

洞庭湖区淡水鱼中有毒有害物残留研究现状

Review on current situation of harmful residual of freshwater fish in Dongting Lake region

徐思敏 王建辉 刘永乐 陈 奇

XU Si-min WANG Jian-hui LIU Yong-le CHEN Qi

王发祥 李向红 俞 健

WANG Fa-xiang LI Xiang-hong YU Jian

(长沙理工大学湖南省水生资源食品加工工程技术研究中心, 湖南 长沙 410114)

(Hunan Provincial Engineering Research Center for Food Processing of Aquatic Biotic Resources,
Changsha University of Science and Technology, Changsha, Hunan 410114, China)

摘要:文章对洞庭湖区淡水鱼中有害残留的现状、来源及其在鱼体内的富集方式进行剖析,对该领域今后研究的重点及方向进行展望,以期为后续对洞庭湖区淡水鱼有毒有害残留物的防控防治以及淡水鱼养殖策略的构建提供依据。

关键词:洞庭湖;淡水鱼;有毒有害残留;来源;富集方式

Abstract: The present review was focused on the analysis of the present situation of poisonous and harmful residues of freshwater fish in Dongting Lake, the sources of pollution and the way of enrichment in fish so as to provide the basis for subsequent investigation and study, residue control of poisonous and harmful residual in lake and the construction of breeding strategy in freshwater fish. Finally, the prospects of research emphasis in this field and the main direction are concluded.

Keywords: Dongting Lake; freshwater fish; poisonous and harmful residual; pollution sources; the way of enrichment

洞庭湖是由地质运动而产生,并在自然环境和人类活动等多种因素的共同作用下演变至今^[1],是继鄱阳湖之后中国的第二大淡水湖,其自然、经济和生态价值不容小觑^[2]。于淡水鱼种类而言,湖区淡水鱼种类较多,但主要受围垦淤积、过度捕捞等人为因素影响,呈逐年递减趋势^[3]。彭平波等^[4]检测发现 2002~2008 年洞庭湖淡水鱼有 8 目 19 科共

109 种;戴解林等^[5]调查发现 2003 年东洞庭湖淡水鱼共有 118 种;胡军华等^[6]实地调查发现 2002~2004 年西洞庭湖淡水鱼类共有 9 目 20 科 111 种;不同学者调查数据略有波动。而至 2013 年,李杰钦等^[7]调查显示洞庭湖淡水鱼类为 9 目 17 科 48 属,共计 85 种,淡水鱼种类出现大幅减少。于产量而言,以洞庭湖为主要产鱼地的湖南地区水产品总量呈逐年上升趋势。调查统计^[8-13]发现,2008~2014 年洞庭湖区淡水捕捞量先减后略有上升,依次为 16.00, 11.02, 9.67, 9.64, 10.50, 10.46, 10.78 万 t;历年湖南地区淡水加工产品分别为 5.66, 6.08, 6.45, 13.03, 14.42, 15.80, 15.35 万 t,呈缓慢增加趋势。但随着中国工业发展和城市化进程的不断加快,大量工业上和生活中的有毒有害废水不经处理就直接排入洞庭湖,导致了鱼类大量死亡,渔业损失较大,并且此类废水中有毒有害物质会在鱼体内富集,势必带来潜在的食源性安全风险,如 2010 年发生于东洞庭湖澧湖的大面积死鱼事件^[14],其主要原因为水中有有机物含量过高,导致鱼体缺氧。这类有机物主要来自工业和生活废水,每年造成渔业损失达 800~1 000 万元^[15]。

本研究拟从近年来洞庭湖区淡水鱼及其加工产品中重金属和持久性有机污染物污染的现状、来源及其在鱼体内的富集方式进行综述,以期为后续调查研究、对湖区淡水鱼有害残留物的防控防治以及淡水鱼养殖策略的构建提供依据。

