

# 长江流域上游地区“三磷”污染现状及对策研究

时瑶, 秦延文\*, 马迎群, 赵艳民, 温泉, 曹伟, 乔飞

中国环境科学研究院水环境管理研究室, 北京 100012

**摘要:** 长江流域上游地区是我国“三磷”(磷矿、磷化工企业和磷石膏库)最为集中的区域,总磷污染尤为严重.为保障长江流域水环境安全,支撑长江经济带可持续发展,从分析长江上游“三磷”污染状况出发,剖析总磷污染成因,提出“三磷”污染控制对策建议.结果表明,长江流域上游地区总磷污染成因主要包括:磷矿资源丰富,长期开采对上游水环境产生显著影响;围绕磷矿开采的磷化工产业发展迅速,但管理薄弱导致总磷超标排放;存量磷石膏临河不当处置与堆存,环境污染与安全隐忧大.针对总磷污染成因,按照“重点突出,精准施策”原则,以长江流域上游地区“三磷”集中片区为重点开展综合整治,提出几点对策建议:①重点加强沱江上游德阳段绵远河、石亭江,乌江上游贵州段瓮安河、洋水河和清水江,湖北省宜昌-兴山-神农架一线和钟祥-南漳一线三个片区的磷矿治理;②推动绵远河、石亭江、乌江、香溪河流域等涉磷工业园区/工业集中区的技术改造升级,促进磷化工产业绿色发展;③加强四川省(沱江)、贵州省(乌江)、湖北省(香溪河)等磷石膏堆场密集分布区域的规范化综合管理;④以法规和标准为准绳,加快完善涉磷污染源监管系统.

**关键词:** 长江流域上游地区;“三磷”;污染成因;控制对策

中图分类号: X522

文章编号: 1001-6929(2020)10-2283-07

文献标志码: A

DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2020.05.01

## Pollution Status and Control Strategy of ‘Three Phosphorus’ Pollution in the Upper Reaches of Yangtze River Basin, China

SHI Yao, QIN Yanwen\*, MA Yingqun, ZHAO Yanmin, WEN Quan, CAO Wei, QIAO Fei

Water Environmental Management and Research Center, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China

**Abstract:** The upper reaches of the Yangtze River Basin is the most concentrated area of ‘three phosphorus’ (phosphorous mining, phosphorus chemical industry and phosphogypsum library) in China, which was seriously polluted by total phosphorus (TP). In order to ensure the water environment security of the Yangtze River Basin and support the sustainable development of the Yangtze River Economic Belt, the pollution status of ‘three phosphorus’ and the cause of TP pollution in the upper reaches of Yangtze River were analyzed, and the control strategies of the ‘three phosphorus’ were proposed. In general, there were three reasons that may lead to the high level of TP in the upper reaches of Yangtze River Basin: First, long-term exploitation of phosphorus resources had a significant negative impact on the water environment of the upper reaches of Yangtze River; Second, poor management of the phosphorus chemical industries led to excessive discharge of TP to water environment; Third, the deposit of phosphogypsum was not properly disposed and stockpiled along river, which posed high environmental pollution and safety risks. In order to control the TP pollution in the upper reaches of Yangtze River Basin, comprehensive improvement strategies should be implemented in the ‘three phosphorus’ concentrated areas in the upper reaches of Yangtze River Basin following the principles of ‘focus on the major problems and conduct precise policies’: (1) Strengthen pollution control in the three areas with the highest ‘three phosphorus’ concentrated areas in the upper reaches of the Yangtze River, the Mianyuan River and Shiting River in Deyang section of the upper reaches of Tuojiang River, Weng’an River, Yangshui River and Qingshui River in Guizhou section of the upper reaches of Wujiang River, and the Yichang-Xingshan-Shennongjia line and the Zhongxiang-Nanzhang line in Hubei Province. (2) Promote the technical transformation and upgrading of phosphorous related industrial parks/industrial concentration districts in areas such as Mianyuan River, Shiting River, Wujiang River and Xiangxi River basins, and promote the green development of phosphorous chemical industry. (3) Strengthen the standardized and comprehensive management in the densely distributed areas of

收稿日期: 2019-10-18 修订日期: 2020-04-14

作者简介: 时瑶(1982-),女,山东日照人,工程师,硕士,主要从事水环境科学研究,shiyao0204@163.com.

\* 责任作者,秦延文(1973-),女,山东青岛人,研究员,博士,主要从事水环境科学研究,qinyw@craes.org.cn

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(No.2017ZX07206-001-03);四川省科技项目(No.SCZC328301\_20160004)

Supported by National Major Science and Technology Program for Water Pollution Control and Treatment, China (No.2017ZX07206-001-03); Science & Technology Project of Sichuan Province, China (No.SCZC328301\_20160004)

phosphogypsum storage sites in Sichuan (Tuojiang River), Guizhou (Wujiang River) and Hubei (Xiangxihe River). (4) Seize the key to management regulations and standards, and accelerate the improvement of phosphorus-related pollution source supervision system.

