环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社

2020

Vol.41 No.12

第41卷 第12期

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第41卷 第12期
2020年12月15日

目 次(卷终)

Eco-Environmental Knowledge Web
环 境 科 学
Environmental Science
第41卷第12期 2020年12月
Vol.41, No.12 Dec., 2020

新水沙条件下长江中下游干流水体总磷时空变化分析

卓海华, 娄保锋, 吴云丽, 王瑞琳, 陈杰, 兰静*
(生态环境部长江流域生态环境监督管理局生态环境监测与科学研究中心, 武汉 430010)

摘要: 长江干流三峡及上游水库群陆续建成运行后,中下游干流水体已形成新的水沙条件,其对水体磷含量的影响备受关注. 为此,研究了新水沙条件下中下游干流总磷浓度的时空分布特征. 结果表明:①三峡蓄水后,长江中下游干流水体 TCP(澄清30min 样品)浓度基本在 0.10 ~ 0.15 mg·L^{-1}之间变动,在时间尺度上总体呈先上升后降低趋势,在空间尺度上沿程呈现升高趋势; 水体中溶解态总磷(TDP)浓度随时间推移缓慢升高. ②水体中可沉降固体对不同江段水体中磷含量存在不同程度影响,南津关、汉口和吴淞口下 23 km 这 3 个断面 TCP/TP 比值中位值分别为 0.900、0.720 和 0.609,从上游到下游依次降低; 水体中溶解态总磷(TDP)占总磷(TP)比例沿程呈下降趋势,而颗粒磷(TPP)占总磷(TP)比例沿程呈上升趋势,南津关、汉口、吴淞口下 23 km 等 3 个断面 TPP/TP 比值中位值分别为 0.439、0.567 和 0.738. ③按照《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)要求,以 TCP 浓度进行水质评价,评价结果显示长江中下游干流水质总体良好. 但若考虑水体中可沉降固体影响,以水体总磷(TP)浓度进行评价,会得出相对较差的结果,尤其是在靠近河口段. ④长江中下游干流主河道靠上游河段不同监测断面内部各测线、测点磷浓度差异较小,河口附近则差异明显. ⑤长江中下游干流城市江段近岸水域水体中 TCP 浓度明显高于相应河段主河道常规监测结果,局部河段存在明显岸边污染带.

关键词:新水沙条件; 长江中下游; 干流; 总磷; 时空变化
中图分类号: X522 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2020)12-5371-10 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.202005108

Temporal and Spatial Characteristics of Total Phosphorus in the Middle and Lower Yangtze River Mainstem Under New Water and Sediment Conditions

ZHUO Hai-hua, LOU Bao-feng, WU Yun-li, WANG Rui-lin, CHEN Jie, LAN Jing*
(Yangtze River Basin Ecological Environment Monitoring and Scientific Research Center, Yangtze River Basin Ecological Environment Supervision and Administration Bureau, Ministry of Ecological Environment, Wuhan 430010, China)

Abstract: After the completion of the Three Gorges Reservoir and the upstream reservoir group of the Yangtze River, new water and sediment conditions appeared in the middle and lower reaches of the Yangtze River, and its influence on the phosphorus concentrations in water has attracted much attention. Therefore, the spatial and temporal distributions of total phosphorus (TP) concentrations in the middle and lower reaches of the mainstem under the new water and sediment conditions were studied. The results show that: ① after the construction of the Three Gorges Reservoir, the concentrations of TCP (samples were allowed to settle for 30 min) in the middle and lower reaches of the Yangtze River fluctuates between 0.10 and 0.15 mg·L^{-1}, and generally increased during 2004-2010 and then decreased during 2014-2019, and increases along the flow direction. The concentrations of dissolved total phosphorus (TDP) have slowly increased with time. ② The settleable solids influence the phosphorus content to varying degrees. The median values of TCP/TP ratio in Nanjinguan, Hankou, and 23 km below Wusongkou, are 0.900, 0.720, and 0.609, respectively, which decreases successively from upstream to downstream. The proportion of TPP (total particulate phosphorus)/TP shows an increasing trend along the flow direction. The median values of TPP/TP ratios in Nanjinguan, Hankou, and 23 km below Wusongkou were 0.439, 0.567, and 0.738, respectively. ③ According to the "Environmental quality standard for surface water GB 3838-2002", the water quality was assessed using TCP concentrations, and the assessment results showed that the water quality of the middle and lower reaches of the Yangtze River was generally good. However, considering the influence of settleable solids, the water quality categories assessed based on TP concentrations would be worse, especially near estuaries. ④ In the middle and lower reaches of Yangtze River, there is little difference in the phosphorus concentration of different monitoring sites in the upper section of main stream; however, the difference is obvious near the estuary. ⑤ The concentration of TCP in the coastal waters of the urban river section of the middle and lower reaches of the Yangtze River is significantly higher than that of the main channel, and there are obvious coastal pollution zones in the coastal waters of the urban river section.

