

乌梁素海水体重金属元素统计分布特征研究

岳荣¹, 张红², 史锐^{1*}, 王美萍¹ (1. 巴彦淖尔市环境科学研究所, 内蒙古临河 015000; 2. 山西大学环境与资源学院, 山西太原 030006)

摘要 [目的]研究乌梁素海水体中重金属污染现状。[方法]于2010年1月~2014年12月在乌梁素海湖区采集表层水样,对湖水中重金属及相关水质因子含量进行分析,然后利用非参数检验、相关性分析及主成分分析,对水体中重金属及相关水质因子进行相关分析及来源解析。[结果]参照《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)中Ⅲ类水体标准,乌梁素海水体中高锰酸盐指数、Hg及Pb均出现超标现象;不同的样点水体中重金属含量无显著差异,不同时间段内As、Hg、Pb、Zn和Cr含量存在显著差异;河套灌区农田面源污染、上游工业污水及乌梁素海周边生活污水为影响乌梁素海水体中重金属含量的3个主要因素。

关键词 湖泊水体;重金属;分布特征;乌梁素海

中图分类号 S181.3 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2015)31-376-04

Research on Statistical Distribution Characteristics of Heavy Metals in Wuliangsu Lake

YUE Rong¹, ZHANG Hong², SHI Rui^{1*} et al (1. Institute of Environmental Science of Bayannur, Linhe, Inner Mongolia 015000; 2. College of Environmental Science and Resources, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006)

Abstract [Objective] The study aims to analyze water pollution of Wuliangsu Lake by heavy metals. [Method] After Surface water samples were collected from in Wuliangsu Lake from January 2010 to December 2014, the content of heavy metals in the lake water were analyzed, and the correlation of heavy metals was analyzed based on the principal component analysis. [Result] According to the *Surface Water Environmental Quality Standards* (GB3838-2002), the potassium permanganate index, Hg and Pb content exceeded the nation standard. There were no significant differences in the content of heavy metals in different lake areas, while As, Hg, Pb, Zn and Cr content had significant differences in different periods. Non-point source pollution of Hetao irrigation farmland, industrial sewage and domestic pollution source are three main factors affecting the content of heavy metals in Wuliangsu Lake.

Key words Lake water; Heavy metals; Distribution characteristics; Wuliangsu Lake

湖泊水体是人类赖以生存的重要自然资源,也是维系区域生态系统功能的重要组成部分,更是地球物质生物化学循环的储库^[1-2]。自工业文明兴起的百年来,由于人类工农业生产活动,如采矿、冶炼、化工、民用固体废弃物不合理填埋和堆放以及大量化肥、农药的施用,导致进入水体环境中的污染物种类和数量越来越多,给环境和生态系统健康造成了许多问题^[3]。多年来,许多学者非常关注水体富营养化问题,因为其宏观破坏性能引起人们的注意,而水体重金属污染问题人们重视程度相对不够。研究表明,水体中重金属可以导致人群健康风险^[4-5],如甲基汞是水俣病致病因,镉是骨痛病致病因。重金属污染物进入水体后不易被微生物降解,难以治理,具有累积性效应,并且绝大部分通过各种物理、化学、生物途径迅速由水相转入固相(悬浮物和沉积物),最终进入沉积物中蓄积,又在有机质的分解和生物活动等条件下被释放出来,造二次污染^[6-7]。此外,重金属污染物进入天然水体后,河流底泥沉积物将会对污染物中的重金属离子进行吸附富集^[8-10]。研究证实水体中有些重金属转化的过程是可逆的,在各种水环境关键因子的作用下,颗粒态的重金属又会向水体中解吸、释放,从而污染水体^[11]。乌梁素海是内蒙古自治区的主要渔业基地,其湖水终将退水黄河,重金属的理化性质及生物毒性会影响湖区渔业与黄河水体安全,增加区域生态风险^[12]。因此,水体中重金属含量常被