1 洞庭湖区淡水鱼中有害污染物研究现状

近年来,由于人类的过度开发利用以及工业和生活废水的直接排入,洞庭湖的生态环境已遭到严重破坏,废水中的大量有毒有害物质在水生生物体内出现富集,这可能严重危害到水产品安全与人类健康。目前,对于水产品中有毒有害物质的调查研究颇多,其中重金属和持久性有机污染物因其

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(编号:31301564);湖南省自然科学基金项目(编号:2015JJ2011);湖湘青年英才支持计划项目(编号:2015RS4051)

作者简介:徐思敏,女,长沙理工大学在读硕士研究生。

通讯作者:王建辉(1980—),男,长沙理工大学教授,博士。

E-mail: wangjh0909@163.com

收稿日期:2016-02-03

高毒性和难降解性,且能够在生物链中蓄积和传递^[16–17],已引起人们的广泛担忧,广大学者也在该领域开展了大量调查研究。

1.1 重金属

水产品中重金属污染一直是人们关注的焦点。近年相关文献的调查研究数据具体见表 1。祝云龙等^[18]于 2015 年对大通湖及东洞庭湖区水生生物体中重金属 Cd、Pb、Hg、As 含量的研究发现,以上两湖区湖水中重金属含量较少,所测水样水质基本上符合中国 I 类水标准。水生生物体中,虾的 Cd、Pb 含量最高,其次是螺,鱼体内较少;而 Hg 的含量却相反,鱼体内最多,螺次之,虾最少;螺的 As 含量最高,其次是虾,鱼体内最少;从鱼的生活习性分析发现,可能缘于沉积物对重金属的可逆吸附作用,如被沉积物吸收后的重金属可被再次释放出来,从而导致湖底局部水环境中重金属的暴露浓度相对较高,底栖鱼类中重金属含量高于中上层鱼类^[22]。从鱼的食性而言,可能缘于食物链的放大作用,肉食性鱼类中重金属含量高于植食性鱼类。曾龄顾^{[20]6–11}对洞庭湖区鲢、草、鲫、鳊鱼中重金属含量进行研究分析发现,洞庭湖区底栖鱼类样品已受到 Cd、Pb、As 的污染,其中 Cd 污染程度最高,铅次之,砷相对较弱。刘芳芳^{[21] 11–21}通过对东洞庭湖中淡水鱼类和长沙市一些精养鱼塘中的养殖鱼类各部位中 Zn、Pb、Cd、Cu、Cr 元素的研究发现,大部分重金属如 Pb、Cd、Cu 在肝脏中含量最多,腮中 Zn 含量最高,肌肉中各种重金属含量均较少,其富集重金属能力最弱;该研究结果与彭湘莲等^[23]的研究结果相似。而精养草鱼受重金属的污染程度高于野生草鱼。上述研究与 Qiu Yao-wen 等^[19]的研究结果

不尽相同,如野生鱼中的铜、锌和镉元素的平均浓度显著高于养殖鱼,但铅元素野生鱼和养殖鱼体内的含量情况是相反的,说明铅元素在养殖鱼类中的转移因子最大。究其原因可能是淡水鱼生长的环境不同,且不同鱼饲料中重金属含量各异所致;此外,跟鱼的年龄、大小等也存在一定关联^[24]。由此可见,不同水生生物对同一重金属的富集能力各异,相同生物的不同组织对同一重金属的富集能力也不同,同种生物的同种组织对不同重金属的富集能力也不尽相同。洞庭湖区淡水鱼内脏中重金属的含量明显高于肌肉中的含量,总体来说,Zn 含量最高,Cu 和 Pb 其次,而 Pb、As 和 Cd 含量存在超标现象,存在安全隐患。