Key words: new water and sand conditions; the middle and lower reaches of the Yangtze River; mainstem; total phosphorus; spatial and temporal variations

长江干流全长约6 300 km,其中宜昌市以上为上游,宜昌市至湖口县为中游,湖口县至出海口为下游. 三峡工程自 1994 年正式动工兴建,三峡水库经历了 135、156 和 172 m 高程试验性蓄水后,至 2010 年成功蓄水至 175 m 高程[1]. 此后,三峡水库一直在 145 ~ 175 m 高程运行. 另外,长江上游金沙江段系列大型水电站如鲁地拉、观音岩、溪洛渡、向家坝

收稿日期: 2020-05-11; **修订日期**: 2020-06-16
基金项目: 国务院三峡工程建设委员会办公室三峡水库运行维护管理资金项目(JJ2015-008)
作者简介: 卓海华(1978 ~),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为流域水环境监测评价,E-mail: zhuohaihua@cjjg.mee.gov.cn
* 通信作者,E-mail: lanjing@cjjg.mee.gov.cn

等水电站也于 2013 年前后陆续建成并下闸蓄水. 这一系列大型水利工程的建设运行对长江中下游水文情势产生了重要影响. 长江中下游干流宜昌、汉口和大通等主要控制站 2003 ~ 2018 年年平均含沙量与 2000 年前相比,减少比例在 68.2% ~ 92.5% 之间[2]; 三峡大坝以下江水中悬浮物含量也随之显著减少,悬浮物浓度 2003 ~ 2019 年年均值与 1998 ~ 2002 年相比,南津关断面下降近 90%,汉口 37 码头和吴淞口下游 23 km 等断面也下降超过 50%[3]. 因此, 2003 年后,长江中下游干流水体已形成新的水沙条件.

泥沙条件的变化将使得污染物在长江中下游干流水体中的输移扩散发生相应变化. 磷是最重要的营养盐之一,易于被水体中悬浮泥沙吸附并随之迁移,其在水体中一部分以溶解态存在,一部分以吸附态存在于悬浮泥沙颗粒上. 若不考虑其他因素,磷元素一方面会随着悬浮物/泥沙颗粒的沉降到达沉积物中,另一方面又会因各种因素从沉积物中进入水体. 水体悬浮物/泥沙含量的锐减将对长江中下游干流水体中磷浓度产生重要影响. 长江中下游水文条件复杂,沿江城市众多,经济相对较发达,承载着众多的人口. 人群社会经济活动中磷排放也会对干流水体磷分布造成影响. 目前已有对相关区域局部河段/时段磷元素分布及通量等调查分析[4~11],但鲜见关于新水沙条件下长江中下游干流水体中磷浓度时空变化特征的系统性研究.

鉴于此,在新的水沙条件,本文通过对 2004 ~ 2019 年三峡成库后长江中下游干流水体监测成果的分析,主要聚焦于:①水体中磷浓度时空变化特征; ②可沉降固体对磷含量分布影响; ③不同江段监测断面内各测线、测点磷浓度不均匀性; ④沿江主要城市近岸水域中磷浓度变化等方面情况进行研究. 通过分析,以期为全面了解长江中下游干流水域磷污染状况和客观回应社会关切提供基础数据支持.