用作判别水环境质量的重要参考指标^[13]。目前,关于乌梁素海重金属的研究主要集中在湖泊沉积物方面,对于表层水体中重金属研究较为薄弱,且存在研究的水质因子较少,主要针对某一重金属因子开展环境行为研究,尤其缺少探讨多种重金属与其他相关水质因子的关系等问题。此外,根据《水污染防治行动计划》要求,内蒙古自治区和巴彦淖尔市两级政府决定启动乌梁素海生态治理工程。因此,摸清乌梁素海水水质因子时间变化趋势,探讨重金属污染物来源,对于实施乌梁素海生态治理工程意义十分重大。笔者以乌梁素海为研究对象,研究了2010年1月~2014年12月湖区表层水体中As、Hg、Pb、Cu、Zn、Cr含量及高锰酸盐指数、pH分布特征,分析了其与其他相关水质因子的关系及可能的来源,目的在于通过对乌梁素海重金属浓度的监测及时间分布特征分析比较,掌握湖区水体中重金属污染现状,为乌梁素海水水质变化趋势研究积累资料,并为“十三五”期间乌梁素海生态治理和水质管理提供可参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况 乌梁素海位于内蒙古巴彦淖尔市乌拉特前旗境内、呼和浩特、包头、鄂尔多斯三角地带的边缘(图1),距乌前旗政府所在地西山嘴镇13 km,距110国道22 km,是黄河改道形成的河迹湖,我国八大淡水湖之一,是全球荒漠半荒漠地区极为少见的大型草原湖泊,也是地球同一纬度最大的湿地,现有水域面积293 km²,其中芦苇区面积为118.97 km²,明水区面积为111.13 km²。乌梁素海是内蒙古自治区的主要渔业基地,每年产鱼量约700多万t^[14],其湖水终将退水黄河,因此也是内蒙古河套灌区排灌水系统的重要组成部分,河套灌区多年来的农田退水、上游工业污水不断

基金项目 国家水污染防治行动计划——乌梁素海综合整治项目。
作者简介 岳荣(1968-),男,内蒙古巴彦淖尔人,高级工程师,从事环境评估与生态恢复研究。*通讯作者,工程师,硕士,从事环境科学方法论与生态恢复研究。
收稿日期 2015-10-08

携带污染物入湖,加速了乌梁素海的水质恶化^[15]。

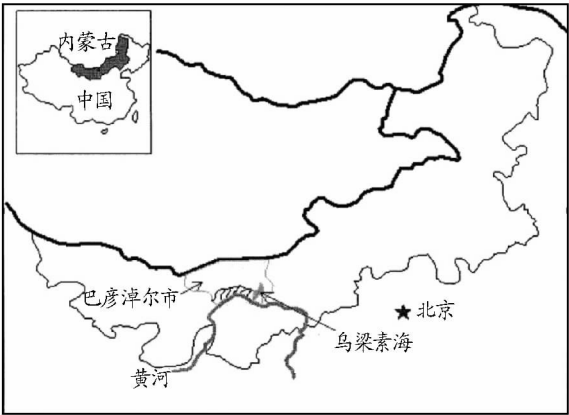


图1 乌梁素海地理位置

1.2 样品采集与分析 2010 年 1 月~2014 年 12 月,分季度在乌梁素海进口区、湖心区及出口区布设样点(图 2),采用 GPS 定位系统进行布点采样,共采样 29 期,采集样本 87 个。样品采集后盛放于聚乙烯塑料取样瓶中,然后放至便携式冰箱中,使温度保持在 0℃左右,带回实验室过滤后进行重金属元素(As、Hg、Pb、Cu、Zn、Cr)的分析与测定。按照《地表水和污水监测技术规范》(HJ/T91-2002)和《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)进行样品分析,Hg、As 采用原子荧光光度计测定,Pb、Zn、Cu、Cr 采用原子吸收分光光度计测定。

1.3 数据处理与分析 采用非参数检验、相关性分析及主成分分析,运用 SPSS20.0,对数据进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 水体中重金属及其他水质因子含量描述性统计分析 由表 1 可知,研究区域水体中重金属元素变异系数均大于 1,属于较强变异强度,由于采样点数量较少,不能代表整个湖区,但可以判断这些水质因子含量的时间差异相对较