**Keywords:** the upper reaches of Yangtze River Basin; ‘three phosphorus’; pollution causes; control strategy

磷是生物所必需的营养元素之一,同时也是引起水体富营养化的重要限制因子<sup>[1]</sup>. 近年来,磷污染已成为我国水环境质量安全的一个制约因素. 2009—2010年,乌江流域贵州段由于磷矿污染导致死鱼事件不断发生,磷污染逐渐引起人们的广泛重视. 随着总磷污染问题普遍凸显,2011年3月,《地表水环境质量评价办法(试行)》(环办[2011]22号)将总磷指标纳入水质考核评价<sup>[2]</sup>. 2016年《中国环境状况公报》显示,七大流域、浙闽片河流以及西北、西南诸河的监测断面中,总磷超标率为15.1%<sup>[3]</sup>. 据2016年《四川省环境状况公报》<sup>[4]</sup>显示,由于总磷污染,岷江、沱江水系分别有超过35%和80%的监测断面水质劣于GB 3838—2002《地表水环境质量标准》IV类水,总磷污染已成为一个不容忽视的问题.

长江流域上游地区素有“绿色生态屏障”之称,是三峡水库的汇水区<sup>[5]</sup>,作为长江经济带“生态优先、绿色发展”战略实施的重点和关键区域,总磷污染已成为长江上游普遍面临的主要水污染问题. 2016年,长江流域主要水污染物指标开始从化学需氧量和氨氮转变为总磷,其中长江上游地区总磷污染尤为严重<sup>[6]</sup>. 2016年以来,总磷成为长江流域水质超标的首要因子,与长江中下游相比,长江上游总磷处于劣V类的断面比例明显较高,Ⅰ~Ⅲ类的断面比例相对较低,长江流域总磷污染最为严重的前30个断面

中,21个位于上游区域,占比高达70%<sup>[6]</sup>. 目前有关长江流域总磷的研究已经做了大量的工作,尤其是“三磷”(磷矿、磷化工企业和磷石膏库)污染问题受到广泛关注. 如秦延文等<sup>[6]</sup>指出,长江流域总磷来源之一是磷矿和磷化工等污染源的高负荷排放,并提出相应总磷污染控制对策;张文静等<sup>[7]</sup>结合长江经济带磷肥行业水污染防治形势,提出了一系列管控对策;续衍雪等<sup>[8]</sup>针对长江经济带总磷污染特征,提出了涉磷工业企业治理、磷矿管理等具体治理措施;黄德将等<sup>[9]</sup>对宜昌樟村坪磷矿开发现状进行调查,指出矿山开采形成的废水、废渣对水环境影响较大,并提出一系列解决对策. 至今,关于长江流域上游地区“三磷”污染控制的系统研究鲜见报道. 该研究主要针对长江流域上游地区“三磷”污染现状,按照“重点突出,精准施策”原则,以长江流域上游地区“三磷”集中片区为重点开展综合整治,提出相应对策建议,以为长江流域上游地区“三磷”污染控制提供决策依据与技术支撑,从而保障长江流域水环境安全.

## 1 长江流域上游地区概况

长江流域上游地区是指从长江源头到干流湖北宜昌这一江段,跨越9个省(自治区、直辖市),全长4 511 km,流域面积 $98.31 \times 10^4 \text{ km}^2$ (见图1). 长江流域上游地区内的水系主要有金沙江、岷江、沱江、嘉陵江、乌江等支流. 金沙江是长江泥沙的主要来源之一;



图1 长江流域上、中、下游区域划分及国控监测断面分布

Fig.1 The division of the upper, middle and lower reaches of the Yangtze River Basin and the distribution of state control monitoring sections

岷江、沱江均位于四川省中部,其中岷江是上游水量最大的支流;嘉陵江是长江上游面积最大的支流;乌江水系是长江流域上游右岸最大的支流.总体来看,长江上游水质整体良好,但乌江上游、岷江、沱江、嘉陵江和普渡河污染相对严重.长江流域上游地区是长江水资源的命脉,其水质好坏直接关系到长江流域经济社会的发展,因此长江流域上游地区面临的水污染防治任务艰巨<sup>[10]</sup>.

