

DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20190296

太浦河锑浓度异常预警指标研究

林荷娟, 甘月云, 刘 敏

(太湖流域管理局水文局(信息中心), 上海 200434)

摘 要:太浦河作为太湖流域的重要供水通道, 长期以来重点都是关注水源地氨氮指标浓度, 但 2014 年以来多次发生锑浓度异常事件, 为太浦河水源地供水安全拉响了警报。根据近几年实践, 在太浦河两岸地区企业锑污染物排放严格控制的情况下, 锑浓度异常主要与地区降雨强度密切相关。研究结果表明, 太浦河锑浓度异常预警指标设定为杭嘉湖区两日累计降雨量达到或超过 50mm 以上, 且太浦闸受强降雨影响关闸时, 太浦河出现锑浓度异常可能性较大。在此基础上研究了有效应对锑浓度异常时太浦闸的供水流量。该成果为预防太浦河锑浓度出现异常情况, 保障太浦河下游地区供水安全提供了决策支撑。

关键词:太浦河; 锑; 降雨; 预警指标

中图分类号:TV12; X824

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2021)01-0095-07

1 引言

太浦河, 西起江苏省苏州市吴江区庙港镇太湖东岸, 通过太浦闸与太湖相连, 东至上海市青浦区金泽镇池家港村, 并接黄浦江上游斜塘, 太浦河横穿苏、浙、沪两省一市的吴江、嘉善、青浦三县(区), 全长 57.6km; 其沿线分布有上海市金泽水库水源地和浙江省嘉兴市嘉善-平湖水源地。太浦河既是流域主要泄洪通道, 也是流域向苏州、上海、嘉兴等下游地区供水的骨干河道。随着区域经济社会快速发展和人们对清洁水源要求的不断提高, 以及地区供水结构的调整, 太浦河的战略地位和作用更加凸显。近年来, 太浦河两岸地区经济发达, 集聚了众多纺织、印染企业, 大量含锑的工业废水(锑为纺织、印染企业的特征污染物)^[1-3]经处理后排入当地河网, 太浦河多次发生锑浓度异常事件(当锑浓度超过 5 $\mu\text{g/L}$ 限值时就认为是锑浓度异常事件), 为太浦河水源地供水安全拉响了警报。

另外, 长期以来作为水源地重点关注的氨氮指标随着太浦河两岸地区畜禽养殖减少等水环境治理力度加大, 近几年太浦河氨氮浓度基本控制在 II~III 类, 全

年平均值均优于 II 类, 因此锑浓度就成为太浦闸供水安全调度的重点关注对象。为积极有效应对锑浓度异常事件, 自 2014 年起陆续在太浦河沿线干支流布设了若干监测点(见图 1), 其中有 3 个为水量水质自动监测站, 监测频次为 1 次/4h, 仅太浦河界标站监测锑浓度; 8 个为人工监测断面(监测锑浓度), 监测频次为 2 次/周, 在太浦河锑浓度发布预警期间, 人工监测断面监测频次加密为 1 次/d, 人工监测断面室内分析方法采用《铅、锡、钒、磷等 34 种元素的测定》(SL394-2007)。

2 太浦河锑浓度异常事件

锑作为一种具有潜在毒性和致癌性的金属元素, 对人体具有积累毒性, 大量的锑进入水体和土壤, 不仅造成水土环境重金属污染, 而且会对人类和动植物造成危害。因此, 各国都严格控制锑污染物排放标准^[4-7], 制订了相关标准(见表 1)。我国的《锡、锑、汞工业污染物排放标准》(GB 30770-2014) 规定企业锑排放限值为 300 $\mu\text{g/L}$; 《纺织染整工业水污染物排放标准》(GB 4287-2012) 规定企业锑排放限值为 100 $\mu\text{g/L}$;

收稿日期: 2019-11-20

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07207003-03)

作者简介: 林荷娟(1965-), 女, 浙江宁海人, 教授级高级工程师, 硕士, 主要从事太湖流域水文情报预报、水资源管理与保护方面的工作。E-mail: hjljin@tba.gov.cn



a.太浦河位置



b.太浦河监测断面分布情况

图 1 太浦河区域概况示意图

Fig.1 The regional distribution of Taipu River

表1 不同水体锑浓度标准限值

Table1 The standard limits of antimony concentration in different water systems

| 国家 | 标准类型 | 标准限值 / $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ |
|----|--|---|
| 中国 | 集中式生活饮用水及饮用水源地 (GB 3838-2002 地表水质量标准) | 5 |
| | 太浦河沿线污水处理厂出水(江苏省标准) | 50 |
| 美国 | 国家初级饮用水条例(美国环境保护局) | 6 |
| 欧盟 | 生活饮用水 | 5 |
| 德国 | 生活饮用水 | 5 |
| 韩国 | 地表水 | 20 |
| 日本 | 生活饮用水 | 2 |

