

Analysis of Water Quality Change Process and Treatment Situation of Arsenic Pollution in Yang Zong Hai

Qian Ma, Fengfeng Guo

School of Tourism and Geographical Science, Yunnan Normal University, Kunming Yunnan
Email: 1569523294@qq.com

Received: Jan. 8th, 2018; accepted: Jan. 19th, 2018; published: Jan. 26th, 2018

Abstract

Water with high arsenic content is very harmful to ecology and human health. In 2008, after the arsenic pollution event occurred, the water quality changed from class II water to class V water. This paper analyzes the water quality changes in the Yang Zong Hai over the years, and summarizes the sources and treatment of arsenic pollution. The remediation technology of arsenic pollution in water is emphasized, and the recovery of arsenic pollution is summarized, so as to provide the basis for the protection and treatment of Yang Zong Hai.

Keywords

Yang Zong Hai, Arsenic Pollution, Treatment, Water Quality Change

阳宗海砷污染水质变化过程及治理概况分析

马 欠, 郭峰峰

云南师范大学旅游与地理科学学院, 云南 昆明
Email: 1569523294@qq.com

收稿日期: 2018年1月8日; 录用日期: 2018年1月19日; 发布日期: 2018年1月26日

摘 要

高砷含量的水体对于生态和人体健康的危害是非常大的。2008年阳宗海出现砷污染事件以后, 阳宗海水从II类水质变为V类水质。本文分析了阳宗海多年来水质变化情况, 综述阳宗海砷污染来源、治理概况, 重点阐述了目前水体砷污染修复技术, 总结阳宗海砷污染恢复情况, 以期对阳宗海的保护和治理

提供依据。

关键词

阳宗海, 砷污染, 治理, 水质变化

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 绪论

1.1. 引言

我国湖泊的数量众多, 类型也是多样的。根据 1976~1977 年统计, 我国湖泊大小共计有 24,880 个, 总面积达 83,400 km², 其中面积大于 1 km² 的湖泊有 2848 个, 其面积为 80,645 km², 面积小于 1 km² 的小型湖泊 22,032 个, 其面积为 2755 km² [1] [2] [3]。根据世界气象组织(WMO)和联合国教科文组织(UNESCO)的《INTERNATIONAL GLOSSARY OF HYDROLOGY》(国际水文学名词术语, 第三版, 2012 年)有关水资源的定义认为: 水资源是指可以被利用或有可能被利用的水源, 这个水源应具有足够的数量和合适的质量, 并满足某一地方在一段时间内具体利用的需求。随着经济的迅速发展和人口的增长, 人们制造大量的废弃物投入水中以及对湖泊资源的不合理开发利用, 我国湖泊的污染正日益加剧。根据金相灿[4]研究表明我国主要湖泊现状与趋势是湖泊水质下降, 部分湖泊水质超 V 类; 湖泊底泥污染严重, 成为水质改善重要障碍; 生物多样性受到威胁, 部分湖泊生物多样性下降; 水生植物被严重退化, 覆盖度下降; 湖滨湿地受到侵占与破坏, 湖泊生存空间被蚕食。

根据王振华[5]等, 2008 年阳宗海水体砷浓度持续不断上升, 6 月份砷浓度超过 III 类水质的标准, 7 月份超过 V 类水标准, 到 9 月份阳宗海湖水砷浓度监测值高达 0.128 mg/L 超过地表水环境 V 类水标准限制。10 月 1 日砷浓度最高值达到 0.134 mg/L, 随后成缓慢下降趋势, 在 2007 年以前, 湖水的砷浓度均值还不到 0.006 mg/L。阳宗海“三禁”实施, 禁止饮用阳宗海的水、禁止在阳宗海游泳、禁止捕捞阳宗海的水产品, 阳宗海的水至此失去饮用功能, 严重影响了当地居民的生活和经济收入。

1.2. 研究区概况

根据张玉玺等[6], 阳宗海地理位置 E (102°59'~103°02'), N (24°51'~24°58')是云南九大湖泊之一, 为地质塌陷形成的湖。湖面成纺锤性, 东西宽 2.5 km, 南北长 12.7 km, 湖面面积为 31.9 km² 以后(水位 1700 m), 海岸线长 32.3 km, 流域面积 192 km²。阳宗海的平均水深大约为 20 m, 最深水 29.7 m, 蓄水量为 6.04 亿 m³, 换水周期 13a 左右[7] [8]。根据邓丽仙[9], 阳宗海湖泊 2008 年以前水质监测点多年的观测, 多年平均水质为 III 类水, 营养化程度为中营养化。阳宗海主要入湖河流在流域南部, 有阳宗大河、石寨河、七星河和鲁溪河等, 1978 年开始从阳宗海北部摆夷河引水入湖。明代洪武年间人工开凿的汤池渠是阳宗海唯一的出口河道, 渠长约 3.5 km, 最终汇入南盘江。图 1 为研究区示意图。