1.2 持久性有机污染物

近年相关文献的调查研究数据具体见表 2。2011 年,曾龄顾^{[20]12–24}对洞庭湖区城陵矶、鹿角等 20 个采样点的鲢鱼、草鱼、鲫鱼、鳊鱼 4 种鱼类肌肉中的禁用兽药残留和有机氯农药残留进行分析发现,所检样品中未发现农药、兽药残留。胡余明^{[25]31–68}2013 年对洞庭湖蓄水季和枯水季鱼样中二噁英、多氯联苯、多溴联苯醚的含量进行检测发现,在所检样品中均有上述有机污染物的存在,且二噁英蓄水季含量(29.99 pg/g · WW; WW: 表示湿重)显著高于枯水季(1.02 pg/g · WW),多氯联苯含量在蓄水季和枯水季相差较大,多氯联苯在蓄水季和枯水季的浓度均数分别为421.70, 294.40 pg/g · WW,而多溴联苯醚含量在蓄水季和枯水季相差不大,蓄水季和枯水季的浓度均数分别为 143.80, 128.70 pg/g · WW;其中,二噁英、多氯联苯和多溴联苯醚的含量在蓄水季草鱼体内皆为最高,但总的毒性当量最大的

Table 1 Residues of heavy metal in freshwater fish of Dongting Lake in recent surveys													mg/kg
取样时间	取样地点	种类	取样部位	Pb	As	Cr	Cd	Hg	Cu	Fe	Zn	Mn	资料来源
2005	大通湖及东洞庭湖	鱼类	肌肉	0.07	0.02	—	0.01	0.06	—	—	—	—	文献[18]
		虾	肌肉	0.61	0.06	—	0.38	0.01	—	—	—	—	
		螺	肌肉	0.12	0.34	—	0.09	0.01	—	—	—	—	
2007	大亚湾	白鲢鱼(野生)	肌肉	<0.01	—	—	<0.01	—	<0.01	—	0.05	—	文献[19]
		花斑蛇鲻(野生)	肌肉	<0.01	—	—	<0.01	—	<0.01	—	0.05	—	
		长鳍鲳参(养殖)	总鱼	<0.01	—	—	<0.01	—	<0.01	—	0.03	—	
		黄笛鲷(养殖)	总鱼	<0.01	—	—	<0.01	—	<0.01	—	0.04	—	
2011	洞庭湖	鲢鱼	肌肉	0.20	0.32	1.05	0.06	0.01	3.18	4.65	7.23	—	文献[20] ⁶⁻¹¹
		草鱼	肌肉	0.15	0.16	1.21	0.09	0.01	2.68	5.82	6.26	—	
		鲫鱼	肌肉	0.46	0.52	1.92	0.15	0.02	3.77	6.03	5.19	—	
		鳊鱼	肌肉	0.98	0.35	0.82	0.31	0.02	3.84	4.26	6.82	—	
2012	东洞庭湖	草、鲢、鲤鱼	肾脏	0.12~0.62	—	—	0.03~0.46	—	ND~1.72	—	1.02~293.91	ND~1.01	文献[21] ¹¹⁻²¹
		草、鲢、鲤鱼	肝脏	0.08~0.33	—	—	0.02~0.32	—	1.02~17.42	—	3.49~200.67	ND~2.75	
		草、鲢、鲤鱼	肠	0.01~0.17	—	—	0.01~0.28	—	ND~2.67	—	2.34~225.08	ND~2.04	
		草、鲢、鲤鱼	腮	ND~0.11	—	—	ND~0.17	—	ND	—	6.07~282.10	1.72~17.95	
		草、鲢、鲤鱼	肌肉	ND~0.20	—	—	ND~0.03	—	ND~1.72	—	0.71~9.06	ND~0.22	
GB 2762—2012 残留限量				1.00	0.10	2.00	0.10	0.50~1.00	*	*	*	\	

[†] “ND”表示未检出,“—”表示未检测,“*”表示该卫生标准已废止,“\”表示未查到相关数据。

表 2 近年洞庭湖区淡水鱼中有机污染物残留情况[†]
Table 2 Residues of organic pollutants in freshwater fish of Dongting Lake in recent surveys pg/g WW