2018 年江苏省制定了严于国家标准的地方标准,规定太浦河沿线地区, 纺织印染企业直接排放限值为 $50\mu\text{g/L}$ 。即使这样严格的排放标准,企业锑污染物排放限值仍然远远高于水源地对锑浓度的限值 $5\mu\text{g/L}$ ^[8-9]。据分析,当区域发生强降雨时,区域河网水位上涨速度大于太浦河平望站水位, 从而造成太浦河两岸地区印染企业排放的含锑浓度相对较高的污水随雨水进入太浦河;另一方面,太浦河平望站水位上涨速度又大于具有 2338km^2 调蓄面积的太湖水位, 导致太浦闸因闸下水位高于闸上水位形成倒流而被迫关闸, 造成太湖清水无法通过太浦闸向太浦河供给, 稀释作用减弱。在以上两个因素影响下, 太浦河干流易发生锑浓度异常事件(超过 $5\mu\text{g/L}$)。2014~2018 年,太浦河一共发生了 7 次锑浓度异常事件(见表 2),通过及时对太浦河沿线所有的印染企业实施停产或限产以及对太浦闸的优

化调度,有效化解了危机,确保了太浦河水源地的供水安全。

3 太浦河锑浓度异常预警指标分析

3.1 锑浓度异常影响因子分析

根据近年来太浦河锑浓度异常事件分析,在现状企业分布及锑污染物限排标准下,太浦河锑浓度异常通常发生在太浦河两岸区域强降雨发生后^[10-16],因此本文主要分析太浦河锑浓度异常事件前期两岸地区(杭嘉湖区和淀泖区)降雨及太浦闸运行状况,提出预警量化指标^[17-19]。

(1)太浦河锑浓度异常事件前期两岸地区降雨分析。2014~2018 年太浦河 7 次锑浓度异常事件中,其前期杭嘉湖区最大 1d、2d、3d 降雨量统计结果见图 2。由图可知,有 6 次事件:前期最大 1d 降雨量超过 30mm、最大 2d 降雨量达到或超过 50mm、最大 3d 降雨量超过 60mm,其中,最大 1d 降雨量在 30~40mm 的 4 次,在 50~60mm 的 1 次,80mm 以上的 1 次;最大 2d 降雨量在 50~60mm 的 2 次,在 60~70mm 的 2 次,70mm 以上的 2 次;最大 3d 降雨量在 60~70mm 的 2 次,在 70~80mm 的 2 次,80mm 以上的 2 次。综上,当太浦河锑浓度出现异常时,总体上,其前期杭嘉湖区最大 1d 降雨量普遍超过 30mm,最大 2d 降雨量普遍超过 50mm,最大 3d 降雨量普遍超过 60mm。但前期最大 2d 降雨量的量级更加集中,7 次事件的降雨均方差为 15.6mm。

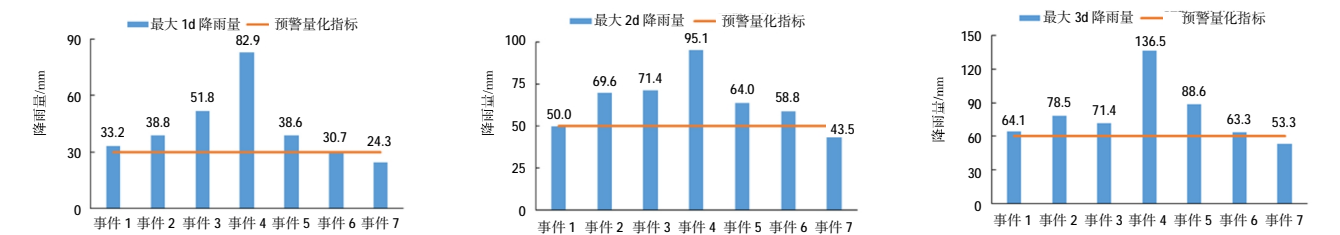
对太浦河锑浓度异常事件前期淀泖区最大 1d、2d、3d 降雨量进行统计(见图 3)。由图可知,7 次事件中有 5 次最大 1d 降雨量超过 30mm,有 4 次最大 2d 降雨量达到或超过 50mm,有 4 次最大 3d 降雨量超过