1.3. 砷介绍

根据张磊等[10]砷是自然界普遍存在的一种元素, 有多种存在形态。在空气、土壤、沉积物、水中、

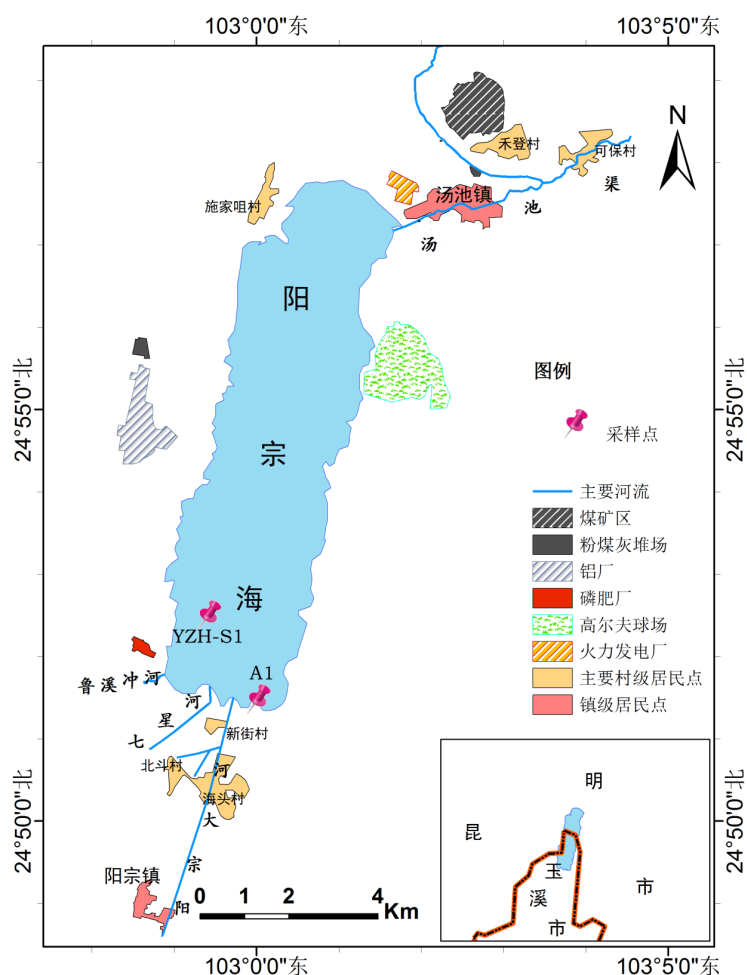


Figure 1. Map of study sites
图 1. 研究区示意图

以及陆生植物中砷存在主要以砷酸盐(AsV)、亚砷酸盐(AsIII)、一甲基砷酸盐(MMA)、二甲砷酸盐(DMA)。在海产品中则以砷甜菜碱(AsB)和砷胆碱(AsC)以及更为复杂的砷化合物的形式存在。苑春刚等[11]不同形态的砷其环境毒理学性质相差迥异,在环境和生物体中存在的砷化合物形态有 50 多种。杨芬等[12]环境中的砷主要以(-III、0、III、V)四种价态存在,主要以无机价态的 As(III)和 As(V)存在,有机砷包括一甲基砷(MMA)、二甲基砷(DMA)、三甲基砷(TMA)。黄清辉等[13]水环境砷的形态很多,主要包括亚砷酸盐(AsIII)、砷酸盐(AsV)、一甲基砷酸盐(MMA)、二甲砷酸盐(DMA)等等,不同形态砷的生物毒性差异很大。

魏茂琼等[14] [15] [16]砷是毒性很强的非金属元素,有几种常见的形态,亚砷酸盐(AsIII)、砷酸盐(AsV)、一甲基砷酸盐(MMA)、二甲砷酸盐(DMA)。以砷化合物 LD50 半致死来计算,按它们的毒性高低排序,依次为无基砷、一甲基砷(MMA)、二甲基砷(DMA)、砷胆碱(AsC)砷甜菜碱(AsB)。徐艳等[17] [18]在天然环境中,影响砷存在的形态的主要因素有:PH 值、温度、氧化还原电位、浮游颗粒组分与数量、浓度,水中存在的有机物质类。砷在物理形态上可分为溶解态和颗粒态。溶解态的砷主要以 H_3AsO_3 、 $H_2AsO_3^-$ 、 $H_2AsO_4^-$ 、 $HAsO_4^{2-}$ 、 AsO_4^{3-} 等形式存在,颗粒态的砷则主要存在于金属化合物、粘土颗粒和矿物吸附物或难溶物。

1.4. 砷污染现状及危害

1.4.1. 国外砷污染现状

根据朱家佑[19]等砷污染已是全球性的问题, 亚洲是砷污染最为严重的地区之一。目前, 世界上砷污染主要的国家有孟加拉国、印度和中国, 这些国家以地下水砷污染为主。孟加拉的东部和西部的饮用水出现了高砷水平, 超过 4000 万人暴露在 50 ppb 砷环境中。根据联合国粮农组织农业及消费者保护部地下水, 世界上砷污染最严重的地区为孟加拉和印度梅克纳—布拉马普特拉河的大部分流域, 有大约 5 亿人面临砷的威胁。在澳大利亚、美国、加拿大、阿根廷等国家也出现了严重的环境砷污染问题[18] [20] [21]。