取样 时间	取样 地点	种类	取样 部位	兽药 残留	农药 残留	二噁英			多氯联苯			多溴联苯 醚 PBDEs		氯酚类 CPs	资料 来源
						PCDD/Fs			PCBs						
						蓄水季	干旱季	OCDD	OCDF	蓄水季	干旱季	蓄水季	干旱季		
2012	洞庭湖	鲢鱼	肌肉	ND	ND	—	—	—	—	—	—	—	—	—	文献 [20] ^{6—11}
		草鱼	肌肉	ND	ND	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
		鲫鱼	肌肉	ND	ND	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
		鲢鱼	肌肉	ND	ND	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
		草鱼	总鱼	—	—	198.36	1.40	—	—	161.20	132.60	122.20	107.60	—	
		黄颡鱼	总鱼	—	—	9.05	3.28	—	—	759.80	1 270.60	268.10	419.60	—	
		长吻鮠	总鱼	—	—	10.67	1.00	—	—	2 209.20	610.10	488.00	196.80	—	
		鲢鱼	总鱼	—	—	5.79	0.47	—	—	228.80	50.20	170.50	57.10	—	
2013	洞庭湖	鳙鱼	总鱼	—	—	6.80	0.71	—	—	292.60	77.20	144.20	157.40	—	文献 [25] ^{31—68}
		鳙鱼	总鱼	—	—	23.06	0.37	—	—	188.90	180.70	105.70	86.80	—	
		青鱼	总鱼	—	—	10.12	0.42	—	—	333.80	35.50	50.20	19.60	—	
		鳊鱼	总鱼	—	—	26.87	0.97	—	—	46.70	272.10	21.30	66.60	—	
		鳊鱼	总鱼	—	—	22.31	0.41	—	—	60.70	57.10	61.90	77.80	—	
		黑鱼	总鱼	—	—	8.69	0.54	—	—	274.40	62.80	104.10	80.50	—	
		鳊鱼	总鱼	—	—	40.49	1.87	—	—	210.10	771.20	106.50	227.20	—	
		鳊花鱼	总鱼	—	—	15.32	0.44	—	—	308.20	76.30	159.30	40.90	—	
2013	洞庭湖	鲫鱼	总鱼	—	—	12.40	1.37	—	—	408.10	230.40	67.80	134.70	—	文献 [26] ^{34—38}
		鳊鱼	肌肉	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1.41×10 ⁵	
		白鲢	肌肉	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	3.54×10 ⁴	
		鲤鱼	肌肉	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1.10×10 ⁵	
		鳊鱼	肌肉	—	—	638.00		4.73	0.30	—	—	—	—	—	
		鲤鱼	肌肉	—	—	85.00		1.76	0.11	—	—	—	—	—	
		鳙鱼	肌肉	—	—	162.00		2.77	0.16	—	—	—	—	—	
		鳊鱼	肌肉	—	—	345.00		1.52	0.03	—	—	—	—	—	
2014	洞庭湖	鳊鱼	肌肉	—	—	107.00		1.40	0.04	—	—	—	—	—	文献 [27]
		鳊鱼	肌肉	—	—	10.11		2.07	0.05	—	—	—	—	—	
		鳊鱼	肌肉	—	—										
GB 2762—2012 残留限量				\\	\\	\\			5.0×10 ⁵			\\		\\	