表2 2014~2018年锑浓度异常事件

Table2 The list of antimony concentration anomaly events during 2014~2018

| 序号 | 发生时间 | 采取的措施 | 事件发生前期 | | | |
|----|-----------------------------|--|-----------|---------------|----------------|------------------------------------|
| | | | 日期 | 杭嘉湖区 降雨/mm | 淀泖区 * 降雨/mm | 太浦闸 运行状态 |
| 1 | 2014 年 7 月 17~21 日 | 对太浦河沿线所有的印染企业实施全面停产,对部分范围内其他印染企业按 50%生产能力进行限产;18 日 11 时开启太浦闸 200m³/s | 7 月 12 日 | 33.2 | 50.4 | 7 月 15 日 14 时 太浦闸关闭 |
| | | | 7 月 13 日 | 12.1 | 0.7 | |
| | | | 7 月 14 日 | 18.8 | 27.3 | |
| | | | 7 月 15 日 | 31.2 | 19.4 | |
| | | | 7 月 16 日 | 3.0 | 0.9 | |
| 2 | 2014 年 8 月 21~22 日 | 对部分印染企业进行限产或停产 | 8 月 16 日 | 28.8 | 19.7 | 8 月 20 日 11 时 太浦闸关闭 |
| | | | 8 月 17 日 | 2.3 | 2.1 | |
| | | | 8 月 18 日 | 38.8 | 32.9 | |
| | | | 8 月 19 日 | 30.9 | 12.0 | |
| | | | 8 月 20 日 | 8.8 | 5.3 | |
| 3 | 2015 年 9 月 30 日~10 月 6 日 | 10 月 3 日 11 时开启太浦闸 50m³/s,4 日 18 时起加大太浦闸供水流量至 80m³/s | 9 月 28 日 | 19.6 | 13.6 | 9 月 29 日 5:30 太浦闸关闭 |
| | | | 9 月 29 日 | 51.8 | 60.1 | |
| 4 | 2016 年 9 月 20~23 日 | 9 月 20 日 19 时起调整太浦闸下泄流量为 80m³/s;22 日 12 时起调整太浦闸下泄流量至 200m³/s | 9 月 13 日 | 41.4 | 23.7 | 9 月 15 日 16:40 太浦闸关闭 |
| | | | 9 月 14 日 | 12.2 | 21.3 | |
| | | | 9 月 15 日 | 82.9 | 71.5 | |
| 5 | 2017 年 6 月 15~17 日 | 6 月 15 日晚,太浦河周边部分区域的纺织、印染企业实施限产措施 (产量减少一半);6 月 15 日 17 时开启太浦河泵站按 250m³/s 向下游应急供水 | 6 月 9 日 | 4.0 | 36.1 | 6 月 11 日 19:50 太浦河水倒灌, 太浦闸关闭 |
| | | | 6 月 10 日 | 13.4 | 33.8 | |
| | | | 6 月 11 日 | 38.6 | 10.4 | |
| | | | 6 月 12 日 | 25.4 | 5.7 | |
| | | | 6 月 13 日 | 24.6 | 14.8 | |
| 6 | 2017 年 6 月 26~28 日 | 6 月 26 日 18 时太浦河泵站开启 1 台机组(50m³/s)应急供水,27 日 12 时起调整为 2 台机组(100m³/s)应急供水 | 6 月 23 日 | 28.1 | 5.3 | 6 月 25 日 17:50 关闸 |
| | | | 6 月 24 日 | 30.7 | 4.2 | |
| | | | 6 月 25 日 | 4.5 | 0.7 | |
| 7 | 2017 年 10 月 17~19 日 | 10 月 16 日 20 时起开启太浦河泵站 1 台机组(50m³/s)供水;17 日 19 时起开启 2 台机组(100m³/s)供水;20 日 10 时起关闭太浦河泵站, 恢复太浦闸供水, 太浦闸按 150m³/s 控制 | 10 月 14 日 | 9.8 | 3.7 | 10 月 16 日 16:30 太浦闸关闭 |
| | | | 10 月 15 日 | 24.3 | 26.1 | |
| | | | 10 月 16 日 | 19.2 | 15.8 | |