根据陈琴琴[22]世界各国都对的排放制订了严格的排放标准(见表 1)。在饮用水方面, 中国制定的标准和美国、日本、欧盟相同, 在大气方面, 中国和欧盟的砷污染排放浓度进行限制, 中国 2016 年才开始执行, 在土壤方面, 我国制定标准都高于日本和美国。世界卫生组织(WHO)将居民饮用水标准中总砷含量标准规定为 10 $\mu\text{g/L}$, 我国 2006 年也将生活饮用水标准定位 10 $\mu\text{g/L}$ 。

1.4.2. 国内砷污染概况

根据梁鸿[23]世界砷资源分布不均, 70%的砷矿分布在中国(397.7 万吨)。根据肖细元的研究表明中国砷矿资源分布也不均匀, 呈西南多, 东北少的趋势, 一般砷矿主要集中在湖南、广西、云南等地, 三省砷总探明储量约占全国探明储量的 69%。

根据研究报告[24]显示(Science, 2013), 我国的新疆、内蒙古、甘肃、湖南、云南、山东和河南等地都是砷污染的高危地区, 砷含量超过 10 $\mu\text{g/L}$ 的地区总面积估计在 58 万 km^2 左右, 近 2000 万人生活在砷污染高危地区。根据金雪莲[25]研究表明, 近几年, 我国水体砷污染呈现出集中和多发的趋势, 许多江河湖泊受到不同程度的砷污染, 大部分河流湖泊中溶解态的砷的浓度远远超过世界淡水中溶解态砷的平均水平, 而根据(Matschullat, 2000) [26]世界淡水中溶解态砷的平均浓度为 1.0×10^{-4} mg/L 。

1.4.3. 砷污染的危害和特点

砷广泛存在于自然界中, 在土壤、水体、矿物、动植物中都能检测出微量的砷, 正常的人体中也能检测出微量的砷。砷不溶于水, 没有毒性, 但砷化物具有一定的毒性, 特别是三氧化二砷, 毒性很强, 又名砒霜。根据华凌[27]砷进入人体内会被吸收, 它会破坏细胞的氧化还原能力, 影响细胞的正常代谢, 使组织受到损伤和机体障碍, 可直接引起中毒身亡。砷也是一种致癌物质, 也是致癌、致畸致突变因子, 对动物有致畸作用。根据李玉玲[28]砷在正常人体内的含量不会大于 100 mg , 但是对于生活在不同区域的人体内砷含量可能会很大, 一般认为人体中砷的总量为 14~21 mg , 平均浓度为 0.2~0.3 ppm 。然而, 如果饮用含砷的水, 或者食用含砷的水产品或者蔬菜会通过食物链富集会则导致砷的慢性中毒或者致癌。由砷引发的中毒案例很多, 如在 1900 年时, 英国的曼彻斯特城市发生了饮用含砷葡萄糖发酵的啤酒的中毒的事件, 导致 1000 人死亡, 7000 多人急性中毒。在 1955 年时日本森永奶粉中毒事件也是典型的砷中毒事件, 因砷污染造成 130 人死亡, 1200 多人中毒。

Table 1. Comparison of arsenic emission standards in countries

表 1. 各国砷排放标准比较

中国	美国	欧盟	日本
饮用水标准	0.01 mg/L	0.01 mg/L	0.01 mg/L
大气标准	0.006 $\mu\text{g/L}$	0.01 mg/L	6 ng/L
土壤标准	15~40 mg/L	0.05 mg/L	0.01 mg/L

近几十年来, 随着工农业大发展, 广泛应用于有色金属、色素、燃料、玻璃及农药等, 由此引起的环境 砷污染如大气砷污染、土壤砷污染、食物砷污染、水体砷污染所造成严重的危害[29]。阳宗海砷污染就属于水体污染, 给当地居民造成严重危害, 也使阳宗海丧失了一系列功能。根据任婧研究水体砷污染不仅给人类带来严重的危害, 对动植物也带来很大的危害。植物生长离不开砷元素, 但是砷元素浓度过高时, 会抑制植物的生长。因此, 分析阳宗海砷污染的危害及其砷污染治理后水质变化情况, 对于阳宗海以后的治理和防治有着现实意义。

根据徐艳[17]砷污染具有特点如: 污染隐蔽性(受污染的水体无色、无畏、透明不变, 无法用肉眼识别)、危害广泛性(对水陆生植物均有危害)、人体高危性(生物耐受性小, 毒性大)、传播流动性(砷污染能以水流或者风流等方式向四周扩散, 也能富集在土壤中, 对外界环境造成持续严重的污染)。所以阳宗海砷污染治理上具有一定的困难性, 且容易出现二次污染。

1.5. 水体中砷的来源和存在形式

根据洪雪花[30]研究表明砷污染的主要来源是开采、冶炼、焙烧含砷矿石, 以及生产含砷产品过程中产生含砷的废气、废液、废渣, 以及其他生产生活使用砷过程中造成的砷污染。根据李妍丽水体环境中的砷来源包括人为来源(工业“三废”、农业生产活动等)和自然来源(自然界的火山喷发、岩石风化等现象)两方面。而引起水环境砷污染的来源主要是人为来源, 排入水体中的废水中砷的含量和形态取决于废水的来源和种类。由于砷主要用于冶金工业和半导体工业、木材防腐剂、农药、饲料添加剂, 所以重金属废水是水环境的主要砷污染来源。