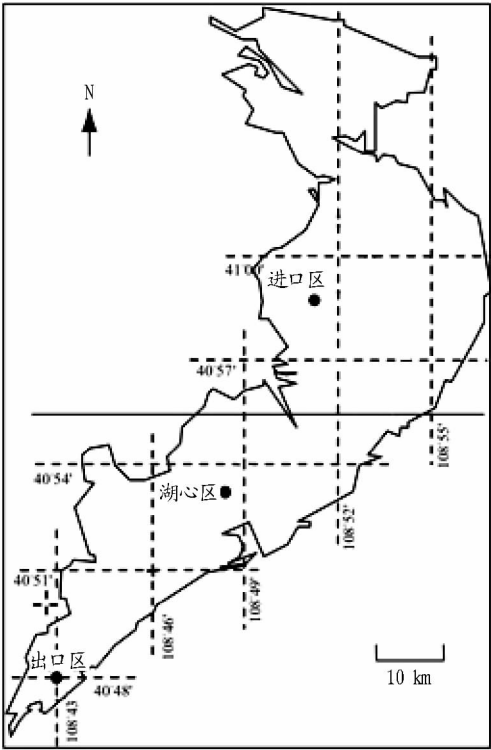


图2 乌梁素海布点采样图

大。从偏态和峰度,Pb、Cr 接近正态分布,其余水质因子均呈现非正态分布。根据《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)中Ⅲ类水体标准,各样点在采样时间段内 Hg 及 Pb 均出现超标现象,高锰酸盐指数超标率为 89.66%,表明乌梁素海水体受还原性有机(和无机)物质污染程度较高^[16-18],这可能是由于湖体接纳上游工业废水所致。总体来看,乌梁素海湖区选定的水质因子超标倍数表现为高锰酸盐指数>Hg>Pb>=pH=As=Cu=Zn=Cr,超标率表现为高锰酸盐指数>Pb>Hg=pH=As=Cu=Zn=Cr。

表1 乌梁素海表层水体中重金属与其他水质因子统计性描述

水质因子	检出数	未检出数	均值 mg/L	标准差 mg/L	偏度	峰度	变异系数	标准 mg/L	最大值超标 倍数	超标率 %
pH	87	0	8.22	0.44	-1.51	2.56	0.05	6~9		
高锰酸盐指数	87	0	9.85	3.68	2.33	9.34	0.37	6	4.75	89.66
As	64	23	0.004 7	0.006 3	3.03	13.44	1.32	0.02		
Hg	77	10	0.000 1	0.000 1	2.60	6.13	1.13	0.000 1	4.30	10.34
Pb	53	34	0.009 7	0.010 0	1.67	3.24	1.03	0.02	2.42	17.24
Cu	40	47	0.014 3	0.034 4	3.35	11.36	2.41	1.00		
Zn	77	10	0.037 9	0.049 0	4.50	25.19	1.29	1.00		
Cr	46	41	0.000 5	0.000 6	2.00	3.72	1.04	0.005		

2.2 水体中重金属因子时间分布特征

2.2.1 年际变化。由图 3 可知,2010~2014 年乌梁素海水体中各重金属的含量基本上都有各自的规律。Zn、Pb 和 Cd 元素在采样时间段内含量差别不大,Hg、Cu 3 个样点均在 2011 年出现峰值,其中 As 元素在 2010 年出现峰值,2011 年湖心区样点中 Hg 的含量达 0.26 μg/L,较低的入口区样点中 Hg 含量也达 0.13 μg/L,全部超过Ⅲ类地表水体标准。当地环保部门乌梁素海入口历史水质监测断面数据显示,2011 年

黄河来水中 Cu 含量出现峰值 8.3 μg/L,其余年份为 1.5~4.6 μg/L,由此判断,2011 年 Cu 含量异常升高在很大程度上受到来水影响;其次,2010~2014 年上游来水中 Hg 含量为 0.04~0.10 μg/L,As 含量为 2.50~4.18 μg/L,年均含量差别不大,乌梁素海内部水体-沉积物循环状况的变化、小尺度区域内污染物排放量及库容水量都有可能是导致 2011 年度 Hg 含量异常升高的原因。总体来看,各重金属元素在出现峰值后含量下降趋势不明显,甚至有含量升高现象。

