

# 荆江航道疏浚土优先控制污染物筛选研究\*



高辰龙<sup>1</sup>, 陆纪腾<sup>2</sup>, 刘燕婕<sup>3,4</sup>

(1. 长江武汉航道局, 湖北 武汉 430014; 2. 长江航道局荆江航道整治工程建设指挥部, 湖北 荆州 434001;  
3. 长江航运总医院, 长江航务管理局环境监测站, 湖北 武汉 430010; 4. 华中科技大学公共卫生学院, 湖北 武汉 430032)

**摘要:** 以美国 EPA 优先控制污染物和中国优先控制污染物为基础, 以文献报道长江水质污染物检测数据为依据, 利用综合评分法结合德尔菲法筛选荆江航道疏浚土优先控制污染物。结果表明, 荆江航道疏浚土优先控制污染物为农药、金属、多环芳烃、多氯联苯、酚类、苯类、挥发性卤代烃、酞酸酯类、全氟类等 9 大类污染物, 主要集中在 DDT、镉、铅和汞等 10 种污染物。鉴于以上优先控制污染物具有较强的环境持久性, 在航道疏浚过程中应加强污染物的监测和评估。

**关键词:** 综合评分法; 德尔菲法; 荆江航道; 疏浚土; 优先控制污染物

中图分类号: X 736; U 616<sup>+</sup>.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)07-0026-06

## Screening the precedence-controlled pollutants in dredged soil of the Jingjiang river waterway

GAO Chen-long<sup>1</sup>, LU Ji-teng<sup>2</sup>, LIU Yan-jie<sup>3,4</sup>

(1. Changjiang Wuhan Waterway Bureau, Wuhan 430014, China;

2. Jingjiang Waterway Regulation Works Construction Headquarter, Changjiang Waterway Bureau, Jingzhou 434001, China;

3. Environmental Monitoring Center of Yangtze River Administration and Navigational Affairs,  
General Hospital of the Yangtze River Shipping, Wuhan 430010, China;

4. School of Public Health, Tongji Medical College, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430032, China)

**Abstract:** Based on the precedence-controlled pollutants of EPA in America and the precedence-controlled pollutants in China, and according to the test data reported in the literatures about the water quality pollutants in the Yangtze River, this paper utilized the comprehensive scoring method combining with Delphi method to screen the precedence-controlled pollutants in dredged soil of the Jingjiang river waterway. Results show that the typical pollutants in dredged soil of the Jingjiang river waterway are nine kinds of main pollutants including pesticide, metal, PHA, PCB, phenols, benzenes, volatile halogenated hydrocarbon, phthalic esters; perfluorinated compounds, and mainly center on 10 kinds of pollutants such as DDT, cadmium, lead, mercury, etc. Considering that the precedence-controlled pollutants above own strong environmental persistence, the monitoring and evaluation shall be strengthened for the pollutants in the channel dredging process.

**Keywords:** comprehensive scoring method; Delphi method; Jingjiang river waterway; dredged soil; precedence-controlled pollutants

长江是连接我国东、中、西部地区的重要纽带, 是全球重要的通航河流。航道疏浚是开发航道、维护通航条件的重要手段。疏浚沿线涉及我

国主要的工业用水、农业用水、生活饮用水和渔业用水水源地。近年来, 随着社会经济的快速发展, 排入长江的工业废水和生活污水量逐年增加,

收稿日期: 2016-02-24

\*基金项目: 交通运输部长江航道局科技专题研究项目 (2014-30010)

作者简介: 高辰龙 (1988—), 男, 硕士, 助理工程师, 从事生态航道工程研究。

导致长江水质、底泥污染逐年加重,污染源和污染物复杂多样,对人体健康与水生态环境造成影响。航道疏浚扰动吸附在河床泥土表面的有毒污染物,疏浚后,疏浚土向下游排放、在岸上堆积或资源化利用,均可能对水质及水域周围环境带来不利的影 响。目前,由于缺乏评价航道疏浚及疏浚对水环境影响的方法和数据,有必要开展航道疏浚对水环境质量影响的研究。长江污染物种类繁多,逐一开展监测、控制,耗时长、效率低、成本高,而且受现有技术条件和方法限制很难实现。因此,筛选航道疏浚土中对水质影响最大的优先控制污染物,建立航道疏浚的优先控制污染物指标体系,可为制定具有针对性的航道疏浚水质监控方案以及疏浚土的生态安全性评价和资源化管理提供科学依据。