## 2 长江流域上游地区“三磷”污染现状分析

### 2.1 磷矿资源丰富,长期开采对长江流域上游地区水环境产生显著影响

磷矿是一种重要的工农业矿物原材料,广泛应用于医药、军工、食品等重要领域,磷矿资源是我国粮食

安全和产业发展的重要保障<sup>[11]</sup>.我国既是重要的磷矿资源生产大国,同时也是磷矿消费大国.据统计,截至 2017 年底,我国已查明的磷矿资源储量为  $252.84 \times 10^8 \text{ t}$ <sup>[12]</sup>.长江流域上游地区是我国磷矿资源最为富集的地区,保有储量占全国总储量的 60%~78%<sup>[13]</sup>.其中,云南省、湖北省、贵州省和四川省是我国最重要的磷矿资源地,四省磷矿石产量占全国的 72.6%<sup>[14]</sup>.大型磷矿有四川金河-清平地区磷矿、云南滇池地区磷矿、湖北宜昌地区磷矿和贵州福泉地区磷矿等<sup>[11]</sup>(见表 1).我国磷矿矿床主要以海相沉积型磷块岩为主<sup>[15]</sup>,中低品位胶磷矿占比超过 70%, $\text{P}_2\text{O}_5$  平均品位仅占 17%,富矿(品位大于 30%)约占 8.5%<sup>[16]</sup>.

表 1 大型磷矿储量分布及受影响流域基本情况

Table 1 Distribution of large phosphate ore reserves and basic information of affected basins

磷矿名称	$\text{P}_2\text{O}_5$ 储量/( $10^8 \text{ t}$ )	磷矿代表企业	受影响流域
四川金河-清平地区磷矿	3.5	清平磷矿、金河磷矿	沱江(绵远河、石亭江)
云南滇池地区磷矿	8.94	昆阳磷矿	普渡河(金沙江右岸支流)
湖北宜昌地区磷矿	6.8	兴发集团、湖北宜化	香溪河(三峡库区)、黄柏河(长江一级支流)
贵州福泉地区磷矿	6.2	开磷集团、瓮福集团	乌江(洋水河、翁安河)

磷矿资源作为长江流域上游地区经济发展的重要保障,在为经济发展做出重要贡献的同时,也带来了一系列水污染问题.磷矿在开采过程中产生的大量矿坑水、洗矿水和周围矿区排放的民用污水往往含有较多的有害元素(如磷、硫化物等),且 pH 变化较大,随意排放后容易对地表水和地下水造成严重污染<sup>[9]</sup>.另外,部分矿坑排水和洗矿废水、废液排出后多用于农田灌溉,在雨水对废渣堆、磷石膏堆的溶滤作用下,会对农田土地和矿区内土壤造成污染<sup>[17]</sup>.

由于我国磷矿多为中低品位,开采工艺较为落后,同时长江流域地表水、地下水交换间歇短,水土极易流失,造成流域土壤、水体和沉积物总磷浓度升高<sup>[8]</sup>.以长江上游重要支流沱江为例,沱江流域磷矿主要位于沱江上游支流绵远河、石亭江上游即四川金河-清平一带(见图 2、表 1),金河、清平和天池 3 个磷矿的产量占四川省总产量的 95%以上.2017 年 5 月,通过对绵远河与石亭江沿岸土壤总磷含量开展现场调研发现,受磷矿开采的影响,沱江上游主要支流绵远河、石亭江的岸边土壤总磷平均含量分别较四川省土壤背景值<sup>[18]</sup>高 2.6 和 1.6 倍<sup>[6]</sup>,绵远河岸边土壤总磷平均含量较中国土壤背景值<sup>[19]</sup>高 1.56 倍,总磷污染严重.由此可见,磷矿开采对长江流域上游地区水环境产生了显著影响.

### 2.2 磷化工产业发展迅速,但管理薄弱导致总磷超标排放

磷化工产品主要包括磷酸二氢钾、磷酸二氢铵、磷酸氢钙、过磷酸氢钙、三聚磷酸钠等,这些产品广泛用于肥料、医药、食品、化工等行业.我国是一个人口众多的农业大国,2017 年,我国磷肥生产量为  $1\ 640.7 \times 10^4 \text{ t}$ (以  $\text{P}_2\text{O}_5$  计).其中,湖北省、云南省、贵州省和四川省磷肥总产量达  $1\ 312.9 \times 10^4 \text{ t}$ (以  $\text{P}_2\text{O}_5$  计),占全国磷肥总产量的 80.02%.由此可见长江流域上游地区磷肥生产在我国磷肥行业所占的分量<sup>[20]</sup>.我国磷肥主要用于农业消费,其中 90%以上用在种植业领域.总体来看,用于粮食作物生产的磷肥占比呈下降趋势,但包含果蔬在内的经济作物的磷肥消费却明显上涨<sup>[20]</sup>.因此,随着粮食及其他农副产品生产对含磷化肥需求量的日益增长,也将直接转化为这些工业生产对磷矿石需求量的增长.