根据徐艳[17]研究表明在水环境中, 影响砷的形态的主要因素有: 温度、PH 值、氧化还原电位、水中存在的有机物种类、悬浮颗粒组分与数量、浓度。根据环境保护部环境应急与事故调查中心, 在物理形态上, 砷的存在形态可分为颗粒态和溶解态。颗粒态的砷则主要存在于金属化合物、黏土颗粒和矿物吸附物或难溶物中, 溶解态的砷形态主要有 H_3AsO_3 、 H_2AsO_3^- 、 H_2AsO_4^- 、 HAsO_4^{2-} 、 AsO_4^{3-} 。

2. 阳宗海砷污染介绍

2.1. 砷污染事件

湖泊是生态环境的重要组成部分, 随着城市化和工农业的持续发展, 持续不断的生活污水和工业废水直接或间接排入湖泊中, 加之湖泊资源的过度开发利用, 湖泊污染越来越严重, 各种环境灾害频频发生, 直接危及居民饮用水安全与身体健康, 同时也威胁着区域经济的可持续发展。根据王振华等[5]阳宗海水体砷浓度持续上升, 超过III类水质标准是在 6 月份, 砷浓度超过 V 类水标准是在 7 月份, 到 9 月时, 阳宗海湖水浓度监测值高达 0.128 mg/L, 其超过地表水环境标准 V 类水标准限制。砷浓度最高值 0.134 mg/L 出现在 10 月 1 日, 随后成缓慢下降趋势, 而阳宗海水质在 2007 年以前, 湖水砷浓度均值还不到 0.006 mg/L。根据徐永梅[31]等 2008 年 6 月砷浓度均值达到 0.055 mg/L, 超过 II 类水标准 0.05 mg/L 的标准; 到 2008 年 8 月砷浓度平均值达到 0.106 mg/L, 超过 V 类水 0.10 mg/L 的标准, 2008 年 10 月达到 0.128 mg/L 的标准, 超过 V 类水标准, 最高值达到 0.134 mg/L, 随后开始不稳定的缓慢下降。齐剑英[32]等研究表明, 2008 年 10 月湖水及沉积物中, As 的含量分别介于 130~190 $\mu\text{g/L}$ 及 54.86~193.29 mg/kg, 环境风险严重。

韩瑞萍等[29]随着“三禁”的实施, 禁止饮用阳宗海的水、禁止在阳宗海游泳、禁止捕捞阳宗海的水产品, 至此阳宗海的水失去饮用的功能, 严重影响当地居民的生活和经济收入, 影响了阳宗海旅游发展, 影响房地产的发展。徐永梅[31]阳宗海遭受砷污染后, 浮游植物也发生明显的种群和数量的变化, 阳宗海砷污染之后对浮游植物产生巨大的影响。浮游植物影响浮游动物, 浮游动物影响鱼类, 砷属于重金属会在植物或者动物身体里富集, 通过食物链, 危害人的身体健康。阳宗海砷污染造成沿湖居民 2.6 万余人

的饮用水源取水中断, 致使阳宗海饮用、水产品养殖等功能丧失。根据徐元锋[33], 阳宗海砷污染涉及宜良县、呈贡县和澄江县的 1 个县城自来水厂、4 个自然村和 4 家企业, 直接危及 26,596 人的饮水安全。

2.2. 砷污染来源

根据李发荣等[34], 阳宗海砷污染来源于南岸地下多个上升出露泉眼, 阳宗海湖泊的汇水区分布着各类企业工业, 经调查汇流区阳宗海发电厂、磷肥厂、云南铝厂、柏联温泉等企业, 对这些企业进行检测, 根据表 2 结果显示, 磷肥厂、柏联温泉的废水含有砷污染物, 其中, 锦业磷肥厂循环池废水浓度高达 62.86 mg/L。

根据王世雄[35]等, 位于阳宗海湖面西南角坡上的锦业工贸公司化其工厂违规排放高砷废水是造成污染事件的主要元凶。根据张玉玺研究表明, 阳宗海水体与沉积物中砷储存总量为 70.65 t, 人为贡献率占砷总储量的 82.68%, 其中主要来源为南岸的磷肥厂, 同时, 北岸的火电厂, 温泉和东岸的高尔夫球场也对阳宗海的砷累积有所贡献。齐剑英[32]研究表明, 锦业工贸公司位于阳宗海的西南方, 距离阳宗海直线距离为 250 米, 该工贸公司生产硫酸的原料是 As 含量高的矿石。大量砷含量高的废水渗透进入地下水, 地下水被污染后从泉眼冒流入阳宗海, 由于阳宗海地区地质多为页岩结构, 该泉眼不是唯一地下排泄点, 该区地质单元的地下水都可以通过地下泉眼和渗流进入阳宗海。此外, 火电厂也对阳宗海水体砷污染有一定的贡献率, 这与张玉玺的研究一致。