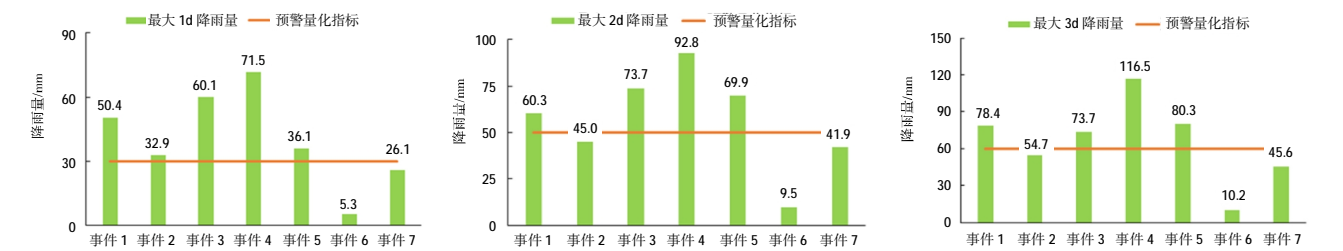
* 注:太浦河两岸地区,包括阳澄淀泖区和杭嘉湖区,其中,阳澄淀泖区以沪宁铁路为界,南北又分成淀泖区和阳澄区。考虑到阳澄区沿江排水能力很强,其降雨不会影响太浦河,因此降雨仅考虑淀泖区;淀泖区降雨以平望、陈墓、苏州、金泽、周巷 5 站降雨算术平均值。



注:红色线为杭嘉湖区最大 1d、2d、3d 降雨预警量化指标。

图 2 太浦河锑浓度异常事件前期杭嘉湖区降雨量

Fig.2 The rainfall in Hangjiahu area before the antimony concentration anomaly events



注:红色线为淀泖区最大 1d、2d、3d 降雨预警量化指标。

图 3 太浦河锑浓度异常事件前期淀泖区降雨量
Fig.3 The rainfall in Dianmao area before the antimony concentration anomaly events

60mm, 其中, 最大 1d 降雨量在 30~40mm 的 2 次, 在 50~60mm 的 2 次, 在 70mm 以上的 1 次; 最大 2d 降雨量在 60~70mm 的 1 次, 在 70mm 以上的 3 次; 最大 3d 降雨量在 70~80mm 的 2 次, 在 80mm 以上的 2 次。综上, 太浦河锑浓度异常事件前期淀泖区最大 1d、2d、3d 降雨关系规律性不强, 总体上降雨量大小比较分散, 7 次事件中最大 2d 降雨量均方差为 25.0mm, 最大值是最小值的 10 倍。

考虑到杭嘉湖区降雨量与太浦河锑浓度关系较为密切, 加上太浦河沿线排放锑污染物的印染企业主要集中在太浦河南岸的杭嘉湖区, 故以杭嘉湖区降雨量作为预警指标; 鉴于杭嘉湖最大 2d 降雨量离散度最小, 因此, 将杭嘉湖区最大 2d 降雨量超过 50mm 作为太浦河锑浓度异常预警量化指标。

(2)太浦河锑浓度异常前期的太浦闸运行状况分析。对 2014~2018 年 7 次太浦河干流锑浓度异常事件前期太浦闸运行状况进行分析, 发现有 6 次锑浓度异常事件发生前太浦闸均处于关闸状态(见表 3), 这 6 次事件也正是杭嘉湖区最大 2d 雨量达到或超过 50mm 的事件, 说明太浦河干流锑浓度异常事件前期基本满

足杭嘉湖区最大 2d 雨量达到或超过 50mm 和太浦闸处于关闸状态。

3.2 预警量化指标验证

根据 2.1 节分析可知, 当杭嘉湖区 2d 累计降雨量达到 50mm 及以上, 并造成太浦闸关闸时, 太浦河干流发生锑浓度异常事件可能性较大, 本节主要采用 2014~2018 年资料验证太浦河锑浓度异常预警量化指标是否合理。据统计, 2014~2018 年, 杭嘉湖区 2d 累计降雨达到 50mm 及以上, 并造成太浦闸关闸(指太浦闸日均流量小于 5m³/s)的有 9 次(见表 3), 其中 6 次发生太浦河锑浓度异常事件, 占总数 67%, 发生概率接近 70%。由此可见, 将杭嘉湖区 2d 累计降雨达到 50mm 及以上, 并可能造成太浦闸关闸(可根据实际上下游水位判断)作为太浦河干流锑浓度异常预警量化指标是合适的, 既可确保不遗漏预警发布, 又不会常出现“有警无险”状况。