优先控制污染物是环境中恒量存在的,且具有持久性、难降解、生物可累积的有毒污染物。优先控制污染物有“致畸、致癌、致突变”作用,对人类健康造成危害,与人类活动密切相关,可反映人类活动对水质的影响,是国际上最常采用的客观、实用的污染物指标体系<sup>[1-3]</sup>。筛选优先控制污染物的方法有综合评分法、图解法、潜在危害指数法等,其中综合评分方法是污染物定量化的定性筛选方法,较为科学与权威,应用最为广泛。但综合评分法的某些评价指标具有主观性<sup>[4]</sup>。且由于长江水体污染物组分较多,相互关系比较复杂,目前缺乏足够的检测数据,仅根据评分法筛选长江航道疏浚土优先控制污染物具有一定困难。德尔菲法通过征求和总结专家的意见对复杂的决策问题作出群的判断,具有广泛的代表性、可靠性,是预测分析和提供决策的一种有效方法<sup>[5-7]</sup>,它提供多方案选择的可能性,在国内外许多领域广泛应用。

本研究以荆江航道为例,筛选研究区域见图1。利用综合评分法,以污染物检测到的频率、浓度及毒性为指标建立评分法得分筛查体系,并结合德尔菲法,筛选出能客观反映荆江航道疏浚土污染现状的优先控制污染物。

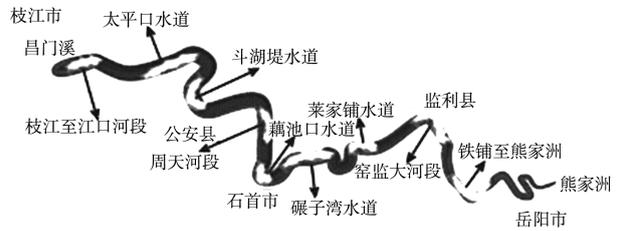


图1 长江中游荆江航道区域

## 1 材料与方法

### 1.1 文献检索

参考我国标准:GB 3838—2002《地表水环境质量标准》、GB 5749—2006《生活饮用水卫生标准》、GB 11607—1989《渔业水质标准》、GB 5084—2005《农田灌溉水质标准》;GB 15618—2008《土壤环境质量标准》、GB 4264—1984《农用污泥中污染物控制标准》、DB 11/T811—2011《场地土壤环境风险评价筛选值》;以中国环保部水中优先控制污染物黑名单、美国环保署(EPA)水中优先控制污染物黑名单以及文献报道的长江各断面水中主要污染物检测数据为基础,以“长江”、“污染”、“水环境”等为检索词,查阅万方数据、中国知网、Pubmed等数据库,列出供筛选的污染物清单<sup>[8-16]</sup>。其中初筛纳入标准为:具有长江污染的内容,文献中长江段明确,采样点布置合理,污染物种类清楚,污染物浓度数据完整等;排除标准为:无明确的污染物种类及浓度,采样点过少,不具有代表性。

### 1.2 初筛

将列出的供筛选污染物,结合航道工程沿线水中、底泥特点,并参考以下几方面进行初筛:1) 涵盖土壤污染源调查和评价所确定的主要污染源的主要污染物;2) 发达国家环境质量标准所规定的主要指标;3) 系统收集文献中长江以往水质、底泥的污染物监测数据,包括种类、浓度;4) 对人体健康以及土壤-地下水体系危害大,应优先控制的污染物;5) 现阶段能提供的监测和测试条件。初步筛选出适合航道疏浚土特性的污染物名单,包括重金属和有机物指标两方面。