2.3. 砷污染治理措施

根据徐艳总结以及目前文献、论文报道的试验研究结果, 含砷废水的处理方法可分为沉淀法、絮凝法、吸附法、氧化法、电解法、离子交换法、生物化法等, 作如下简单对比, 如表 3 [25] [36] [37] [38] [39]

根据王世雄[35], 阳宗海砷污染之后采用的除砷方法是铁盐絮凝法, 因为阳宗海砷污染水体容量大, 砷浓度低, 所以才 FeCl₃ 絮凝法, 具有廉价、安全、高效的优点。而在对阳宗海实际砷工程化治理期间, 2009 年 11 月~2010 年 9 月, 水体砷浓度从 0.117 mg/L 下降到 0.021 mg/L, 并可持续达到 II~III 类水标准 (<0.05 mg/L), 总除砷率达到 82.05%。水体中的砷沉降到沉积物中。沉积物中的砷绝大部分以残渣的形式被固定在沉积物中, 生态风险很低。王振华[5]研究表明阳宗海水、底泥、鱼、虾、水生植物砷含量都处于较高水平, 对周围环境及群众生活造成很大的威胁; 阳宗海湖水砷浓度经历了先升高然后降低, 再到平稳变化的过程, 底泥砷含量迅速升高后缓慢下降, 砷在湖水和底泥间交换, 说明其风险还在存在, 这与王世雄[35]得出的结论有所不同, 是因为所采样的时间不同, 也是絮凝法实施前后采样, 所以结论有所不同。李智圆[40]等研究表明, 阳宗海表层沉积物砷含量分布不均匀, 随深度的增加有所降低。沉积物砷污染程度相对较低, 潜在风险很小。各层沉积物中稳定性高残渣态砷含量(14.12~18.38 mg/kg)及比例(93.47%~97.30%)均较高, 所以, 沉积物中砷较稳定, 不易溶出形成二次污染。

Table 2. Statistical table of wastewater monitoring results of major sewage enterprises on the coast of yangzong
表 2. 阳宗海岸边主要排污企业废水监测结果统计表 mg/L

排污企业	pH 值	氟化物	总磷	砷	氨氮
云南澄江锦业公司循环水池	3.7	124	204	62.86	161.7
云南澄江锦业公司储水池	5.86	67.8	60.2	3.306	32.25
云南凤鸣磷肥厂循环水池	8.75	7.58	0.146	0.003	0.27
阳宗海发电厂冲渣回水池	8.6	5.51	0.715	0.008	10.49
云南铝业公司污水处理站回水池	8.18	9.61	0.318	0.037	0.318
柏联温泉 2	---	1.96	---	0.200	---

Table 3. Various arsenic treatment methods
表 3. 各种砷处理方法

处理方法	材料或试剂	优点	缺点
沉淀法	钙沉淀剂, 氢氧化钙 - 氯化铁, 石灰 - 铝盐, 硫酸亚铁 - 苏打等	投资低, 工艺简单, 可扩大规模	需要大量化合物, 最终产物处理上有局限性, 复杂环境难以消除
离子交换法	水合铝氧化物填充多孔树脂, FeCl ₂ 溶液, 用海藻酸珠粒 CaCl ₂ 处理 ₂	可有效地脱除砷	需要进行预处理, 成本比较高且规模小
膜分离法	超滤、滤镜、高分子滤膜、纳米过滤和反渗透等	无二次污染、节能, 常温操作, 砷可被取出	使用和维修成本高, 需要大量回流水, 规模小
电解法	以铝或铁作为阴极和阳极生成含砷的氢氧化物等	工艺比较简单, 砷可被取出	生成浮渣易造成二次污染, 成本较高
生化法	微生物、植物等	较成熟、经济、无二次污染	固定资本高
吸附法	氢氧化铁、氢氧化铝、活性铁土矿、中国粘土、活性炭、长石、粉煤灰、赤铁矿、海泡石	简单易行、较为成熟、绿色环保、成本可控	进行预氧化、吸附剂再生、回收上的问题
絮凝法	铁盐絮凝剂、铝盐絮凝剂等	无需预氧化, 吸收效果好, 成本低	目前尚未证明是否有解吸现象出现, 回收问题也为解决

阳宗海砷污染治理用的是传统的混凝沉淀法, 水经混凝沉淀后, 可以降低水中的砷含量, 阳宗海治理选用的铁盐混凝剂, 铁盐除砷效果高于铝盐。根据潘小军[41], 以氯化铁或硫酸铁为好, 此法最适宜被污染的地面水源(搅拌 - 沉淀 - 过滤)。根据胡宏韬等[42], 生物技术是环境污染中一种有效的技术方法, 与其他传统处理方法相比具有治理效果好, 运行费用低, 无二次污染等特点。徐海若[43]研究表明有些细菌可在较高的浓度的砷酸盐或亚砷酸盐环境中生长。细菌之所以能在高砷环境生活是由于细菌细胞经诱导后, 细菌能够减少砷化物在体内的积累, 即能够专一性的排出砷化物, 从而能够保证使磷酸盐专一系统正常的发挥作用, 避免细菌出现“磷酸盐饥饿”症状, 确保细菌自身免于毒害作用。根据潘小军[41], 微生物中硫酸盐还原细菌会消耗硫酸盐并将硫酸盐还原成硫化物, 然后硫化物与沉淀的砷发生反应, 利用此原理去除水中的砷。目前去除砷的方法需昂贵的硬件, 原理是纳米级的磁铁矿颗粒对砷具有很好的吸附能力, 而且砷一旦吸附就很难分离。