长江流域围绕磷矿开采的磷化工产业发展迅速.全国 213 家规模以上磷肥制造企业中长江流域就有 199 家,大型磷化工企业有贵州瓮福集团有限责任公司、云南云天化股份有限公司、四川龙蟒集团有限责任公司、湖北兴发化工集团股份有限公司等<sup>[6]</sup>.调查表明,目前长江流域上游地区正面临严重的“重化工围江”问题,仅以重庆市为例,就有 98 家规模以上化工

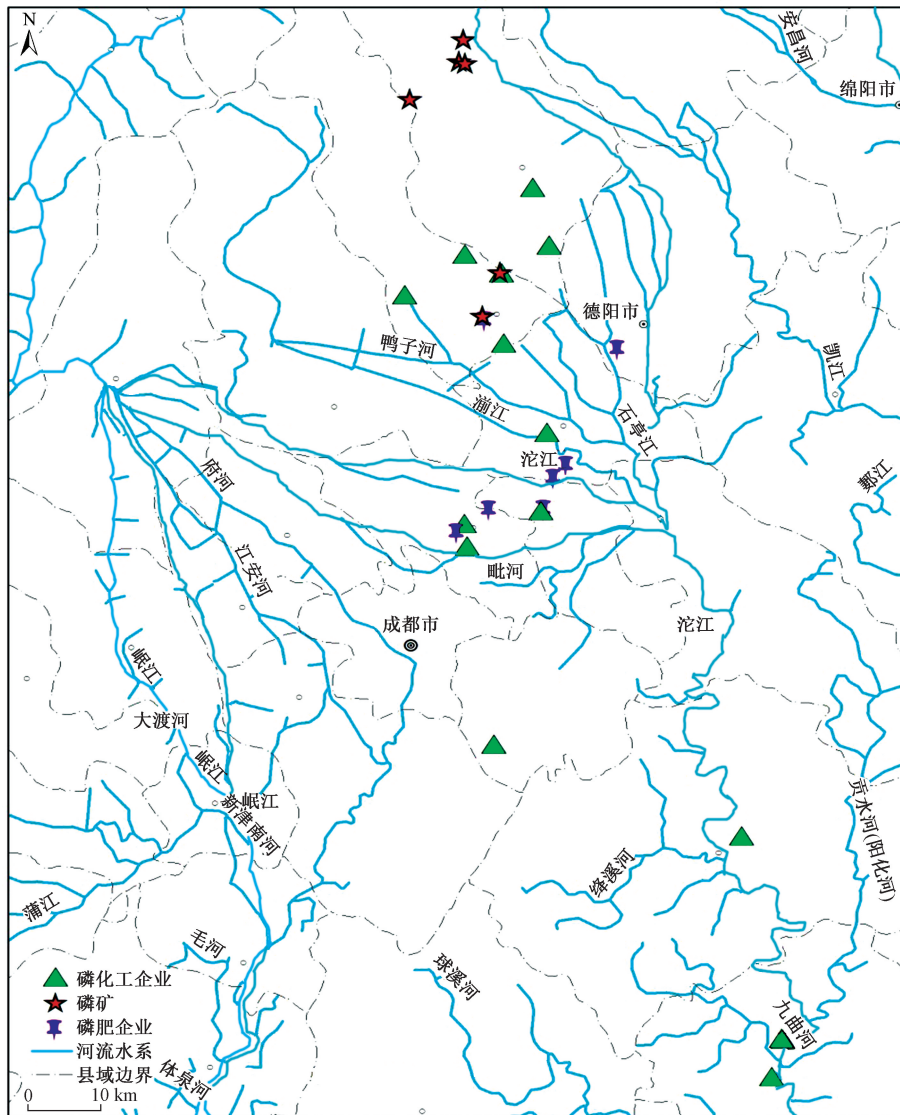


图2 岷江及沱江流域磷矿、磷化工企业和磷肥企业空间分布

Fig.2 Spatial distribution of phosphorous mining, phosphorous chemical enterprises and phosphorous fertilizer enterprises in the Minjiang and Tuojiang River basins

企业沿长江布局. 长江流域上游地区临江临河工矿企业污染导致流域生态环境风险突出<sup>[21]</sup>.

长江流域上游地区磷化工企业污染源排放对所在流域的水环境均产生显著影响. 沱江流域磷矿主要位于沱江上游支流绵远河、石亭江上游即四川金河-清平一带. 涉磷工业聚集区(什邡双盛工业集中区、绵竹新市工业园区和什邡灵杰工业区)排污口总磷浓度高达 0.76 mg/L,使其下游省控断面——双江桥断面总磷浓度达 0.368 mg/L,清江桥断面 3 月、4 月分别高达 0.99 和 1.47 mg/L,总磷处于 V~劣 V 类水平<sup>[6]</sup>;乌江中上游地区作为全国最重要的磷矿石及磷化工基地,已建成开阳磷矿和瓮福磷矿等特大型富矿<sup>[22]</sup>. 由于一些小型涉磷企业随意排污,导致环境

水体中总磷含量严重超标,开阳县洋水河和瓮安县瓮安河水水质长期处于劣 V 类状态<sup>[23]</sup>;香溪河是三峡水库库首附近的首条一级支流<sup>[24]</sup>,湖北省兴山集团是香溪河流域重要的磷化工基地,其磷化工已成为该地区支柱产业. 在磷化工产业发展的同时,香溪河沿岸磷矿开采、企业及生活污水排放极易在水流缓慢的回水区形成污染带,使得香溪河水水质状况更加恶劣<sup>[25]</sup>. 受此影响,2011—2016 年,香溪河总磷年均浓度为 0.13~0.20 mg/L,为 IV~V 类水质<sup>[26]</sup>.

