 201(3): 211-224.
- [42] 樊庆云. 黄河包头段沉积物重金属的生物有效性研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学学位论文. 2008. FAN Q Y. Heavy metals bioavailability on sediments of the Baotou section of the Yellow River[D]. Huhehot: Inner Mongolia University, 2008 (in Chinese).
- [43] DANG F, WANG W X. Antagonistic interaction of mercury and selenium in a marine fish is dependent on their chemical species[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(7): 3116-3122.
- [44] ZHANG H, FENG X, CHAN H M, et al. New insights into traditional health risk assessments of mercury exposure: Implications of selenium[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(2): 1206-1212.