### 1.3 综合评分法筛选

综合评分法主要参数有3个:污染物的毒性、

污染物出现频率和浓度。根据本研究初筛所筛选出的污染物，按检出频率、毒性、暴露风险3方面的因素，即总分由检出频率分、物质毒性分与暴露分组成，每项满分均为600分，其中暴露评分由源贡献300分和暴露300分组成，由于缺乏暴露资料，本次筛选评分由频率分、物质毒性分和源贡献分组成，根据得分高低进行优先污染物排序。另外，本研究以对荆江航道水质和底泥危害最大的污染物优先考虑，当污染物毒性贡献 $<2$ ，表示检出浓度或毒性较低，考虑经济成本、监测效率等因素，将其剔除。

1) 频率得分：以频度指数最高者为标准，记为600分，其余有机物以其频度与最高者成比例计算得分。

2) 毒性得分：以美国毒物和疾病登记署所公布的化学物毒性值为标准，从可燃性/反应性、水生动物毒性、哺乳动物毒性、慢性毒性和致癌性5个方面评价。基于RQ/TES，转换为评分1、10、100、1 000、5 000共5个等级，分别对应毒性评分600、400、178、53、10(表1)。

表1 毒性评分

RQ/TES	次序	累计次序 COR	$2/3^{COR}$	毒性评分 ( $2/3^{COR} \times 600$ )
1	0	0	1.000 0	600
10	1	1	0.666 7	400
100	2	3	0.296 3	178
1 000	3	6	0.087 8	53
5 000	4	10	0.017 3	10

3) 贡献得分：毒性贡献 =  $TTD$ /毒性。 $TTD$ 为化合物每日剂量，广泛查阅近几年长江污染物监测文献，建立数据库获得各流域监测浓度，计算几何平均最高浓度得出。毒性贡献越高，说明该污染物的危害风险越大。

4) 计算频率得分、毒性得分、贡献得分三者之和即为最后得分。按照最后得分从高到低排序。

5) 由于中国优先控制污染物及常规水质检测均含有金属类无机物，国内对此类污染研究较多，而且检测方法完善，故将金属类无机物纳入初筛筛选名单中。

### 1.4 德尔菲法

德尔菲法主要是调查者拟定调查表，按照既定的程序，以邮件或者信件的方式向专家组成员进行征询意见。专家组成员以匿名的方式提交意见。经过几次反复征询和反馈，专家组成员的意见逐步集中，最后获得具有高准确率的集体判断结果。

#### 1.4.1 调查对象

按德尔菲法选择出12名专家，分布于武汉、郑州、上海等地，工作单位有医学院校、疾控中心、环境监测中心等，专业包括环境卫生学与劳动卫生学、卫生检验、环境医学等。

#### 1.4.2 调查步骤

按照评分法筛选结果制定第1轮德尔菲法咨询表。第1轮问卷中包括初筛污染物指标的浓度、频率、毒性评分，专家根据研究者提供的参考文献和自己工作经验对问卷进行评分。

第1轮问卷调查结束后，形成对比分析后制定第2轮调查表，进行第2轮专家问卷调查。在第2轮中，专家参考其他专家的意见，修改自己意见，最终统计分析专家意见协调程度。

#### 1.4.3 统计分析方法

采用Excel2010数据库双录入法核查与分析，用spss13.0软件计算统计。主要内容包括：

1) 专家积极系数。参照艾尔巴比研究<sup>[17]</sup>，专家积极系数用专家调查表回收率表示。以回收率50%为基准比例，回收率大于60%比较好、大于70%非常好。计算公式为：

$$\text{专家积极系数} = \frac{\text{调查问卷回收分数}}{\text{调查问卷发出份数}} \times 100\% \quad (1)$$

2) 专家权威程度。权威程度由判断依据对专家判断的影响程度和专家对问题的熟悉程度两个因素决定。

①专家判断的影响程度。判断的依据，包括理论分析、实践经验和国内外同行的了解与直觉。当判断系数总和=10，表明判断依据对专家判断的影响程度大；判断系数总和=8，表明对专家判断的影响程度中等；判断系数总和 $\leq 5$ ，表明对专家判断的影响程度小。