针对长江流域上游地区总磷污染问题,许多大型磷化工企业采取了“雨污分流、清污分流”措施,对污水采取“分级处理、分质利用、集中处理”的方式,使其达到“零排放”或满足 GB 15580—2011《磷肥工业

水污染物排放标准》后外排。但目前长江流域上游地区部分小企业管理不完善,工业废水治理不到位,不仅导致总磷超标排放,而且直接影响局部水域的水质和土壤。此外,地方政府监管有待加强,当前污染源在线监测工作主要针对化学需氧量和氨氮两项指标,总磷在线监测普遍缺失,成为磷超标排放的重要因素。

### 2.3 累积磷石膏临河不当处置与堆存,环境污染与安全隐患大

磷酸主要通过硫酸与磷灰石反应制取磷酸(湿法制酸),该方法虽然经济有效,但会产生大量的副产物——磷石膏<sup>[27]</sup>。磷石膏主要成分是硫酸钙( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ),同时也含有少量未完全分解的氟化物、磷等污染物,从而导致磷石膏堆放过程中产生环境污染<sup>[28]</sup>。

磷石膏全球利用率不到 10%,如何提高利用率是世界性难题。我国磷石膏综合利用率已由 2010 年的 20.3% 提至 2018 年的 39.7%,已接近“十三五”末年达到 40% 的行业目标<sup>[29]</sup>。由于资源化利用技术瓶颈,磷石膏累计堆存量已超过  $3 \times 10^8$  t。据统计,2013 年全国共有磷石膏库 102 个,78.4% 为干排干堆形式;湿排湿堆 16 个,占 15.7%;湿排干堆 6 个,仅占 5.9%<sup>[30-31]</sup>。磷石膏堆场不但占用了大量的土地资源,而且由于环保设施不健全,对临江河流的水质造成了一定影响,磷石膏的处理处置问题已成为制约磷化工行业发展的主要因素之一。以德阳市为例,其境内目前共有磷石膏堆场 20 个,堆存总量为  $4\ 458 \times 10^4$   $\text{m}^3$ 。整治前磷石膏堆场成为涉及流域、大气和土壤的重大环境问题,被列为四川省十大环境安全隐患之一<sup>[32]</sup>。2018 年德阳市磷石膏综合利用基本达到产用平衡,但大量累积的磷石膏堆场仍未得到有效利用,且大部分堆场临河而建,雨水冲刷之后易入河,对水环境质量的影响不容忽视<sup>[6]</sup>。通过对宜昌市樟村坪地区磷矿磷石膏调查发现,樟村坪境内各磷矿累计堆存废渣  $212.32 \times 10^4$  t<sup>[33]</sup>,除部分废渣用于修路外,废渣的利用途径不多,且利用率不到 10%<sup>[9]</sup>。

另外,磷石膏渣场渗沟的磷污染排放也是影响河流总磷超标的重要原因。鉴于目前磷石膏的利用率较低,一般采取湿法或干法堆积方式存放<sup>[34]</sup>。岩溶地区的磷石膏堆场早期大多未做防渗或防渗等级不够,在堆存过程中,由于雨水作用产生的渗滤液 pH 很低,一旦渗入地下后,将会严重污染堆场及周边地下和地表水资源<sup>[27]</sup>。以乌江流域的交椅山磷石膏堆场为例,其库容约为  $4\ 690 \times 10^4$   $\text{m}^3$ ,目前堆渣量已达  $3\ 000 \times 10^4$   $\text{m}^3$ 。受喀斯特地貌影响,部分含磷渣污水

渗漏进入乌江,成为近年来乌江总磷超标的主要原因。34 号泉眼总磷浓度最高达 600 mg/L,高出 V 类水质标准限值 1 400 倍,导致下游地下水总磷严重污染<sup>[8]</sup>。

总体上,目前磷石膏堆场仍然存在的主要问题有:①磷石膏堆存不规范。大部分堆场未设置渗滤液收集和处理设施,未设置防渗措施,渗滤液淋滤作用对周边区域土壤及地下水环境造成了一定影响。②监测评估缺失。大部分堆场未规范设置地下水监测井,未定期对地下水开展监测;同时未系统性对堆体周边河流、土壤环境进行系统性跟踪监测,无法及时准确掌握、评估堆场对周边环境的影响情况。③综合利用率不高。现阶段受磷石膏综合利用产品类型较少、运输及利用成本较高等因素影响,综合利用规模无法完全消纳新产生的磷石膏,堆存量还在继续增加。