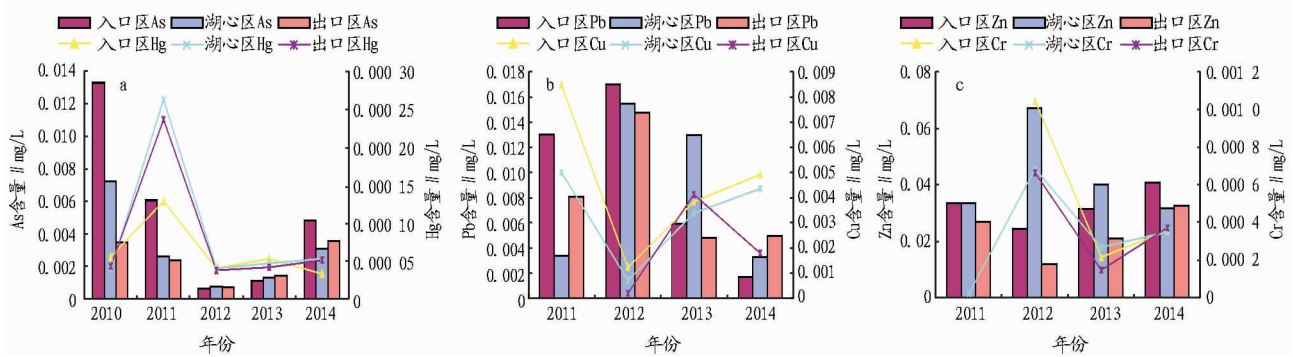


图3 2010~2014年乌梁素海水体中重金属元素时间序列变化

2.2.2 非参数检验。非参数检验是对不满足方差分析条件样本的一种可调整的方法,因为非参数检验不要求样本的分布是正态的和方差齐性的,它是通过对数据从小到大的排序,并由数据的秩代替原始数据进行统计分析。该研究中分析测试的数据分布不属于正态分布,因此采用多个独立样本的非参数检验对样本进行分析,检验方法为 Kruskal-Wallis H 法。由表 2 可知,当分组变量为样点时,检验结果中未得到的显著性概率 $P < 0.05$ 的水质因子,在一定程度上说明不同的采样位置水质因子含量无显著差异;当分组变量为采样时间时,显著性概率 $P < 0.05$ 的水质因子有 As、Hg、Pb、Zn 和 Cr,说明不同时间段内这些水质因子的含量差异显著。

表2 乌梁素海水质因子样本分布的非参数检验

水质因子	样点			时间		
	卡方值	自由度	渐近显著性	卡方值	自由度	渐近显著性
pH	3.444	2	0.179	36.491	28	0.131
高锰酸盐指数	2.631	2	0.268	39.588	28	0.072
As	1.259	2	0.533	58.436	28	0.001
Hg	0.081	2	0.960	67.870	28	0.001
Pb	0.073	2	0.964	79.511	28	0.001
Cu	0.960	2	0.619	72.614	28	0.001
Zn	3.169	2	0.205	57.133	28	0.001
Cr	0.159	2	0.923	76.875	28	0.001