②专家对指标的熟悉程度。取值 0~10 分, 对指标非常熟悉, 记为 10 分; 完全不熟悉, 记为 0 分。权威程度  $C_r$ : 以自我评价为主因素决定, 取判断系数  $C_\alpha$  和熟悉程度系数  $C_s$  的算术平均值。专家熟悉程度 >6 为可信。计算公式为:

$$C_r = \frac{C_\alpha + C_s}{2} \quad (2)$$

3) 专家集中程度、离散程度和协调程度。专家对污染物指标的集中程度用均数  $M_j$  表示; 离散程度用变异系数  $C_v$  表示; 协调程度用协调系数  $w$  表示。集中程度、离散程度分别以均值得分  $\geq 5.0$ 、变异系数  $\leq 0.40$  为标准; 协调系数  $w$  在 0~1,  $w$  越大表示专家的协调程度越好。计算公式为:

$$M_j = \frac{1}{m_j} \sum_{i=1}^{m_j} C_{ij} \quad (3)$$

式中:  $M_j$  为第  $j$  个指标的均数;  $m_j$  为参与第  $j$  个指标评价的专家数;  $C_{ij}$  为第  $i$  个专家对第  $j$  个指标的评价值。

$$CV = \frac{SD_j}{M_j} \quad (4)$$

式中:  $SD_j$  为第  $j$  个指标标准差。

$$\begin{cases} w = \frac{12}{m^2(n^3 - n)} \sum_{j=1}^n dj^2 \\ \text{或} \\ w = \frac{12}{m^2(n^3 - n) - m \sum_{j=1}^n T_i} \sum_{j=1}^n dj^2 \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $n$  为指标数;  $m$  为专家总数;  $d_j$  为  $j$  指标等级与全部指标等级和的离均差;  $T_i$  表示修正系数。即: 专家对各指标没有给出相同评价时或专家对各指有相同评价等级时的  $w$  计算公式。

#### 1.4.4 协调系数的 $\chi^2$ 检验

根据显著性水平和自由度, 从  $\chi^2$  界值表中查取临界值  $\chi_\alpha^2$ , 如果  $\chi_R^2 > \chi_\alpha^2$ , 可认为协调系数经假设检验后具有显著性, 说明专家评估意见协调性好, 结果可信; 反之,  $\chi_R^2$  很小, 专家意见的非偶然性协调概率越大, 在 95% 置信度下如果  $P > 0.05$ , 则认为专家意见在非偶然性协调方面是不可信的协调, 结果不可取。计算公式为:

$$\chi_R^2 = \frac{1}{mn(n+1) - \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^m T_i} \sum_{j=1}^n dj^2 \sim \chi^2(n-1) \quad (6)$$

## 2 筛选结果

### 2.1 综合评分法筛选结果

根据综合评分法评分值, 选择评分等级较高的污染物前 70 位有机物包括: 酞酸二丁酯、滴滴伊 (DDE)、滴滴涕 (DDT)、艾氏剂、苯并 (a) 芘、多氯联苯、五氯苯酚、七氯、异狄氏剂等。还包括砷、铍、镉、铬、铜、铅、汞、镍、铊金属类无机物, 在中国优先控制污染物及常规水质、底泥检测均含有的金属类无机物, 最终 10 大类共 81 种有机物和金属元素被初步筛选为长江中游荆江航道疏浚土优先控制污染物。

### 2.2 德尔菲法筛选结果

#### 2.2.1 专家积极系数

本次调查共进行了两轮德尔菲法咨询, 第 1 轮发出调查表 15 份, 回收 12 份, 回收率 80%; 第 2 轮发出 12 份, 回收 12 份, 回收率为 100%, 这说明绝大多数专家关心本研究, 参与的荆江航道疏浚土优先控制污染物指标筛选的积极程度高。

#### 2.2.2 专家权威程度

指标的判断依据及判断依据对专家判断的影响程度见表 2, 专家对指标的熟悉程度, 记分值均在 5 以上, 表明专家对指标的熟悉程度高。

最终, 根据判断依据对专家判断的影响程度及对指标熟悉程度的自我评价, 可以获得专家对指标的权威系数, 结果显示专家的权威系数大部分在 6 以上, 说明此次德尔菲法调查结果具有权威性。