## 3 长江流域上游地区“三磷”污染控制对策建议

### 3.1 加强重点片区磷矿治理

长江流域上游地区磷矿主要集中在沱江上游德阳段绵远河、石亭江,乌江上游贵州段瓮安河、洋水河和清水江,湖北省宜昌—兴山—神农架一线和钟祥—南漳一线三个重点片区。针对磷矿分布重点片区,大力推进矿业结构调整和转型升级,提升区域内磷矿企业的开采和选矿技术水平,提高磷过滤效率和回收率;强化磷矿资源管理,涉磷重点工业企业应对厂区冲洗水和初期雨水收集系统进行完善,严防尾矿库不达标废水进入地表水体。落实涉磷矿山渣场和尾矿库的防渗、防风、防洪措施,推进规范的雨水收集池、回水池、渗滤液收集池和应急污水处理系统建设,并推进总磷自动在线监控装置的安装;对尾矿库危库、险库彻底整治,对未按要求治理或未经批准擅自回采尾矿的磷矿企业严肃查处。

### 3.2 推动涉磷工业园区/工业集中区的技术改造升级,促进磷化工产业绿色发展

针对绵远河、石亭江、乌江、香溪河等磷矿重点分布区域,对涉磷工业超标排放、污染治理措施不到位的企业提出限期整改措施,严格环境准入,依法淘汰落后产能,优化涉磷产业结构。同时促进工业企业集中连片经营,实行园区污染物排放总量控制,严格落实工业废水集中处理和达标排放。针对绵远河、石亭江流域,加强对涉磷小企业专项整治,对涉磷废水排放加强监管,实施涉磷企业执行水污染物总磷特别排放限值,对总磷超标控制单元新建涉磷项目实施倍量削减替代;对乌江流域贵阳中化开磷化肥有限公司

(34号泉眼)、贵州瓮福集团有限责任公司(发财洞)加强污水回抽处理能力建设。

### 3.3 加强磷石膏堆场密集分布区域的规范化综合管理

针对四川省(沱江)、贵州省(乌江)、湖北省(香溪河)等磷石膏堆场密集分布区域,首先开展专项排查,摸清长江上游磷石膏堆场数量(包括停止使用和正在使用的堆场)、规范化建设及综合利用等情况,建立台账;其次,开展磷石膏堆场污染整治,对于已经停用和正在使用的堆场,梳理问题,分类治理;再次,开展磷石膏、磷渣仓储标准化管理,落实涉磷矿山渣场和尾矿库的防渗、防风、防洪措施,加强渣场渗滤液污染防范和磷石膏堆场区域地下水定期监测;最后,多措并举推进磷石膏综合利用。

### 3.4 以法规、标准为准绳,加快完善涉磷污染源监管系统

针对岷江、沱江、乌江等总磷污染重点区域,制定针对总磷控制的地方水污染物排放标准。进一步理顺 GB 3838—2002 与行业废水排放标准中总磷排放限值的关系,适当加严涉磷行业废水排放标准,同时保证必要的生态流量;按照《水污染防治法》等法律法规有关水污染防治的监督管理要求,进一步强化涉磷工业污染源的日常监管;加强环境综合执法,提升环境监管能力;强化生态优先、绿色发展的环境管理措施。

## 4 结论

a) 长江流域上游地区“三磷”产业集中,是导致其总磷污染的重要原因。管控长江流域上游地区总磷污染,恢复长江流域水环境质量,是改善入江河流水质、保护好长江母亲河的重要举措,是建设长江流域上游地区生态屏障的必由之路,更是顺利推进长江经济带发展走生态优先、绿色发展之路的基础保障。

b) 分析长江流域上游地区“三磷”污染现状,剖析总磷污染成因,主要包括:磷矿资源丰富,长期开采对上游水环境产生显著影响;磷化工产业发展迅速,但管理薄弱导致总磷超标排放;存量磷石膏(库)临江临河不当处置与堆存,环境污染与安全隐忧大。

c) 按照“重点突出,精准施策”原则,以长江流域上游地区“三磷”集中片区为重点开展综合整治,提出对策建议:①加强重点片区的磷矿治理;②推动涉磷工业园区/工业集中区的技术改造升级,促进磷化工产业绿色发展;③加强磷石膏堆场密集分布区域的规范化综合管理;④以法规和标准为准绳,加快完善涉磷污染源监管系统。