2.2.3 不同水期重金属分布。从不同水期乌梁素海水体中重金属分布来看(图4),Hg 和 Pb 呈现相同的分布规律,即平水期 > 枯水期 > 丰水期,As 呈现丰水期 > 枯水期 > 平水期,Cu 与 Zn 呈现平水期 > 丰水期 > 枯水期,Cr 呈现平水期 > 丰水期 > 枯水期,这些规律除与湖区水量、区域污染源有关外,还与重金属本身的理化性质与外部环境有关。pH 是影响水体水质因子至关重要的因子^[19],乌梁素海整体呈现碱性环境,在这种环境中,Cr、Zn 的活性较大,而 As 和 Cu 则转入稳定态在底泥中富集;其次,乌梁素海 N、P 元素富集较为严重,水体中 COD 浓度相对较高^[20],当湖体中 N、P 富集会引起水体中微生物和浮游植物的大量繁殖,造成水体富营养化,进而造成水体中溶解性有机质增多,而溶解性有机质可以作为重金属迁移转化的一个媒介,控制着重金属的迁移和溶解性^[21],使得重金属由水体向底泥的迁移转化效果增加,表现为水体中重金属含量降低,同时,COD 会通过影响重金属离子的价态,从而影响重金属的行为,使得重金属在水相与沉积相之间得到重新分配。当水体中 COD 浓度增加时,沉积物及周围环境的氧化还原电位升高,水体的金属离子和有机物之间的离子交换、吸附、螯合及氧化还原等一系列反应也相应改变^[22];再次,乌梁素海地处北方干旱区,一年内温差较大,藻类的生长、有机物的合成均受到明显影响,这些因素均可能导致重金属元素浓度时间分布特征的改变。

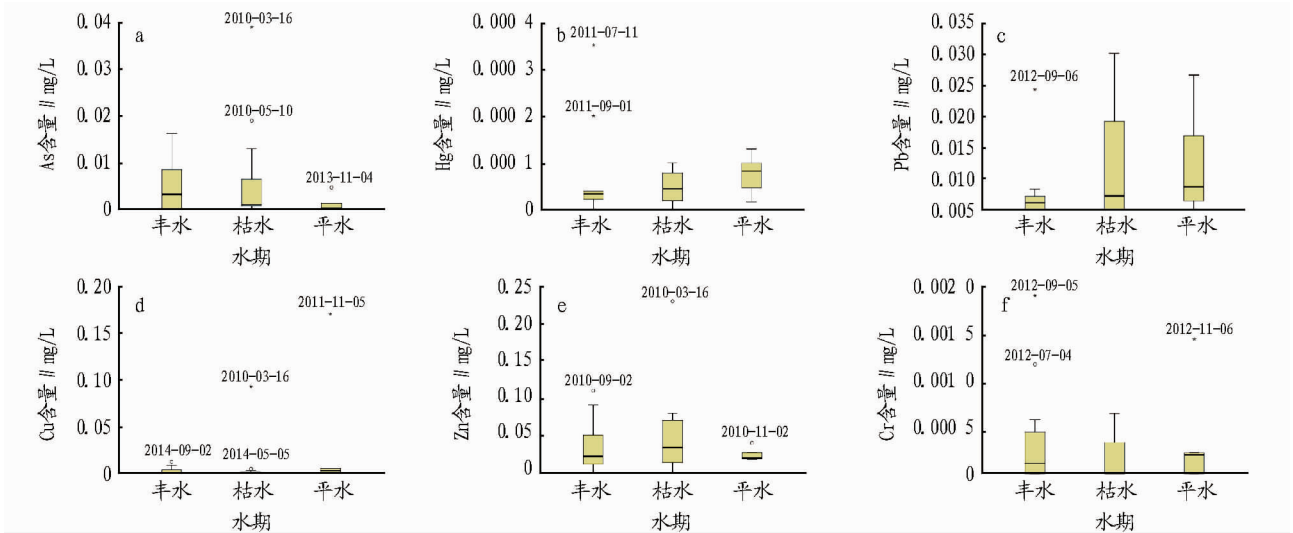


图4 不同水期乌梁素海水体中重金属分布特征

2.3 乌梁素海水体中重金属可能的来源 对乌梁素海水体中重金属元素进行主成分分析,用较少的综合指标综合存在于各变量中的信息。由表 3 可知,前 4 个主成分对大多数变量的信息给出了较充分的概括,可以解释总方差变异的 67.532%。从各因子与原始变量的关系来看,第 1 个因子(Factor 1)基本反映了高锰酸盐指数、As,其负荷分别为 0.731、0.819,其他变量的信息在第 1 个因子上所占的负荷很少;第 2 个因子(Factor 2)基本反映了 Pb 和 Cr 的信息,因子负荷分别为 0.676、0.778,其他变量的信息在第 2 个因子上也表现出较小的负荷;第 3 个因子(Factor 3)基本反映 pH 特征,其负荷分别为 0.727;第 4 个因子(Factor 4)无明显得分较高水质因子(表 4)。这说明上述因子之间是密切相关的,pH 对上述因子的影响较大。剩余重金属因子所反映的信息在前 4 个因子中没有提取出来。