表 2 指标判断依据及影响程度

判断依据	影响程度		
	大	中	小
理论分析	3	2	1
科研经验	5	4	3
参考国内外学者的著作	1	0.5	0.5
对同行的了解	0.5	0.5	0.5
直觉	0.5	0.5	0.5

### 2.2.3 第1轮专家咨询意见

1) 专家对指标毒性、频率、浓度和可行性4个方面进行评分。计算每个指标所得分数的均数和变异系数。①均数表示专家意见的集中程度,均数越大,说明对应指标代表性、可检测性越好。②变异系数表示专家意见对某个指标的协调程度,说明专家对指标相应特征进行评估时的变异范围。变异系数越小,说明专家们对该指标的协调程度越高。

2) 专家对第1轮咨询表格的评价和建议:

①在所有筛选出的污染物中,酞酸酯类最具代表性、可检测性,其次分别为:农药、多环芳烃、多氯联苯、酚类、苯类、卤代烃、金属类;②所选指标设计考虑较为细致,指标评价客观、量化;③但筛选指标过多,关系复杂,需结合环境因素,并考虑突发事件的影响,建议删除检出频率和浓度低的指标,增加对环境和健康影响大的全氟类化合物作为评价指标。

### 2.2.4 对指标的修改

按专家对指标的4个特征(毒性、频率、浓度和可行性)的均值得分 $\geq 5.0$ 、变异系数 $\leq 0.40$ 的标准对指标进行修改,修改后污染物包括:酞酸酯类、农药类、多环芳烃、多氯联苯、酚类、苯类、卤代烃、金属、全氟九类,增加全氟辛酸磺酸、全氟辛酸,共42种指标。

### 2.2.5 第2轮专家咨询意见

咨询方法同第1轮。筛选污染物种类包括:酞酸酯类、农药类、多环芳烃、酚类、苯类、卤代烃、金属、全氟共9类42种指标。

### 2.2.6 协调系数及 $\chi^2$ 检验

对两轮专家咨询意见进行统计分析,结果(表3)表明:第1轮咨询专家的协调系数,统计学检验频率 $P>0.05$ ,专家意见不协调;第2轮咨询专家协调系数为0.41,具有统计学意义 $P<0.05$ ,专家咨询意见可取。

表3 咨询专家意见的协调系数及 $\chi^2$ 检验

轮次	项目	协调系数 $\omega$	$\chi^2$	$P$
第1轮	毒性	0.14	120.50	<0.05
	频率	0.21	64.89	>0.05
	浓度	0.07	57.82	>0.05
	可行性	0.11	168.85	<0.05
第2轮	推荐与否	0.41	78.23	<0.05

## 2.3 荆江航道疏浚土优先控制污染物筛选结果

根据评分法及两轮德尔非法咨询结果,最终选取9大类,33种污染物构成长江中游荆江航道疏浚土的优先控制污染物指标体系(表4)。其中:

- 1) 推荐率为100%的污染物,主要包括重金属元素镉、铅、汞,此类污染物易沉降、积聚至底泥中,不易被微生物降解,对生物有明显的毒性作用,且可随河流水质理化条件的改变重新释放出来,再次回到水中,导致水环境二次污染,是重点关注的重金属污染元素;
- 2) 推荐率为90%以上的农药包括DDD、DDT,有机氯类农药使用残留,通过各种渠道回流到水体中,造成水环境污染,对水生生态系统危害大,程度重,也威胁到人类健康;
- 3) 推荐率为90%以上机污染物有5种,包括还苯并(a)芘、多氯联苯、对硝基酚、苯、三氯甲烷,这些有毒的难降解污染物,可通过食物链传递和富集,对水生态系统和人群健康造成影响,是急需处理和控制的低风险污染物;
- 4) 在荆江航道疏浚土优先控制污染物名单中,推荐率在75%~90%的18种污染物以及推荐率在55%~70%的5种污染物,包括:金属砷、农药DDE敌敌畏、乐果等;有机污染物钛酸酯类、全氟类化合物、多环芳烃、酚类、苯类以及卤代烃等;充分显示人类生活和经济活动造成的影响,使长江水体污染物种类繁多,成分复杂。
- 5) 五氯苯酚是典型的环境持久性污染物,作为抗血吸虫药,曾经在长江中游流域被应用广泛,亦是筛选出的荆江航道疏浚土的优先控制污染物。