4 应对锑浓度异常调度流量分析

当太浦河锑浓度发生异常时, 在对太浦河两岸主要企业限排的同时, 加大太浦河清水供应(即通过太

表3 锑浓度异常预警量化指标验证结果统计
Table3 The verification of th quantitative indexes of antimony concentration anomaly early-warning

| 事件序号 | 发生时间 | 杭嘉湖区 2d 降雨≥50mm | 太浦闸运行状态 | 锑浓度是否异常 |
|------|--------------|-----------------|------------|---------|
| 1 | 2014/6/25~26 | 55.8 | 倒流关闸 | × |
| 2 | 2014/7/14~15 | 50.0 | 倒流关闸 | √ |
| 3 | 2014/8/18~19 | 69.6 | 缓解下游防洪压力关闸 | √ |
| 4 | 2015/9/28~29 | 71.4 | 倒流关闸 | √ |
| 5 | 2016/4/5~6 | 57.3 | 倒流关闸 | × |
| 6 | 2016/9/14~15 | 95.1 | 倒流关闸 | √ |
| 7 | 2017/6/11~12 | 64.0 | 倒流关闸 | √ |
| 8 | 2017/6/23~24 | 58.8 | 倒流关闸 | √ |
| 9 | 2018/8/2~3 | 136.7 | 缓解下游防洪压力关闸 | × |

注:太浦闸闸下水位高于闸上水位,会发生倒流关闸。

浦闸加大太湖下泄水量)^[20],以降低镉污染物浓度,为此,分析太浦河干流金泽断面太湖来水比例是十分重要的,可为有效应对镉浓度异常的调度决策提供重要支撑。2014年2月23日~3月26日,太湖局组织开展了为期一个多月的太浦闸调水试验,试验分三个阶段进行,第一阶段(2月23日~3月3日):太浦闸下泄流量为50m³/s,第二阶段(3月3日~3月18日):太浦闸下泄流量为80m³/s,第三阶段(3月18日~3月26日):太浦闸下泄流量为200m³/s。试验期间在太浦河干流从上至下布置了太浦闸、平望、黎里、北库、金泽(水源地取水断面)5个测流断面(见图4),对每个断面进行了全潮测验,监测资料统计结果见表4。 $Q_1\sim Q_5$ 代表太浦闸至金泽5个断面的流量, $q_{1出}\sim q_{4出}$ 分别代表沿程的出流,假定太湖水下泄过程全程充分混合,则第n个断面太湖来水比例可按式(1)计算。根据表4监测成果,由式(1)可求得不同太浦闸下泄流量条件下,太浦河干流各断面太湖来水比例(见图5)。

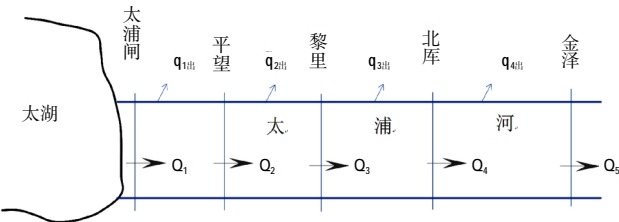


图4 太浦河干流流量监测断面示意图
Fig.4 The flow monitoring sections in the main Taipu River

| 表4 太浦河干流各断面平均流量统计结果(m ³ /s) | | | | | |
|--|------|------|-----|-----|-----|
| Table4 The average flow statistics of the sections in the main Taipu River | | | | | |
| 试验阶段 | 太浦闸 | 平望 | 黎里 | 北库 | 金泽 |
| 第一阶段 | 44.6 | 88.6 | 207 | 212 | 221 |
| 第二阶段 | 86.0 | 150 | 264 | 272 | 274 |
| 第三阶段 | 203 | 235 | 283 | 285 | 273 |

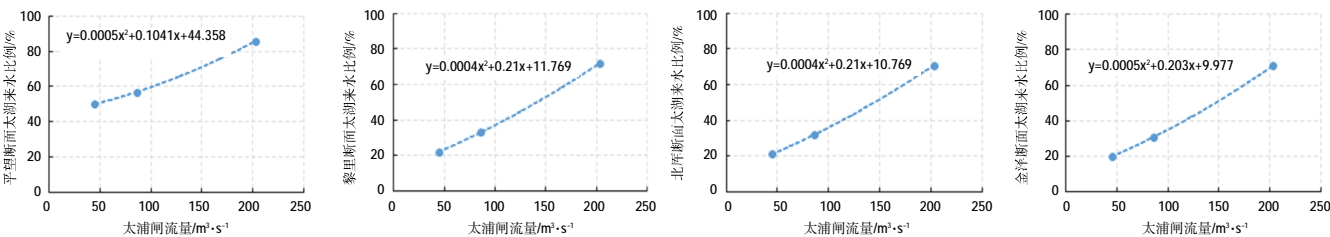


图5 不同太浦闸下泄流量条件下各断面太湖来水比例
Fig.5 The incoming water proportion of the sections under different flow discharges at Taipu sluice

$$\alpha_n=\frac{(Q_1-q_{1出})(Q_2-q_{2出})\cdots(Q_{n-1}-q_{(n-1)出})}{Q_1Q_2\cdots Q_n} \tag{1}$$