表 3 乌梁素海水体中各水质因子主成分分析			
主成分	合计初始特征值	方差贡献率/%	累计方差贡献率/%
1	1.720	21.503	21.503
2	1.533	19.166	40.669
3	1.145	14.313	54.982
4	1.004	12.550	67.532
5	0.908	11.347	78.879
6	0.743	9.292	88.171
7	0.589	7.365	95.536
8	0.357	4.464	100.000

表 4 乌梁素海水体中各水质因子主成分分析得分矩阵				
水质因子	主成分			
	1	2	3	4
pH	0.133	-0.092	0.727	-0.418
高锰酸盐指数	0.731	-0.099	0.128	0.247
As	0.819	0.040	-0.105	-0.267
Hg	-0.086	-0.600	0.088	0.556
Pb	-0.293	0.676	0.128	0.391
Cu	0.219	-0.094	-0.725	-0.073
Zn	0.593	0.285	0.178	0.469
Cr	0.063	0.778	-0.089	-0.097

采用前两个主成分为坐标轴作图(图 5),可以更好地反映各个变量在前两个主成分轴上的分布情况,图中各点在 X 轴和 Y 轴上的投影分别代表各个变量在 Factor 1 和 Factor 2 的贡献率。由图 5 可知,Cu、pH 相对位于原点附近,表明其在这两个轴上的投影都较小,这些变量所解释的方差也较小。同时,各水质因子对 X 轴和 Y 轴的贡献率均不同,如 Cr 和 Pb 对 Y 轴的贡献率较高,As、高锰酸盐指数在 X 轴方向有较高的贡献率。这可以推断出,相同样点中不同水质因子受到的影响差异也比较明显,距离原点较远的因子受到的影响较大,距离远点较近的因子受到的影响较小。从目前关于水体中重金属输入的研究结论来看,非点源的重金属输入主要由人为活动如农田耕作、畜牧养殖等引起,且输入贡献较大。乌梁素海湿地处于河套灌区排灌系统末端,属于典型灌区湖泊,接受来自于流域内的农业面源污染,研究表明制造化肥使用的工业硫酸、磷矿石及各类有机质中含有 Cd、Pb、Hg 等

重金属元素,化肥流失所携带的重金属流入湖泊,致使水体中重金属含量增加。此外,流域内矿产资源丰富,工业废水排入也会造成乌梁素海水环境重金属的富集与污染。F1 矩阵中包含的高锰酸盐指数与 As 表明工业废水对于乌梁素海水体有明显影响;F2 矩阵中包含部分重金属与 F1 矩阵中确定的主成分有关,表明该重金属有部分源自 F1 矩阵所确定的污染源。在实地调查中发现,出口区周围 5 km 范围内有分散分布的居民区与养殖户,说明生活污水与养殖废水有可能是除灌区农田退水及工业源之外的重要污染源。

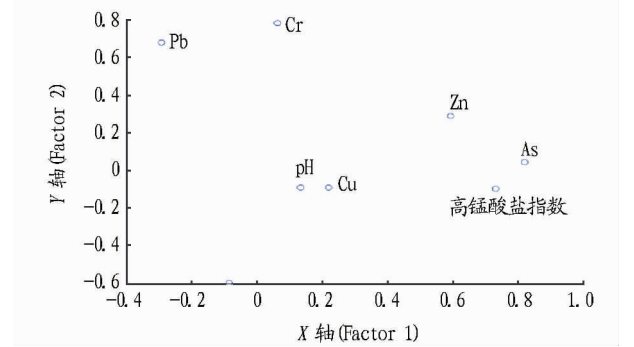


图 5 主成分水质因子分布

3 结论

(1)参照《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)中Ⅲ类水体标准,乌梁素海水体中各样点在采样时间段内 Hg 及 Pb 均出现超标现象。

(2)非参数检验结果表明,不同的湖体分区重金属含量无显著差异,不同时间段内 As、Hg、Pb、Zn 和 Cr 的含量存在显著差异。

(3)主成分分析显示,河套灌区农田面源污染、上游工业污水及周边生活污水为影响乌梁素海水体中重金属含量的 3 个主要因素。

参考文献

[1] 韩茹茹,周北海,李楠,等. 基于系统水平的湖泊流域生态风险评估[J]. 环境科学研究,2015,28(7):1122-1129.