1 材料与方法

1.1 研究范围及断面设置

综合考虑水文特征,结合城市分布和河道特征等因素,在长江中下游干流选取南津关、宜昌水文测流、监利螺山、汉口 37 码头、黄石西塞山、武穴闸、九江化工厂下游、湖口江心洲、大通水文测流、马鞍山新水泵房、南京石化下游、镇江青龙山、常熟徐六径、白茆口、上海石洞口和吴淞口下 23 km 等 16 个断面进行调查监测. 在监测过程中,参照《水环境监测规范》(SL 219),在每个断面设置 2 ~ 3 条垂线、每条垂线根据水深设置 2 ~ 3 个采样点,采用船载深水采样器分层采集水样. 采样断面布设见图 1.

图 1 监测断面位置示意

Fig. 1 Schematic diagram of monitoring section locations

长江中下游河道较宽,近岸水域与主干有着不同的水流流态和扩散条件. 按照相关监测规范[12~14],常规监测过程中一般会在断面布设至少 3 条垂线,且垂线的布设均明确要求避开污染带; 若要监测污染带应另加垂线. 为分析近岸水域水体中总磷变化趋势,在宜昌至上海间的 32 个城市江段,采用网格法,纵向间隔每 2 ~ 4 km 设置一个监测断面. 结合实际岸线条件,在宜昌至九江等 15 个城市江段以距岸边 50 m 为布点控制线,在距岸 10 ~ 20 m 和 30 ~ 50 m 处各布设 1 个监测点; 安庆至张家港等 13 个城市江段以距岸 100 m 为布点控制线,在距岸边 30 ~ 50 m 和 70 ~ 100 m 处各布设 1 个监测点; 南通至上海等 4 个城市江段以距岸边1 500 m为布点控制线,在距岸边 100 ~ 700 m 和 900 ~ 1 500 m处各布设 1 个监测点. 同时,在支流汇入点和排污口排放点上下游等区域适当增设监测断面/点. 在水面下 0.5 m 处进行采样.

1.2　监测时段及样品检测

总体来讲，长江干流泥沙含量较大，尤其是汛期．为减少泥沙带来的影响[15]，《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)要求在测定总磷等参数时，水样采样后静置 30 min，取上层非沉降部分检测 TCP 浓度(total phosphorus after 30 min clarification)．因此，为分析新水沙条件下长江中下游干流水体中总磷浓度时空变化，避免标准实施前后对分析结果的影响，在分析时，选取了 2004～2019 年间各断面每月 TCP 检测结果．近岸水域水体中磷污染状况调查监测在 2016 年 4 月至 2017 年 3 月间进行，也分析水样澄清 30 min 总磷(TCP)．

为进一步分析不同河段在三峡水库蓄水后，水沙条件改变对水库下游河段水体中总磷浓度分布影响，选取南津关、汉口 37 码头断面及吴淞口下 23 km(河口区域)这 3 个断面，对水体采集的原样、过滤样(采用 0.45 μm 的醋酸纤维膜对原样过滤)和澄清 30 min 水样进行检测，分别得到水体总磷(TP)、溶解态总磷(TDP)和澄清 30 min 后总磷(TCP)浓度．同时测定水样中悬浮物浓度．

总磷检测采用《水质 总磷的测定 钼酸铵分光光度法》(GB 11893-1989)，在中性条件下用过硫酸钾消解，将所含有的磷酸盐全部氧化成正磷酸盐，显色反应后采用分光光度法检测．悬浮物测定采用《水质 悬浮物的测定 重量法》(GB 11901-1989)，水样通过 0.45 μm 滤膜过滤后，将截留在滤膜上固体物质在 103～105℃烘干至恒重．