† “ND”表示未检出,“—”表示未检测,“\\”表示未查到相关数据。

为蓄水季鳊鱼(5.62 pg/g · WW),甚至超过欧盟(EC) No 2375—2001 允许的最大值(4 pg/g · WW)。洞庭湖附近海鲜市场售卖的鱼中均有氯酚类化合物的存在^{[26]34-38},湖区鱼中还含有多氯联苯戴奥辛和多氯联苯呋喃,但均未超过欧盟食品限量标准(4 pg/g · WW),其中,多氯联苯戴奥辛含量(如八氯二噁英(OCDD)含量范围为 1.40~4.73 pg/g · WW)要显著高于多氯联苯呋喃含量(如 OCDF 含量范围为 0.03~0.30 pg/g · WW)^[27]。刘巧娜^[28]对洞庭湖鳊鱼、鳊鱼、鲃鱼、黑鱼、鳙鱼、鲤鱼、鳊鱼、花鲢、白鲢、草鱼肌肉中灭螺剂及副产物进行检测,发现这 10 种经济鱼中均存在不同浓度的五氯酚钠及其副产物二噁英和氯硝柳胺。由此可见,洞庭湖鱼体受到了一定程度的污染,鱼体对有机污染物有生物富集作用,且不同种类鱼类对同种有机污染物的富集能力不同,在有机污染物残留中氯酚类物质含量较高,二噁英、多氯联苯、多溴联苯醚等也均检测出,然其富集机理有待进一

步调查研究。当前中国对有机物残留限量规定尚不完全,缺乏明确规定,因有机污染物容易在生物体内富集,影响持久,必须引起高度重视。

2 鱼体内有害物质富集方式

生物体内有毒有害物质的富集方式和规律一直是大众研究和探讨的重点问题。一般来说,重金属进入鱼体内可通过鳃的呼吸作用,吸收水中的重金属,然后经过血液循环输送到体内各个组织器官,这是鱼体吸收重金属的主要途径^[29];其次,可通过鱼体摄入含有重金属的饵料而进入鱼体;另外,水体中的重金属还可通过与鱼体皮肤、黏液发生交换配位等进入鱼体内^[30]。在低 pH 环境下因重金属的活性态含量较高包括可交换态、碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态、有机物结合态^[31],导致重金属容易被吸附^[32]。而有机污染物在鱼体内的富集,其生物富集因子与疏水性可能存在密切关系^[33],于疏水性化合物而言,有机化合物的疏水性越

强,生物富集因子越大,富集能力越强。而这些有毒有害物质能够通过食物链由低向高传递,最终在人体积累、浓缩,对人类健康造成威胁。

3 洞庭湖区淡水鱼产品中的有害物质污染来源

重金属在生物组织中积累主要取决于其所处的生长环境、捕食或饲料中的重金属含量、有毒有害物质的摄取和降解过程^[19]。重金属主要通过自然和人类活动两种方式进入湿地生态系统,包括水文过程、自然腐蚀、大气沉积、农业非点源污染、工业活动等^[34]。Liang Jie等^[35]通过多元统计分析法得出造成重金属污染的人为因素主要来自采矿、冶炼、化工和农业活动。持久性有机污染物主要通过工业和生活污水的排放、农药和激素的使用进入水体,导致水质变差,从而使得鱼体吸收有害物质并在体内富集,影响水产品安全。

3.1 工业“三废”

2005年洞庭湖周边造纸企业44家,化工企业12家,纺织企业16家,酿酒、制糖企业16家,其他企业13家,其产生的废水总量为2 004.80万t,重金属元素1 084.90 t、有机化合物713.08 t^[36]。2007年造纸工业排入污水总量为13 100.00万t^[37]。2008年洞庭湖水质从Ⅳ类下降为Ⅴ类^[38]。2009年洞庭湖有工业企业788家,工业废水总排入量为27 723.00万t^[39]。经过政府对造纸企业的集中整治,2011年洞庭湖区造纸企业还有108家、其中制浆企业13家、废纸造纸企业95家,产生的废水仅15%经由处理,其余废水均未达排放标准就直接排入湖中,洞庭湖水质污染的严重程度可见一斑^[40]。相关研究^[41-42]表明,洞庭湖水体状况呈逐渐恶化的趋势,富营养化程度逐年增加,除了工业废水的排入,其可能原因还包括水利工程建设^[43]和自然灾害增加(如降水量减少)等原因,其有害物质在湖中积累,经过呼吸、皮肤吸收等过程进入鱼体内,进而在鱼体内富集。