[2] 孔明,彭福全,张毅敏,等. 环巢湖流域表层沉积物重金属赋存特征及潜在生态风险评价[J]. 中国环境科学,2015,35(6):1863-1871.

[3] 常旭,马迎群,杨晨晨,等. 大辽河主要污染源重金属特征及污染评价[J]. 环境污染与防治,2015,37(5):32-38.

[4] 张兆永,吉力力·阿不都外力,姜逢清. 艾比湖流域大气降尘重金属的污染与健康风险[J]. 中国环境科学,2015,35(6):1645-1653.

[5] 刘红磊,李立青,尹澄清. 人为活动对城市湖泊沉积物重金属污染的影响——以武汉墨水湖为例[J]. 生态毒理学报,2007,(2)3:346-350.

[6] 彭勃,彭加喜,孙凯峰. 大亚湾及邻近海域重金属污染的研究进展[J]. 生态科学,2015,34(3):170-180.

[7] 唐阵武,程家丽,岳勇,等. 武汉典型湖泊沉积物中重金属累积特征及其环境风险[J]. 湖泊科学,2009,21(1):61-68.

[8] 白莉,王中良,刘小龙,等. 太湖优势水生植物对重金属的富集与响应[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2015,45(1):1508-1522.

[9] 侯浩波,刘柳,周旻,等. 河道底泥重金属浸出毒性分析及其固化/稳定化效果[J]. 环境工程学报,2015,9(7):3338-3344.

[10] 张颖,周军,张宝杰,等. 松花江表层沉积物有毒重金属污染评价[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2015,42(6):113-118.

[11] 秦延文,曹伟,马迎群,等. “引江济太”河段重金属在水体、悬浮颗粒物及表层沉积物中的含量特征研究及标准化分析[J]. 环境污染与防治,2015,37(6):5-9.

[12] 秦雷,解东昊,朱卫红,等. 图们江流域河岸带土壤重金属污染特征研究[J]. 干旱区资源与环境,2015,29(8):120-125.

茶、弘扬潮州凤凰茶文化尤为重要,在一定程度上可以提高潮州凤凰茶乃至潮州的知名度,促进地方经济发展。

5.3 有利于提升教师的教学素养 教师在常规授课中常常依托教科书与教辅材料,但由于校本课程与国家规定课程不同,在校本课程的开发过程、特别是在校本教材编写的过程中,需要直接参与知识整理,这对教师的自身专业知识提出了更高的要求,教师必须不断充实自身的专业知识。因此,教师对校本课程开发的积极参与有利于教师专业知识的不断更新^[6]。另外,还要捕捉到学生的兴趣点、制定合理的教学目标、选择生动的教学内容、实施教学手段、教学评价等细节进行规划,这一过程即是教师教学技能进步的过程。

教师教学观念的更新、专业知识的积淀和教学技能的进步都是教师在校本课程开发过程中自身教学素养提升的表现。由于教师是校本课程开发和校本教材编写的主体,校本课程开发程度如何、效果怎样都与教师的参与和重视程度有着密切联系。教师在课程开发的过程中将会受到多方面的教育洗礼,既包括观念领域,又包括专业知识和教学技能领域,这些都有利于教师教学素养的提高,一定程度上提高了教师对乡土文化课程开发的驾驭能力、提升了教师的科研意识素养和团队协作能力。

5.4 为社会普及茶文化知识 全世界目前有 50 多个国家种植茶树,150 多个国家和地区近 30 亿人饮茶。在潮汕地区,几乎每个家庭都有饮茶的习惯,茶已经成为潮汕人生活中不可缺少的一部分^[9]。笔者在大量已有研究的基础上,提出研究新思路,编写出的教材——《潮州凤凰茶》在一定程度