1.3　数据处理

数据经过检查、剔除异常值等处理后，采用 Microsoft Office Excel 2010 软件进行处理、统计和分析．

2　结果与讨论

2.1　沿程时空分布

根据监测成果，对监测断面进行统计分析．

2.1.1　时间变化

长江中下游干流水体 TCP(澄清 30 min)浓度随时间变化趋势见图 2．2004 年以来，长江中下游干流水体中 TCP 浓度主要在 0.10～0.15 mg·L^{-1}之间变动，总体呈先上升后降低的趋势，TCP 浓度在 2010 年前呈波动上升，2010～2013 年间持续在较高浓度水平波动，2014 年后趋于下降态势，至 2019 年 TCP 浓度已低于 0.1 mg·L^{-1}．不同水期 TCP 浓度呈现出交错关系，但基本上与断面均值变化趋势类似．水体中悬浮物含量对 TCP 浓度的影响也显现出来，较明显的时段如 2006 年丰水期，该年度丰水期水体中悬浮物浓度大幅低于其相近年份[3]，这可能是导致 TCP 浓度出现极低值的主要原因之一．若按照《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)对长江中下游水体中磷污染情况进行评价，新水沙条件下，各水期及年度 TCP 浓度均值符合Ⅱ～Ⅲ类标准，总体较好，此时总磷不是水质控制因子．

磷在水体中主要以溶解态磷酸盐和颗粒态磷酸盐的形式存在．值得注意的是，按照《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)，水样采集后静置 30 min 后取上层清液进行分析．在静水中部分磷会随着可沉降颗粒沉降，此时水样中磷酸盐浓度会降低．对于长江这种含沙量较大的河流，水体中总磷(TP)浓度通常会高于 TCP 浓度．因此，采用 TCP 浓度进行水质评价，没有考虑可沉降颗粒中磷酸盐的影响；

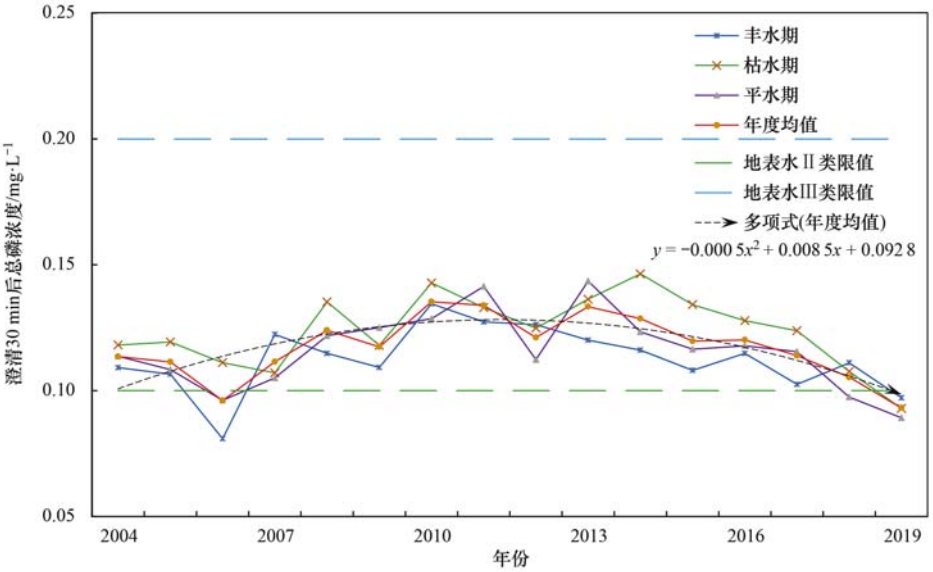

图 2　长江中下游干流水体中 TCP 浓度随时间变化趋势分析

Fig. 2　TCP concentration changed with time in the middle and lower mainstem of the Yangtze River

若以水体总磷(TP)测定结果进行评价,可能会得出较以 TCP 浓度评价差的结果. 按照中国环境监测总站最新发布的《地表水总磷现场前处理技术规定(试行)》[16],在浊度大于 200 NTU 的一般水体或类似于长江河口附近感潮河段,水样现场静水沉降时间将延长或须离心处理. 此时,处理方式将对水体常规监测中磷浓度及水质评价结果产生更明显影响,尤其在丰水期和下游感潮河段. 水体 TCP 与 TP 浓度之间的关系将在后文中进一步探讨.