## 参考文献(References):

- [1] 张健,郑西来,董慧,等.河口表层沉积物中磷酸盐释放的动力学特征[J].海洋地质前沿,2012,28(3):1-6.  
ZHANG Jian, ZHENG Xilai, DONG Hui, *et al.* Kinetic characteristics of phosphate release from surface sediments in estuaries[J]. Marine Geology Frontiers, 2012, 28(3): 1-6.
- [2] 尹真真.三峡库区干流总磷浓度变化趋势分析研究[J].环境科学与管理,2016,41(9):56-59.  
YIN Zhenzhen. Changing trends of total P concentrations in main streams of Three Gorges Dam [J]. Environmental Science and Management, 2016, 41(9): 56-59.
- [3] 环境保护部.2016年中国环境状况公报[R].北京:环境保护部,2017:18-19.
- [4] 四川省环境保护厅.2016年四川省环境状况公报[R].成都:四川科学技术出版社,2016:7-8.
- [5] 马广文,王业耀,香宝,等.长江上游流域土地利用对面源污染影响及其差异[J].农业环境科学学报,2012,31(4):791-797.  
MA Guangwen, WANG Yeyao, XIANG Bao, *et al.* Diversity and effect of diffuse source pollution load caused by land use change in the upper reach of Yangtze River Basin, China [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2012, 31(4): 791-797.
- [6] 秦延文,马迎群,王丽娟,等.长江流域总磷污染:分布特征·来源解析·控制对策[J].环境科学研究,2018,31(1):9-14.  
QIN Yanwen, MA Yingqun, WANG Lijun, *et al.* Pollution of the total phosphorus in Yangtze River Basin: distribution characteristics, source and control strategy [J]. Research of Environmental Sciences, 2018, 31(1): 9-14.
- [7] 张文静,高涵,郭黎卿.长江经济带磷肥行业水污染形势与管控对策研究[J].磷肥与复肥,2018,33(12):80-82.  
ZHANG Wenjing, GAO Han, GUO Liqing. Water pollution trends and control strategy research for phosphate fertilizer industry of Yangtze River Economic Zone [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2018, 33(12): 80-82.
- [8] 续衍雪,吴熙,路瑞,等.长江经济带总磷污染状况与对策建议[J].中国环境管理,2018,10(1):70-74.  
XU Yanxu, WU Xi, LU Rui, *et al.* Total phosphorus pollution, countermeasures and suggestions of the Yangtze River Economic Belt [J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2018, 10(1): 70-74.
- [9] 黄德将,易涛,张瑜,等.湖北宜昌樟村坪地区磷矿开发利用现状、存在问题及解决对策初探[J].资源环境与工程,2018,32(1):155-160.  
HUANG Dejiang, YI Tao, ZHANG Yu, *et al.* Preliminary analysis of current situation of phosphorite exploitation, existence question and corresponding countermeasures in the Zhangcunping Area, Yichang City [J]. Resources Environment & Engineering, 2018, 32(1): 155-160.
- [10] 张桂轲.长江流域上游非点源污染及其对水文过程的响应研究[D].北京:清华大学,2016.
- [11] 张苏江,夏浩东,唐文龙,等.中国磷矿资源现状分析及可持续发展建议[J].中国矿业,2014,23(S2):8-13.  
ZHANG Sujiang, XIA Haodong, TANG Wenlong, *et al.* Current