上可以弘扬潮州凤凰茶文化,提高潮州凤凰茶乃至潮州的知名度,促进地方经济发展。

课题先在宏观上对茶的种类、功效等做出介绍,然后具体到潮州凤凰茶的各方面相关信息,包括凤凰茶史、凤凰茶的生物学特征、凤凰茶的栽培与管理、凤凰茶的加工和销售、潮汕地区的茶文化等方面内容,最后总揽潮汕茶文化,旨在提升凤凰茶在地方独具一格、影响深远的地位。

6 结语

为了让人们更全面地了解凤凰茶、喜欢凤凰茶、将凤凰茶的传奇继续演绎下去,笔者研究开发了潮州凤凰茶校本课程教材,以期使学生从凤凰茶的茶史、生物学特性、栽培、加工以及销售、潮汕地区茶文化等方面认识凤凰茶、喜爱凤凰茶,并且为推进素质教育做了积极尝试,有利于增强学生的乡土意识和对茶的热爱、提高课题组的科研能力,为凤凰茶及其文化的宣传提供借鉴。

参考文献

- [1] 教育部文件. 教基[2001]17 号. 基础教育课程改革纲要(试行)[A]. 2001.
- [2] 陈香白. 中国茶文化[M]. 太原:山西人民出版社,2002.
- [3] 陈镜雄,徐少娜. 潮汕工夫茶话[M]. 汕头:汕头大学出版社,1994.
- [4] 黄柏梓. 中国凤凰茶[M]. 凤凰茶叶专业协会,2004
- [5] 潘根生. 茶叶大全[M]. 北京:中国农业出版社,2001.
- [6] 邱陶瑞. 潮州茶叶[M]. 广州:广东科技出版社,2009.
- [7] 陈香白. 潮州工夫茶·中国茶道的集中体现[M]. 汕头:汕头大学出版社,1997.
- [8] 许世华,曹军,谭会恒. 关于校本教材建设的几点思考[J]. 高教论坛,2012(3):49-51.
- [9] 陈文华. 中国茶文化学[M]. 北京:中国农业版社,2006.
- [13] 张军方,冯新斌,闫海鱼. 夜郎湖水库水体不同形态汞的时空分布[J]. 生态学杂志,2011,30(5):969-975.
- [14] 付新峰,谷晓伟,刘晓岩,等. 乌梁素海生态功能定位初步分析[J]. 人民黄河,2008,30(10):61-62.
- [15] 李兴,李畅游,李卫平,等. 内蒙古乌梁素海不同形态氮的时空分布[J]. 湖泊科学,2009,21(6):885-890.
- [16] 王艳,黄永梅,于长水,等. 基于 MODIS 数据的 2000-2010 年乌梁素海“黄苔”时空变化[J]. 湖泊科学,2012,24(4):519-527.
- [17] 刘振英,李亚威,李俊峰,等. 乌梁素海流域农田面源污染研究[J]. 农业环境科学学报,2007,26(1):41-44.
- [18] 杨敏,张晟,刘朔孺. 草街水库蓄水后嘉陵江浮游植物群落特征及水质评价[J]. 环境科学,2015,36(7):2480-2486.
- [19] HOLT C, YAN N D, 李佩珍,等. 1971~2000 年间安大略省基拉尼公园里的甲壳类浮游动物群落从酸化水体中得到恢复:pH6 作为恢复的目标[J]. AMBIO-人类环境杂志,2003,32(3):203-209.
- [20] 赵胜男,史小红,李畅游,等. 乌梁素海水体汞的分布特征及污染风险评估[J]. 湖泊科学,2015,26(2):221-227.
- [21] NIU H Y, DENG W J, WU Q H, et al. Potential toxic risk of heavy metals from sediment of the Pearl River in South China[J]. Journal of environmental sciences, 2009, 21(8):1053-1058.
- [22] 赵胜男,李畅游,史小红,等. 乌梁素海沉积物重金属生物活性及环境污染评估[J]. 生态环境学报,2013,22(3):481-489.

(上接第 379 页)