3.2 饲料

洞庭湖淡水鱼种类丰富,年产量高,历史上最高捕捞产量达5.15万t^[44]。旨在提高鱼体必需金属元素的利用率,促进其快速生长,每年大量含重金属添加剂如铜和锌的饲料投入湖中^[45],鱼食用此类饲料后,势必因其体内重金属富集,从而危害到淡水鱼产品安全。

3.3 农药

农药如杀虫剂、除草剂、灭菌剂等的使用对洞庭湖水质具有持久性的影响。其中,对洞庭湖区影响较大的农药为灭螺剂。由于外流汇入带来大量泥沙沉积于湖底,日积月累进而在洞庭湖区堆积形成许多州滩,为钉螺的生长繁殖提供了良好的场所,导致钉螺大幅增长,从而人们大量施用五氯酚钠和氯硝柳胺等灭螺剂以控制血吸虫病的传播。这对洞庭湖的生态环境造成了一定程度的污染。虽然现在基本上停止了灭螺剂的使用,但消除曾使用的灭螺剂对洞庭湖地区生态环境所造成的影响尚需时日^[46]。

4 结论与展望

洞庭湖区是中国农业生产、水产品养殖中的一个非常重

要的地区,其水体污染程度直接威胁到湖区乃至全国人民的身体健康。迄今研究发现,湖区大部分地区水产品中尚存在着有毒有害物质的残留,Pb、As和Cd含量存在超标现象,而鱼体中重金属含量可反映出水环境中重金属的污染状况,且有机污染物残留中氯酚类物质含量较高,二噁英、多氯联苯、多溴联苯醚等也均有检出。

因此,对洞庭湖区鱼体内重金属及其它有毒有害物质进行定期监测,调查摸清湖区水产养殖环境污染问题现状,随时监控洞庭湖水质情况和淡水鱼产品质量,为相关部门和居民提供可靠数据和风险预警,进而有效指导水产品的养殖、生产与消费显得尤为重要。如鲫鱼和鲢鱼等底栖类和肉食性鱼体中重金属Cd含量较高,建议消费者尽量少吃或只吃重金属富集少的肌肉部分。再者,根据鱼类生长周期、年龄、营养状况不同,生物体对重金属的积累程度各异,开展有毒有害物质在生物体内的代谢转化途径研究将会是以后研究的重点,同时寻找对有毒有害物质修复能力更强的植物或微生物种类,开展湖区生态环境修复作用研究,并防止其对有毒有害物质的可逆释放,这也已成为洞庭湖区水质治理和指导湖区安全绿色养殖和种植的关键问题所在。因此,均有待政府相关部门加大科研投入,科研院所加大科研力度,进而有理有据、有的放矢地制定相关政策和策略,方可恢复昔日“绿色洞庭,洞庭粮仓”之美誉。

参考文献

[1] 苏成,莫多闻,王辉.洞庭湖的形成、演变与洪涝灾害[J].水土保持研究,2001,8(2):53-55.

[2] 邱蓓.洞庭湖区环境破坏现状与生态修复对策研究[D].南京:南京林业大学,2014:12-14.

[3] 廖伏初,何望,黄向荣,等.洞庭湖渔业资源现状及其变化[J].水生生物学报,2002,26(6):625-626.

[4] 彭平波,刘松林,胡慧建,等.洞庭湖鱼类资源动态监测与研究[J].湿地科学与管理,2008,4(4):17-20.

[5] 戴解林,李亚白.东洞庭湖鱼类资源保护对策探讨[J].内陆水产,2003(12):39-40.

[6] 胡军华,胡慧建,何木盈,等.西洞庭湖鱼类物种多样性及其时空变化[J].长江流域资源与环境,2006,15(4):434-441.

[7] 李杰钦.洞庭湖鱼类群落生态研究及保育对策[D].长沙:中南林业科技大学,2013:13-18.

[8] 农业部渔业渔政管理局.中国渔业统计年鉴[Z].北京:中国农业出版社,2010:21-85.

[9] 农业部渔业渔政管理局.中国渔业统计年鉴[Z].北京:中国农业出版社,2011:24-90.