- status and sustainable development of phosphorite resources in China[J]. *China Mining Magazine*, 2014, 23(S2): 8-13.
- [12] 自然资源部. 中国矿产资源报告 2018[M]. 北京: 地质出版社, 2018.
- [13] 马贤惠. 长江上游矿产资源优化配置及生态环境建设研究[J]. *理论与当代*, 2001(10): 474-478.  
MA Xianhui. Study on optimized allocation of mineral resources and construction of ecological environment in the upper reaches of the Yangtze River[J]. *Theory and Contemporary*, 2001(10): 474-478.
- [14] 国土资源部信息中心. 世界矿产资源年评 2015[M]. 北京: 地质出版社, 2015.
- [15] 刘颐华. 我国与世界磷资源及开发利用现状[J]. *磷肥与复肥*, 2005, 20(5): 1-5.  
LIU Yihua. Phosphorus resources at home & abroad, and the current situation of their exploitation & utilization [J]. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2005, 20(5): 1-5.
- [16] 马鸿文, 刘昶江, 苏双青, 等. 中国磷资源与磷化工可持续发展[J]. *地学前缘*, 2017, 24(6): 133-141.  
MA Hongwen, LIU Changjiang, SU Shuangqing, et al. Phosphorus resource and sustainable development of phosphorus chemical industry in China[J]. *Earth Science*, 2017, 24(6): 133-141.
- [17] 李英华. 我国主要磷矿、硫铁矿集中开采区水土污染现状分析[J]. *化工矿产地质*, 2018, 40(4): 241-246.  
LI Yinghua. Present situation analysis of water and soil pollution in phosphate rock and sulfur mining area of China[J]. *Geology of Chemical Minerals*, 2018, 40(4): 241-246.
- [18] 刘应平. 成都平原土壤地球化学组成及其生态响应研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2012.
- [19] 谭和平, 陈能武, 黄苹, 等. 四川茶区土壤营养元素背景值研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2006, 12(6): 784-788.  
TAN Heping, CHEN Nengwu, HUANG Ping, et al. Background of nutrition elements in tea garden soils in Sichuan Province[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, 12(6): 784-788.
- [20] 中国报告网. 2018 年中国磷肥行业产量有所下降出口量增价稳走势[EB/OL]. 北京: 中国报告网, 2018-09-01 [2018-10-31]. <http://market.chinabaogao.com/huagong/10313LK62018.html>.
- [21] 罗胤晨, 文传浩, 滕祥河. 破除长江上游“重化工围江”困境[N]. 北京: 中国环境报社, 2019-02-01(3).
- [22] 卓海华, 兰静, 吴云丽, 等. 乌江磷污染对三峡水库水质影响研究[J]. *人民长江*, 2014, 45(4): 66-68.  
ZHUO Haihua, LAN Jing, WU Yunli, et al. Study on influence of phosphorus pollution of Wujiang River to water quality in Three Gorge Reservoir[J]. *Yangtze River*, 2014, 45(4): 66-68.
- [23] 樊园芳. 乌江流域磷污染治理见成效[N/OL]. 贵阳: 贵州日报, 2015-10-05 [2015-10-05]. <http://gzrb.gog.cn/system/2015/10/05/014566126.shtml>.
- [24] 姚绪姣, 刘德富, 杨正健, 等. 三峡水库香溪河库湾冬季甲藻水华生消机理初探[J]. *环境科学研究*, 2012, 25(6): 645-651.  
YAO Xujiao, LIU Defu, YANG Zhengjian, et al. Preliminary studies on the mechanism of winter dinoflagellate bloom in Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2012, 25(6): 645-651.
- [25] 唐涛, 黎道丰, 潘文斌, 等. 香溪河河流连续统特征研究[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(1): 141-144.  
TANG Tao, LI Daofeng, PAN Wenbin, et al. River continuum characteristics of Xiangxi River [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(1): 141-144.
- [26] 杨霞, 王攀菲, 李建华. 三峡库区香溪河水体营养状态变化分析[J]. *人民长江*, 2018, 49(10): 11-15.  
YANG Xia, WANG Panfei, LI Jianhua. Analysis on variation of nutritional status of Xiangxi River in Three Gorges Reservoir [J]. *Yangtze River*, 2018, 49(10): 11-15.
- [27] 查学芳, 覃应机, 吴攀, 等. 磷石膏堆场渗漏影响下岩溶地下水地球化学过程[J]. *生态学杂志*, 2018, 37(6): 1708-1715.  
ZHA Xuefang, QIN Yingji, WU Pan, et al. Geochemical process of karst groundwater as affected by the leakage of phosphogypsum stock dump [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, 37(6): 1708-1715.
- [28] 周智武, 金苏闽. 我国磷石膏综合利用技术进展[J]. *硫酸工业*, 2013(2): 5-7.  
ZHOU Zhiwu, JIN Sumin. Technical progress in comprehensive utilization of phosphogypsum in China [J]. *Sulphuric Acid Industry*, 2013(2): 5-7.
- [29] 张晓敏. “三磷”整治将深刻影响磷肥行业: 重点堵住磷化工和磷石膏库总磷超排[N/OL]. 北京: 中国化工报, 2019-04-19 [2019-04-22]. <http://www.ccin.com.cn/detail/233627>.
- [30] 王铂远. 磷石膏制备胶凝材料和混凝土的研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2014.
- [31] 中国磷肥工业协会. 2013 年国内磷铵企业调研情况总结[C/OL]. //中国磷肥工业协会六届三次理事会暨第二十一届全国磷复肥行业年会论文集. 北京: 中国磷肥工业协会, 2013: 50-56.
- [32] 任略, 吴文翎, 张海磊. 沱江源头战“膏”记[EB/OL]. 北京: 新华网, 2018-04-24 [2018-04-25]. <https://deyang.scol.com.cn/sdxw/201804/56146655.html>.
- [33] 张端森, 陈骏峰, 庞威, 等. 宜昌市夷陵区磷矿开发区矿山地质环境问题及防治对策[J]. *资源环境与工程*, 2014, 28(2): 184-187.  
ZHANG Duanmiao, CHEN Junfeng, PANG Wei, et al. Mine geological environment and countermeasures about phosphate ore development zone in Yiling [J]. *Resources Environment & Engineering*, 2014, 28(2): 184-187.
- [34] TAYIBI H, CHOURA M, LÓPEZ F A, et al. Environmental impact and management of phosphogypsum [J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, 90(8): 2377-2386.

(责任编辑:张 蕊)