3. 阳宗海砷污染治理变化过程

3.1. 阳宗海砷污染前水质情况

黎尚豪[44]的研究表明, 在 1957 年 7~10 月阳宗海的透明度在 300~600 厘米之间, 8 月底和 10 月初的透明度高于 7 月下旬, 从水生生物的种类和数量上看, 阳宗海的生物较少的是贫营养型。邓丽仙[9]研究表明从 1985~2005 年共 21 年水质资料看, 阳宗海水质总体上没有太大的变化, 水质类别主要在 I~III 之间。除 1989、1998 年的总磷, 1995 年的总氮测量值异常偏高外, 其余年份没有多大变化。溶解氧呈缓慢下降趋势, 氨氮、总氮、总磷等指数呈缓慢上升趋势, 略有富营养化趋势。湖泊水环境由于受到农业生产、工矿及乡镇企业排污、阳宗海电厂及沿湖周边居民生活污水排入湖, 促进藻类繁殖生长, 加速了湖泊富营养化进程, 致使阳宗海 1997~1999 年多次出现大面积“水华”现象, 水质降至 IV 类, 湖泊水呈中、富营养化状态。其自然原因就是阳宗海湖水替换功能差, 沉积的氮、磷等有机物不易降解。

3.2 阳宗海砷污染治理的困难

根据杨常亮[45] [46], 阳宗海在 1992 年以前水质保持在 II 类水标准, 在 1997~1998 年间爆发“水华”

现象, 水质降为 IV 类水质。根据李振宇[47] 2005 年的研究表明, 1997 年阳宗海出现大面积“水华”, 之后采取一系列污染防治措施, 阳宗海水质有所好转, 根据检测, 阳宗海水体水质连续 3 年(2003~2005)保持在地表水(GB3838~2002)II 类水质。从水体富营养化角度分析, 湖水水质处于中营养状态, 仍影响着水体正常功能的稳定性和进一步好转。通过分析 2000~2005 年阳宗海水质检测结果, GB3838~2002《地表水环境质量标准》II 类水标准评价, 2000、2001 年阳宗海水质为 III 类水, 2002~2005 年水质为 II 类水, 与李振宇研究结果一致。2002 年到 2008 年砷污染发生之前, 阳宗海水质一直保持 II 类水质。

阳宗海因为换水周期长, 需要 13 年时间, 所以自身的净化比较缓慢。在对阳宗海进行铁盐絮凝剂进行水中砷沉淀之后, 水质有所改善, 但是砷的总量并没有减少, 而是沉淀到沉积物里面, 随着水环境的改变, 沉积物中的砷的形态和价态也会发生改变, 甚至重新进入水体, 造成二次污染。

3.3. 阳宗海砷污染以后

2008 年阳宗海水体砷浓度不断升高, 6 月份, 超过 III 类水质标准, 7 月份, 阳宗海水体砷浓度超过 V 类水, 到 9 月, 阳宗海湖水浓度监测值高达 0.128 mg/L 的地表水环境标准 V 类水标准限制。砷浓度最高值 0.134 mg/L 出现在 10 月 1 日, 随后成缓慢下降趋势, 而 2007 年以前, 湖水浓度均值还不到 0.006 mg/L。根据韩瑞平[29]阳宗海 2008 年 6 月至 2011 年 6 月, 宜良县阳宗海柳树湾及呈贡县云南铝厂一级泵站水源及末梢监测点, 阳宗海水体砷浓度变化趋势为逐步呈下降趋势, 截止到 2011 年 3 月阳宗海水源监测点砷含量降到地表水环境质量标准 III 类。从图中可以看出从毕建培[48]等 2008 年 10 月~2009 年 4 月, 湖水 As 总量呈不稳定下降趋势, 可能是混凝药剂对湖水的 As 有一定的吸附沉降效果。2009 年 5 月~2010 年 2 月湖水 As 呈不稳定增长, 由于内源污染如周边含 As 地下水补给底泥中的砷的释放, As 出现回升现象。从 2010 年 2 月~2010 年 8 月, 湖水砷总量呈明显下降趋势。

韩瑞萍等柳树湾水源水砷浓度变化趋势为逐步下降, 检测结果在 0.0216~0.128 mg/L 范围之内, 最高值出现在 2009 年 11 月, 超标倍数为 1.6 倍, 最低值出现在 2011 年 3 月, 为 0.0216 mg/L, 符合地表水标准 III 类水要求。

李发荣等[34] 2006 年以前湖泊水体砷浓度年均值均在 0.003 mg/L 以下, 到 2007 年湖泊水体砷浓度略有上升, 2008 年湖泊水体砷浓度迅速上升, 之后随着治理措施的投入, 水体砷的浓度逐年下降, 但 2012 年 10 月阳宗海砷浓度又上升突破 III 类水的限值, 可能是沉降到沉积物中的砷, 又溶解到水中。根据杨常亮[46]尽管湖水中的砷浓度大幅度降低了, 但是砷并没有从湖中消失, 而只是改变了存在形态, 从水中转移到沉积物中。