表4 荆江航道疏浚土优先控制污染物名单

指标	推荐率/%	类别
DDT	100.00	农药
镉	100.00	金属
铅	100.00	金属
汞	100.00	金属
DDD	91.67	农药
苯并(a)芘	91.67	多环芳烃
多氯联苯	91.67	多氯联苯
对硝基酚	91.67	酚类
苯	91.67	苯类
三氯甲烷	91.67	卤代烃
酞酸二丁酯	83.33	酞酸酯类
DDE	83.33	农药类
敌敌畏	83.33	农药类
乐果	83.33	农药类
六六六	83.33	农药类
砷	83.33	金属
全氟辛酸	83.33	全氟类化合物
酞酸二甲酯	75.00	酞酸酯
苯并(a)蒽	75.00	多环芳烃
2,4-二氯苯酚	75.00	酚类
苯酚	75.00	酚类
五氯苯酚	75.00	酚类
2,4-二硝基甲苯	75.00	苯类
硝基苯	75.00	苯类
氯苯	75.00	苯类
六氯苯	75.00	苯类
甲苯	75.00	苯类
四氯化碳	75.00	卤代烃
酞酸双(2-乙基己基)酯	66.67	酞酸酯类
艾氏剂	66.67	农药类
七氯环氧化物	66.67	农药类
全氟辛酸磺酸	66.67	全氟类化合物
酞酸二乙酯	58.33	酞酸酯类

### 3 结论

本研究利用综合评分法结合德尔菲法筛选出荆江航道疏浚土9大类污染物,主要集中在DDT、镉、铅和汞等10种污染物,充分体现了荆江航道疏浚土的污染物现状,具有参考价值。研究结果提示:1)长江中游荆江河段航道疏浚水域污染源可能主要为化工厂点源污染以及农业面源污染,且污染物持续排放或有较强的环境持

久性。有些污染物为新产生污染物或毒性、频率、毒性贡献明显增长的污染物,对长江中游水环境构成潜在危害。2)在航道疏浚过程中应加强污染物的监测和评估,系统分析疏浚对污染物浓度及分布的改变,采取措施控制疏浚过程对污水口、取水口等敏感点附近水中、底泥污染物迁移、扩散可能造成的影响,保证航道疏浚对水质安全的影响处于最低程度。3)应加强航道疏浚土的污染物生态风险评价以及疏浚土资源化管理和利用。

### 参考文献:

- [1] Hansen B G, Van Haelst A G, Van Leeuwen K, et al. Priority setting for existing chemicals: European Union risk ranking method[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 1999, 18(4): 772-779.
- [2] 裴淑玮,周俊丽,刘征涛.环境优控污染物筛选研究进展[J].*环境工程技术学报*, 2013(4): 63-68.
- [3] 李沫蕊,王亚飞,滕彦国.应用综合评分法筛选下辽河平原区域地下水典型污染物[J].*北京师范大学学报:自然科学版*, 2015, 51(1): 64-68.
- [4] Khan F I, Sadiq R. Risk-based prioritization of air pollution monitoring using fuzzy synthetic evaluation technique[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2005, 105(1-3): 261-283.
- [5] 黄利明,章荣华,陈树昶,等.应用德尔菲法制定食源性疾病影响因素调查表[J].*浙江预防医学*, 2015, 27(7): 724-726.
- [6] 丁晋飞,谈立峰,汤在祥,等.德尔菲法及其在公共卫生领域的应用和展望[J].*环境与职业医学*, 2012, 29(11): 727-730.
- [7] 王子云,刘永泉,王洪波,等.德尔菲法在住宿场所卫生量化分级管理评分表指标体系改进中的应用[J].*中华预防医学杂志*, 2009, 42(4): 287-292.
- [8] 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.
- [9] 李维美,李雪花,蔡喜运,等.应用自动识别与定量分析数据库筛查黄河和长江水中有有机污染物[J].*环境科学*, 2010, 31(11): 2 627-2 632.