2.1.2 沿程变化

长江中下游干流沿程水体澄清 30 min 总磷(TCP)浓度变化见图 3. 2004 年以来,南津关以下河段,各断面水体中 TCP 浓度多年均值主要在 0.10 ~0.15 $mg \cdot L^{-1}$之间波动. 在中游干流各断面多年均值极大值出现在九江化工厂下断面,为 0.133 $mg \cdot L^{-1}$; 极小值出现在武穴闸断面,为 0.092 $mg \cdot L^{-1}$. 下游干流各断面多年均值极大值出现在河口的吴淞口下 23 km 断面,为 0.145 $mg \cdot L^{-1}$; 极小值出现在江苏徐六泾断面,为 0.104 $mg \cdot L^{-1}$. 平水期各断面 TCP 浓度一直处于丰水期和枯水期之间,且在宜昌下游各断面与多年均值基本持平,在南津关及宜昌断面则明显低于断面年度均值. 水体中 TCP 浓度,丰水期在南津关、宜昌断面显著高于枯水期,而在宜昌以下各断面这种趋势发生反转,从螺山直到河口各断面均为枯水期大于丰水期. 在螺山至白茆口的各断面,除个别点位外,长江干流沿程水体中 TCP 浓度值在丰水期、枯水期、平水期变化趋势基本一致; 但吴淞口下 23 km 断面枯水期与丰水期 TCP 浓度差值明显增大. 各水期 TCP 浓度多年均值除吴淞口下 23 km 断面枯水期达到 0.163 $mg \cdot L^{-1}$ 外,其余均未超过 0.15 $mg \cdot L^{-1}$. 若按照《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)进行评价,新水沙条件下,各断面在不同水期 TCP 浓度多年均值也符合Ⅱ~Ⅲ类标准,且以Ⅲ类为主.

总体上, 长江中下游干流水体中 TCP 浓度沿程呈现升高趋势. 各水期也不同程度呈现这种趋势,但存在一定差异,枯水期这种趋势最显著,平水期其次,丰水期最弱. 从图 3 中可以看出,一方面河道特征会引起水流条件变化,使得水体泥沙/悬浮物发生变化,进而影响水体 TCP 浓度; 另一方面,社会经济活动如城市分布、污水排放和农业面源等也会影响其浓度,如在汉口、九江、南京和上海等河段 TCP 浓度出现升高. 不同水期这种影响也不尽相同. 如南津关和宜昌断面,受三峡水库和葛洲坝水库运行影响,水体中丰水期总磷浓度显著高于枯水期和平水期; 湖北枝江到湖南城陵矶一段,江苏镇江以下河段,地势平坦,河道变宽,尤其是靠近河口段,江水水流流速缓慢,水体中悬浮物浓度因沉降而降低,部分颗粒磷会随之进入沉积物. 另外,长江河口干流还会受到潮汐现象的影响,这在后文中将进一步分析. 图 3 中所反映的 TCP 浓度变化趋势即是人类活动及各种自然因素综合作用的结果.