表来自(李发荣, 2015 年) [34], 按地表水环境质量标准(GB3838H~2002)中 24 项指标检测数据进行分析, 阳宗海水体中超标污染物为砷, 从 2008 年开始出现超标现象, 2008 年超标 0.41 倍, 2009 年超标 0.21 倍, 2010 年超标 0.37 倍。从 2008 年到 2009 年迅速上升, 但到 2009 年之后砷含量迅速下降, 这与阳宗海砷污染治理铁盐絮凝剂沉降有关(表 4)。

4. 问题与建议

阳宗海在 1992 年以前保持着 I~II 类水质, 1997 年出现“水华”现象, 水质下降为 IV 类, 之后经过治理恢复到 II~III 类水质, 到 2008 年后因为重金属砷的污染导致阳宗海水质下降到 V 类水质。经过一系列的治理措施, 到 2013 年水质恢复到 III 类水, 其水中的砷沉降到沉积物中, 砷并没有消失, 只是改变了砷存在的形态, 可能会出现二次污染。

阳宗海的治理是一个漫长的过程, 阳宗海湖水更换周期较长, 需要 13 年, 这本身增加了治理的难度, 而随着社会经济、工业、农业的发展, 其排放的污染物会继续增加, 如果不经治理就排入阳宗海,

Table 4. Water quality of yangzonghai lake in recent years
表 4. 阳宗海湖泊水质近年水质状况检测统计

年份	现状水质类别	Wpi 指数	指标项目与超标倍数	保护类别
2005	二类	30		2
2006	二类	35		2
2007	二类	36		2
2008	IV 类	68	砷(0.41)	2
2009	劣 V 类	104	砷(1.25)	2
2010	IV 类	68	砷(0.37)	2
2011	三类	42		2
2012	IV 类	63	砷(0.16)	2

那么阳宗海的污染程度会继续加剧。所以政府需要全面贯彻落实《云阴阳宗海保护条例》，健全和完善阳宗海托管机制，严格实施水功能区达标率目标考核和重点水污染物限排总量控制制度，加强入湖河道、湖区污染治理，做好阳宗海水质、水生态监督性检测和通报工作，加大社会宣传力度，增强公众环保意识，控制污染源：杜绝锦业工贸公司类似大量砷污染废水的排放，严格监控污染源。

参考文献 (References)

- [1] 王苏民, 窦鸿身. 中国湖泊志[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [2] 施成熙. 中国湖泊概论[M]. 北京: 科学出版社, 1980.
- [3] 王洪道, 顾丁锡, 刘雪芬, 等. 中国湖泊水资源[M]. 北京: 农业出版社, 1987.
- [4] 金相灿. 湖泊富营养化控制理论、方法与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [5] 王振华, 何滨, 潘学军, 等. 云阴阳宗海砷污染水平、变化趋势及风险评估[J]. 中国科学, 2011, 41(3): 556-564.
- [6] 张玉玺, 孙继朝, 向小平, 等. 云阴阳宗海湖底沉积物重金属分布与来源[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(12): 171-175.
- [7] 李妍丽. 微型绿藻对砷污染水体的生物修复研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2012.
- [8] 张玉玺, 孙继朝, 向小平, 等. 阳宗海表层沉积物中的重金属生态风险评估[J]. 水资源保护, 2012, 28(5): 19-24.
- [9] 邓丽仙, 孔桂芬, 杨绍琼, 等. 阳宗海湖泊水质与来水量的关系研究[J]. 水文, 2008, 28(4): 43-46.
- [10] 张磊, 吴永宁, 赵云峰. 不同形态砷化合物稳定性研究和砷形态分析中样品前处理技术[J]. 国外医学: 卫生学分册, 2007, 34(4): 238-244.
- [11] 苑春刚, X. Chris Le. 砷形态分析[J]. 化学进展, 2009, 21(z1): 467-473.
- [12] 杨芬, 韦朝阳, 刘金鑫. 砷形态分析的样品前处理技术研究进展[J]. 环境科学与技术, 2016, 39(10): 79-86.
- [13] 黄清辉, 马志玮, 李建华, 等. 2006 年春季长江口砷形态分析及其生物有效性[J]. 环境科学, 2008, 29(8): 2131-2136.
- [14] 魏茂琼, 刘宏程, 严红梅, 等. 液相色谱 - 原子荧光法测定大米中 4 种砷形态[J]. 食品安全质量检测学报, 2016(9): 3673-3677.
- [15] Kim, J.-Y., Kim, W.-I., Kunhikrishan, A., et al. (2013) Determination of Species in Rice Grains HPLC-JCP-MS. *Food Science and Biotechnology*, **22**, 1509-1513. <https://doi.org/10.1007/s10068-013-0245-z>
- [16] Ahmed, M.K., Shaheen, N., Islam, M.S., et al. (2016) A Comprehensive Assessment of Arsenic in Commonly Consumed Foodstuffs to Evaluate the Potential Health Risk in Bangladesh. *Siron*, **544**, 125-153.
- [17] 徐艳. 以阳宗海砷污染为例对三氯化铁絮凝法除砷工艺的优化[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 云南大学, 2016.
- [18] 环境保护环境应急与事故调查中心. 砷污染应急处理技术[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2010.