[10] 农业部渔业渔政管理局.中国渔业统计年鉴[Z].北京:中国农业出版社,2012:19-90.

[11] 农业部渔业渔政管理局.中国渔业统计年鉴[Z].北京:中国农业出版社,2013:24-96.

[12] 农业部渔业渔政管理局.中国渔业统计年鉴[Z].北京:中国农业出版社,2014:24-96.

[13] 农业部渔业渔政管理局.中国渔业统计年鉴[Z].北京:中国农业出版社,2015:24-96.

[14] 谢永宏,陈心胜,侯志勇,等.东洞庭湖漉湖死鱼事件的原因分

析与政策建议[J]. 农业现代化研究, 2010, 31(5): 561-564.

[15] 吕殿青, 王宏, 侯旭蕾, 等. 洞庭湖区环境污染的安全性研究[J]. 环境科学导刊, 2012, 31(3): 53-56.

[16] 张晓博. 重金属对水生生物的毒害作用[J]. 广东农业科学, 2010(7): 149-150.

[17] 秦春艳. 广东沿海海洋生物体内有毒物质的生物积累与污染评价[D]. 广州: 华南师范大学, 2007: 3-5.

[18] 祝云龙, 姜加虎, 黄群, 等. 大通湖及东洞庭湖区生物体重金属的水平及其生态评价[J]. 湖泊科学, 2007, 19(6): 691-696.

[19] Qiu Yao-wen. Bioaccumulation of heavy metals both in wild and mariculture food chains in Daya Bay, South China[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2015(163): 7-14.

[20] 曾龄顾. 洞庭湖区淡水鱼化学污染物调查与分析[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2012.

[21] 刘芳芳. 淡水鱼类中重金属污染及其与环境相关性分析[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2013.

[22] 杨梦昕, 付湘晋, 李忠海, 等. 湘江流域重金属污染情况及其对食物链的影响[J]. 食品与机械, 2014, 30(5): 103-106.

[23] 彭湘莲, 刘宗敏, 刘云. 湘江长沙段水中铅、镉、铬含量对淡水鱼的影响[J]. 食品与机械, 2013, 29(5): 68-71.

[24] 贺亮. 铜在鲫鱼中的积累机制及其影响因素的研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2007: 4-6.

[25] 胡余明. 洞庭湖鱼组织中持久性有机污染物的分析评估研究[D]. 长沙: 湖南师范大学, 2013.

[26] 冯敏. 洞庭湖区氯酚类污染物的分布特征、生态效应及健康风险评估研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2014:.

[27] Gao Lirong, Zhang Qin, Zhang Bing, et al. Polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans in water and six fish species from Dongting Lake, China[J]. Chemosphere, 2014 (114): 150-157.

[28] 刘巧娜. 洞庭湖灭螺剂及副产物的污染现状及风险分析研究[D]. 石家庄: 河北师范大学, 2014: 17-64.

[29] 尚晓迪, 何志强. 重金属在鱼体内积累作用的研究进展[J]. 河北渔业, 2009(5): 44-45.

[30] 李华. 重金属在淡水鱼体内的蓄积、排出机理及其金属硫蛋白的研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2013.

[31] 代天飞, 王昌全, 李冰. 油菜各部位对土壤中活性态重金属的累积特征分析[J]. 农业环境科学学报, 2006(25): 471-475.

[32] 张鑫. 安徽铜陵矿区重金属元素释放迁移地球化学特征及其环境效应研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2005: 7-8.

[33] 闻洋. 有机污染物生物富集与鱼体内临界浓度关系的研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2015: 9-21.

[34] Liu Jia-yu, Liang Jie, Yuan Xing-zhong, et al. An integrated model for assessing heavy metal exposure risk to migratory birds in wetland ecosystem: A case study in Dongting Lake wetland, China[J]. Chemosphere, 2015(135): 14-19.