式中: α_n 为第n个断面太湖来水比例; Q_n 为第n个断面过水流量(m³/s); $q_{(n-1)出}$ 为第n-1与第n个断面之间的旁侧出流(m³/s)。

由图5可知,当太浦闸下泄流量为50m³/s时,水源地取水口金泽断面太湖来水比例为21.5%;当太浦闸下泄流量为80m³/s时,金泽断面太湖来水比例为29.5%;当太浦闸下泄流量为200m³/s时,金泽断面太湖来水比例为68.6%。同样,可求出其他各断面在不同太浦闸下泄流量下的太湖来水比例。2014年以来7次太浦河镉浓度异常事件基本均发生在太浦闸关闸期间,也就是太浦河水均来自两岸支流,因此,当太浦河某一断面发生镉浓度异常时,为将该断面镉浓度降到安全值(5μg/L),可按式(2)求出该断面太湖来水比例最小需求值,再根据该来水比例由图5查出太浦闸最小供水流量,即对镉浓度异常的调度流量不宜小于该值。

$$(1-\alpha)C_{\text{镉}}<5 \quad \text{即} \quad \alpha>1-\frac{5}{C_{\text{镉}}} \tag{2}$$

式中: $C_{\text{镉}}$ 为超标断面的镉浓度(μg/L); α 为超标断面太湖来水比例;5为饮用水镉浓度限值标准(μg/L)。

为安全起见,一般式(2)中镉浓度安全值按4μg/L控制,即采用式(3):

$$(1-\alpha)C_{\text{镉}}<4 \quad \text{即} \quad \alpha>1-\frac{4}{C_{\text{镉}}} \tag{3}$$

5 结语

在太浦河两岸印染企业镉污染物的排放浓度严格控制条件下,太浦河镉浓度异常与杭嘉湖区强降雨密切相关,根据上述分析,杭嘉湖区2d累计降雨量达到或超过50mm,并预计太浦闸将因降雨而引起关闸时,太浦河干流将出现镉浓度异常的极大风险。因此,将杭嘉湖区2d累计降雨达到50mm及以上,作为太浦河干流镉浓度异常预警量化指标是合适的。一旦太浦

河干流锑浓度出现异常,如金泽断面锑浓度达到 $5\mu\text{g/L}$ 时,为将锑浓度降至安全值,根据以上分析可以计算得到太浦闸下泄流量不应小于 $50\text{m}^3/\text{s}$; 金泽断面锑浓度达到 $8\mu\text{g/L}$ 时,太浦闸下泄流量不应小于 $150\text{m}^3/\text{s}$ 。当太浦闸流量不能满足时,启用太浦河泵站供水。

2017 年 12 月,太湖流域管理局会同太浦河两岸地区江苏、浙江、上海的省市县水利、环保部门研究制定了《太浦河水资源保护省际协作机制——水质预警联动方案》,本文的研究成果已应用于其中,即当杭嘉湖区连续两日降雨累计达 50mm 及以上,由太湖局向各协作机制成员单位发布预警信息;一旦出现太浦河干流锑浓度异常,当地政府视情况对印染企业采取限产、停产等措施,太湖局依据以上分析成果实施太浦河闸泵联合调度,确保水源地供水安全。

由于调水试验资料有限,本文分析得到的结论仅仅是初步的,建议今后积累一定的资料后,进一步深化分析,完善结论。

参考文献:

- [1] 孙晓宇,杨雾晨,唐晓迪,等.太浦河流域锑污染环境风险评估[J]. 环境保护科学, 2017,53 (3):120-124. (SUN Xiaoyu, YANG Wuchen, TANG Xiaodi, et al. Environmental risk assessment of antimony pollution in Taipu River Basin [J]. Environmental Protection Science, 2017,53(3):120-124. (in Chinese))
- [2] 李威,周尚平,邹骏华,等.以印染废水为主的城镇污水处理厂锑污染源特征分析[J]. 浙江大学学报(理学版), 2018,45(5):569-575. (LI Wei, ZHOU Shangping, ZOU Junhua, et al. Analysis on the origin of antimony pollution in urban sewage treatment plant mainly engaged in printing and dyeing wastewater [J]. Journal of Zhejiang University (Science Edition), 2018,45(5):569-575. (in Chinese))
- [3] 周宏伟,黄佳聪,高俊峰,等.太湖流域太浦河周边区域突发水污染潜在风险评估[J]. 湖泊科学, 2019,31(3):646-655. (ZHOU Hongwei, HUANG Jiacong, GAO Junfeng, et al. Potential risk assessment for water pollution accident in Taipu River region, Taihu Basin [J]. Journal of Lake Sciences, 2019,31(3):646-655. (in Chinese))
- [4] 成应向,李小娇,向仁军,等. Bacillus sp.处理锑矿选矿废水的优化试验[J].水资源保护, 2012,28(2):62-64. (CHENG Yingxiang, LI Xiaojiao, XIANG Renjun, et al. Experimental study of optimization of antimony ore-processed wastewater treatment by Bacillus sp. [J]. Water Resources Protection, 2012,28(2):62-64. (in Chinese))
- [5] Gabriela Ungureanu, Sílvia Santos, Rui Boaventura, et al. Arsenic and antimony in water and wastewater: overview of removal techniques with special reference to latest advances in adsorption [J]. Journal of Environmental Management, 2015.
- [6] Thai Anh Nguyen, Ruey-Shin Juang. Treatment of waters and wastewaters containing sulfur dyes: a review [J]. Chemical Engineering Journal, 2013.
- [7] Fang Han, Venkata S R Kambala, Madapusi Srinivasan, et al. Tailored titanium dioxide photocatalysts for the degradation of organic dyes in wastewater treatment: a review [J]. Applied Catalysis A:General, 2009,359(1-2):25-40.
- [8] 魏艳红.《有色金属工业污染物排放标准—锑》的研究 (学位论文) [D]. 昆明:昆明理工大学, 2006. (WEI Yanhong. Emission Standards of Pollutants from Nonferrous Metals Industry-Sb (Dissertation) [D]. Kunming: Kunming University of Science & Technology, 2006. (in Chinese))
- [9] 赵霞,罗培松,相巧明.绍兴市典型印染废水中重金属锑排放现状及排放源调查[J].中国环境监测, 2016,32(4):91-97. (ZHAO Xia, LUO Peisong, XIANG Qiaoming. Vestigation on the emission situation and the source of heavy metals antimony in typical dyeing wastewater of Shaoxing [J]. Environmental Monitoring in China, 2016,32(4):91-97. (in Chinese))
- [10] 周峰,曹明明,柯凡,等.巢湖流域塘西河上游分流制系统降雨径流污染特征及初期冲刷效应[J]. 湖泊科学, 2017,29(2):285-296. (ZHOU Feng, CAO Mingming, KE Fan, et al. Analysis of pollution characteristics and first flush effect in rainfall runoff in separate storm sewer system in upstream of Tangxi River, Chaohu Catchment [J]. Journal of Lake Sciences, 2017,29(2):285-296. (in Chinese))
- [11] 王宇翔,杨小丽,胡如幻,等.常州市湖塘纺织工业园降雨径流污染负荷分析[J].水资源保护, 2017,33(3):68-73. (WANG Yuxiang, YANG Xiaoli, HU Ruhuan, et al. Analysis of rainfall-runoff pollution load of Hutang textile industrial park in Changzhou City [J]. Water Resources Protection, 2017,33(3):68-73. (in Chinese))
- [12] 冯麒宇,胡海英,黄国如.潭江泗合水流域降雨径流非点源污染特征分析[J].水资源保护, 2016,32(3):143-148. (FENG Qiyu, HU Haiying, HUANG Guoru. Analysis of characteristics of non-point source pollution in rainfall-runoff process in Siheshui watershed of Tanjiang Valley [J]. Water Resources Protection, 2016,32(3):143-148. (in Chinese))
- [13] 韦雨婷,逢勇,罗缙,等.苏南运河对太湖主要入湖河流污染物通量的贡献率[J].水资源保护, 2015,31(5):42-46. (WEI Yuting, PANG Yong, LUO Jin, et al. Study on pollutant flux contribution rate of Sunan Canal to main inflow rivers of Taihu Lake [J]. Water Resources Protection, 2015,31(5):42-46. (in Chinese))
- [14] 罗缙,逢勇,林颖,等.太湖流域主要入湖河道污染物通量研究[J].河海大学学报(自然科学版), 2005,33(2):131-135. (LUO Jin, PANG Yong, LIN Ying, et al. Study on flux of pollutants discharged into Taihu Lake through main inflow river channels [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2005,33(2):131-135. (in Chinese))
- [15] 马倩,刘俊杰,高明远.江苏省入太湖污染量分析(1998-2007 年)[J].湖泊科学, 2010,22(1):29-34. (MA Qian, LIU Junjie, GAO Mingyuan. Amount of pollutants discharged into Lake Taihu from Jiangsu Province, 1998-2007 [J]. Journal of Lake Sciences, 2010,22(1):29-34. (in Chinese))
- [16] 谷孝鸿,曾庆飞,毛志刚,等.太湖 2007-2016 十年水环境演变及“以渔改水”策略探讨[J]. 湖泊科学, 2019,31(2):305-318. (GU