- [19] 朱家佑. 砷污染调查报告[EB/OL]. <http://www.docin.com/p-1289742567.html>, 2015-06-16.
- [20] Rodriguez-lado, L., Sun, G., Berg, M., *et al.* (2013) Groundwater Arsenic Contamination throughout China. *Science*, **341**, 866-868. <https://doi.org/10.1126/science.1237484>
- [21] 联合国粮食及农业组织农业及消费者保护部. 孟加拉国面临的砷威胁[EB/OL]. <http://www.fao.org/ag/zh/magazine/0605sp1.htm>, 2006-05.
- [22] 陈琴琴. 中国砷污染排放清单研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京大学, 2003.
- [23] 魏梁鸿, 周文琴. 砷矿资源开发与环境治理[J]. 湖南地质, 1992, 11(3): 259-262.
- [24] Matschullat, J. (2000) Arsenic in the Geosphere: A Review. *Science of the Total Environment*, **249**, 297-312.
- [25] 金雪莲, 任婧, 夏峰. 我国河流湖泊砷污染研究进展[J]. 环境科学导刊, 2012, 31(5): 26-31.
- [26] Mandal, B.K. and Suzuki, K.T. (2002) Aesenic Round the World: A Review. *Talanta*, **58**, 201-235.
- [27] 中央政府门户网站. 铅、砷污染对人们会造成什么危害?[EB/OL]. http://www.gov.cn/fwxx/kp/2006-09/12/content_385289.htm, 2006-09-12.
- [28] 李玉玲, 栗萍, 张英. 砷污染对人体健康的危害及预防措施[J]. 邯郸医学高等专科学校学报, 2003, 16(1): 93-94.
- [29] 崔瑞平. 环境砷污染及其危害[J]. 遵义医学院学报, 1994, 17(3): 255-256.
- [30] 洪雪花, 李作生, 杨春伟. 砷的污染、检测与防治[J]. 云南环境科学, 2006(S1): 3-5.
- [31] 徐永梅. 阳宗海砷浓度与浮游植物变化分析[J]. 环境科学导刊, 2013, 32(5): 62-64.
- [32] 齐剑英, 许振成, 李祥平, 等. 阳宗海水体中砷的形态分布特征及来源研究[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(20): 10789-10792.
- [33] 徐元锋. 云南处理阳宗海砷污染[N]. 人民日报, 2008-10-09.
- [34] 李发荣, 李晓铭, 徐琼, 等. 阳宗海湖泊砷污染来源解析与防治[J]. 环境科学导刊, 2015, 34(5): 27-31.
- [35] 王世雄, 蒋峰芝, 陈景. 铁盐絮凝法对阳宗海湖泊水体的除砷效果及底泥的稳定性考察[J]. 现代地质, 2015(2): 361-369.
- [36] 易求实. 我国饮用水砷污染状况及应对措施[J]. 湖北第二师范学院学报, 2010, 27(8): 23-26.
- [37] 江世强, 葛宪明. 砷及其化合物的水污染治理研究进展[J]. 医学文选, 2005, 23(3): 364-368.
- [38] 杨胜科, 王文科, 张威, 等. 水体系中高砷去除方法探讨[J]. 西北地质, 1999, 32(4): 47-50.
- [39] 冯克亮. 水质砷污染及除砷新技术[J]. 海洋环境科学, 1994, 13(1): 78-81.
- [40] 李智圆, 杨常亮, 李世玉, 等. 砷污染治理后阳宗海沉积物砷的分布与稳定性[J]. 环境科学与技术, 2015, 38(2): 41-47.
- [41] 潘小军, 胡睿, 冯宝香. 试析砷在水环境中的迁移及污染治理方法[J]. 环境与可持续发展, 2015, 40(4): 206-208.
- [42] 胡宏韬, 林学钰, 张兰英, 等. 环境污染治理中的生物技术[J]. 世界地质, 2001, 20(1): 56-61.
- [43] 徐海若, 颜望明. 细菌抗砷特性研究进展[J]. 微生物学通报, 1995, 22(4): 228-231.
- [44] 黎尚豪, 俞文娟, 李广正, 等. 云南高原湖泊调查[J]. 海洋与沼泽, 1963, 5(2): 87-114.
- [45] 杨常亮, 陈建中, 贺彬, 等. 阳宗海总磷环境容量与总磷超标的原因分析[J]. 环境科学导刊, 2008, 27(1): 44-46.
- [46] 杨常亮, 陈桂明, 李世玉, 等. 阳宗海沉积物中重金属生物有效性评估[J]. 环境工程学报, 2016, 10(3): 1191-1199.
- [47] 李振宇, 孙治. 阳宗海水体特征分析及控制对策初探[J]. 云南环境科学, 2005, 4: 108-111.
- [48] 毕建培, 刘晨, 黎绍佐. 阳宗海砷污染水质变化过程分析[J]. 水质资源保护, 2014, 31(1): 84-89.

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2330-1724，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：ojs@hanspub.org