[35] Liang Jie, Liu Jia-yu, Yuan Xing-zhong, et al. Spatial and temporal variation of heavy metal risk and source in sediments of Dongting Lake wetland, mid-south China[J]. Environmental Science and Health, 2015, 1(50): 100-108.

[36] 何介南, 康文星, 袁正科, 等. 洞庭湖湿地污染物的来源分析[J]. 中国农学通报, 2009, 25(17): 239-244.

[37] 余建青, 刘妍, 欧伏平, 等. 洞庭湖区造纸污水对水环境的影响及经济损失估算[J]. 内陆水产, 2007(7): 36-37.

[38] 孙占东, 黄群, 姜加虎. 洞庭湖主要生态环境问题变化分析[J]. 长江流域资源与环境, 2011, 20(9): 1 108-1 113.

[39] 钟振宇, 陈灿. 洞庭湖水质及富营养状态评价[J]. 环境科学与管理, 2011, 36(7): 169-173.

[40] 扬瑜. 湖南省环洞庭湖区造纸行业污染处理对策研究[D]. 长沙: 中南大学, 2011: 3-4.

[41] 饶建平, 易敏, 符哲, 等. 洞庭湖水质变化趋势的研究[J]. 岳阳职业技术学院学报, 2011, 26(3): 53-57.

[42] 黄代中, 万群, 李立强, 等. 洞庭湖近 20 年水质与富营养化状态变化[J]. 环境科学研究, 2013, 6(1): 27-33.

[43] 黄维, 王为东. 三峡工程运行后对洞庭湖湿地的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(20): 1-8.

[44] 李成. 洞庭湖主要经济鱼类资源调查及其变化规律研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2006: 16-17.

[45] 唐春江, 舒畅, 唐常青, 等. 浅谈益阳地区农产品重金属污染的现状、来源及对策[J]. 作物研究, 2014, 28(8): 905-908.

[46] 张兵, 郑明辉, 刘芃岩, 等. 五氯酚在洞庭湖环境介质中的分布[J]. 中国环境科学, 2001, 21(2): 165-167.

(上接第 80 页)

参考文献

[1] 张绍英, 魏文军, 田国平, 等. 一种用于筒式榨汁机的脱气排汁及无氧呼吸系统: 中国, 200710064170.6[P]. 2007-09-26.

[2] 郭恩生, 阚炳学, 赵红, 等. 带式浸提榨汁机: 中国, 96219146.9 [P]. 1997-11-12.

[3] 张绍英. 背压注料压榨方法: 中国, 200410080346.3[P]. 2005-03-02.

[4] 陈小龙. 薄层连续压滤分离方法及试验装置的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2013: 51-88.

[5] 余敏. 出版集团研究[M]. 北京: 中国书籍出版社, 2001: 179-193.

[6] Domien De Paepe, Katleen Coudijzer, Bart Noten, et al. A comparative study between spiral-filter press and belt press implemented in a cloudy apple juice production process [J]. Food Chemistry, 2015, 173: 986-988.

[7] Amaki K, Saito E, Taniguchi K, et al. Role of chlorogenic acid quinone and interaction of chlorogenic acid quinone and catechins in the enzymatic browning of apple [J]. Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry, 2011, 75: 829-832.

[8] De Paepe D, Noten B, De Loose M, et al. An improved mass spectrometric method for identification and quantification of phenolic compounds in apple fruits[J]. Food Chemistry, 2013, 136: 368-375.

[9] Mollov P, Mihalev K, Buleva M, et al. Cloud stability of apple juices in relation to their particle charge properties studied by electro-optics [J]. Food Research International, 2006, 39: 519-524.

[10] Nabila Labsi, Youb Khaled Benkahla, Abdelkader Boutra, et al. Heat and flow properties of a temperature dependent viscoplastic fluid including viscous dissipation[J]. Journal of Food Process Engineering, 2013, 36(4): 450-461.

[11] 姚刚, 李凤城, 张绍英, 等. 低温胁迫提升苹果鲜榨汁品质研究[J]. 农业机械学报, 2015(2): 61-63.