- Xiaohong, ZENG Qingfei, MAO Zhigang, et al. Water environment change over the period 2007–2016 and the strategy of fishery improve the water quality of Lake Taihu [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2019,31(2):305–318. (in Chinese))
- [17] Richard W GULLICK, Leah J G, Christopher S C. Developing regional early warning systems for US Source Waters [J]. *Journal: American Water Works Association*, 2004,96(6):68–82.
- [18] 李保刚,周克梅,林涛,等.水源地保护及突发性水污染事件预警应急的研究与实施进展[J]. *水资源保护*, 2008,24(1):87–91. (LI Baogang, ZHOU Kemei, LIN Tao, et al. Review of water source areas conservation and early warning system for emergent water pollution accidents [J]. *Water Resources Protection*, 2008,24(1):87–91. (in Chinese))
- [19] 孔繁翔, 马荣华, 高俊峰,等.太湖蓝藻水华的预防、预测和预警的理论与实践[J]. *湖泊科学*, 2009,21(3):314–328. (KONG Fanxiang, MA Ronghua, GAO Junfeng, et al. The theory and practice of prevention, forecast and warning on cyanobacteria bloom in Lake Taihu [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2009,21(3):314–328. (in Chinese))
- [20] 吴浩云,朱灵芝.太浦河流量对下游水源地水质的影响[J]. *水资源保护*, 2008,24(3):42–45. (WU Haoyun, ZHU Lingzhi. Influence of the discharge of the Taipu River on water quality in the lower water source area [J]. *Water Resources Protection*, 2008,24(3):42–45. (in Chinese))

Analysis on Early-warning Indexes for Antimony Concentration Anomaly in Taipu River

LIN Hejuan, GAN Yueyun, LIU Min

(Bureau of Hydrology (Information Center), Taihu Basin Authority, Shanghai 200434, China)

Abstract: The Taipu River has along been focused on its ammonia nitrogen concentration as it is an important water supply channel in Taihu Lake basin. Alarms were raised over the safety of the water supply due to the incidents which antimony concentration anomaly frequently occurred during 2014–2018. According to the practice in recent years, and under the strict control of antimony discharge standard, the antimony concentration anomaly in Taipu River is closely connected with the regional rainfall intensity. The results show that the early-warning of antimony concentration anomaly is indicated when 2-day cumulative precipitation reach or exceed 50mm in Hangjiahu area, and the probability of antimony concentration anomaly is increasing when the Taipu sluice is closed by the heavy rainfall. Besides, this paper provided effective methods on antimony concentration anomaly for water supply flow at Taipu sluice.

Key words: Taipu River; antimony; rainfall; early-warning index

(上接第 78 页)

Variation of Soil Moisture and Its Relation with Precipitation of Permafrost and Seasonally Frozen Soil Regions on the Qinghai-Tibet Plateau

WU Xiaoli^{1,2}, LIU Guimin¹, LI Xinxing¹, JI Genghao¹, LI Lisha¹, MAO Nan¹, XU Haiyan¹, WU Xiaodong²

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. Cryosphere Research Station on the Qinghai-Tibet Plateau, State Key Laboratory of Cryospheric Science, Northwest Institute of the Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Based on the field observation data to calibrate the Climate Change Initiative (CCI) soil moisture products released by the European Space Agency (ESA) and the meteorological data from the Qinghai-Tibetan Plateau (QTP) and its surrounding areas, this paper analyzed the soil moisture changes and its relationship with precipitation. The results show that, (1) Soil moisture on the QTP retrieved by the calibrated CCI products has high accuracy, and the annual changes of soil moisture in permafrost areas are more stable than that in seasonally frozen soil areas during warm seasons from 1986 to 2016; (2) Spatial distribution of soil moisture in the plateau is highly consistent with the distribution of precipitation, and precipitation is the main controlling factor for soil moisture in the region. Moreover, the correlation coefficients between soil moisture and precipitation in permafrost regions during the warm seasons are lower than that in seasonally frozen ground areas. This can be partly explained that the permafrost existence could stabilize soil moisture. In addition, permafrost has important effects on soil moisture, and permafrost degradation caused by climate warming will reduce the stabilization of soil moisture and further deteriorate the ecosystem and hydrological cycle on the QTP.

Key words: Qinghai-Tibet Plateau; permafrost; soil moisture; CCI products; precipitation