2.2 代表断面分析

选取南津关、汉口和吴淞口下 23 km 这 3 个断

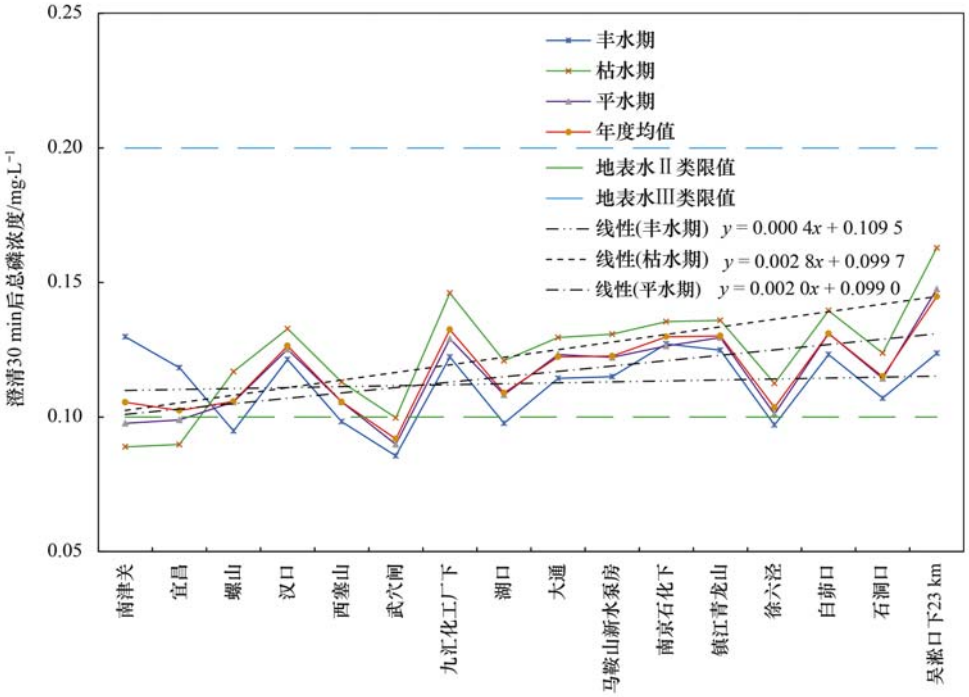

图 3 长江中下游干流水体中 TCP 浓度沿程变化趋势分析

Fig. 3 TCP concentration variation in the course of the middle and lower mainstem of the Yangtze River

面对水体中 TP、TDP 和 TCP 浓度进行分析，以阐述可沉降固体对磷浓度分布影响和其在不同江段横向剖面内的不均匀性．为了更好地开展比较分析，本文将上述断面监测成果分析时段前移到蓄水前的 1998 年．

2.2.1　时间变化

可沉降固体对磷浓度分布影响见图 4．从图 4(a)可以看出，2002 年之前，南津关断面 TP 变化较大，浓度在 0.132～0.212 mg·L^{-1}之间波动．此时三峡枢纽尚未截流，水体总磷浓度基本未受筑坝影响．2002 年后，南津关断面水体 TP 快速下降，至 2006 年达到最低值 0.083 mg·L^{-1}；2006 年后，在 0.11 mg·L^{-1}附近波动．从 2006～2019 年，该断面 TP 浓度总体呈上升趋势，但仍显著低于三峡水库 2003 年 135 m 蓄水前水平．汉口断面 TP 浓度在 0.103～0.216 mg·L^{-1}之间变动．2003 年之前，仅 1999 年水体 TP 浓度较高，达到 0.166 mg·L^{-1}外，其余年份均较低；2004～2013 年，其浓度处于较高水平，均高于 0.16 mg·L^{-1}；其后快速振荡下降，至 2019 年回复至 2003 年前浓度水平．南津关断面与汉口断面 TP 浓度在 2003 年后首次发生逆转，其后汉口断面 TP 浓度持续显著高于前者，直至 2019 年两者浓度再次发生逆转，但两者差值变小．吴淞口断面 TP 浓度 1998～2000 年均低于 0.15 mg·L^{-1}；自 2001 年后均高于 0.16 mg·L^{-1}，且变幅较大，呈现出“一底多峰”情形，峰顶分别出现在 2003、2008、2010(最高值 0.47 mg·L^{-1})和 2017 年．2005 年前，吴淞口下 23 km 断面与南津关、汉口断面总磷浓度尚有交集，但 2005 年之后均高于这两个断面．

TDP 浓度变化见图 4(b)．南津关和汉口两个断面 TDP 浓度差别不显著，多年均值分别为 0.068 mg·L^{-1}和 0.069 mg·L^{-1}；吴淞口下 23 km 断面多年均值稍低，为 0.053 mg·L^{-1}．除南津关断面个别年份 TDP 浓度较高外，3 个断面 TDP 浓度波动不大，但总体均呈上升趋势．TCP 浓度变化情况见图 4(c)．《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)2002 年 6 月实施后，大部分监测机构才开始按照新标准监测水体 TCP．3 个断面 TCP 浓度变化趋势和 TP 浓度变化趋势总体相似，但变动幅度显著小于 TP，且 2012 年后其变化趋势趋同、浓度差异显著缩小．

为了更好地说明长江中下游中 TP、TDP 和 TCP 三者之间的关系，研究时段 TCP/TP、TDP/TP 和 TPP/TP 比值关系见图 4(d)．TDP 浓度是水样经过 0.45 μm 滤膜过滤后的检测结果，基本不受悬浮物/泥沙含量的影响．TP 浓度与 TDP 浓度的差值即水体中颗粒磷(TPP)浓度．

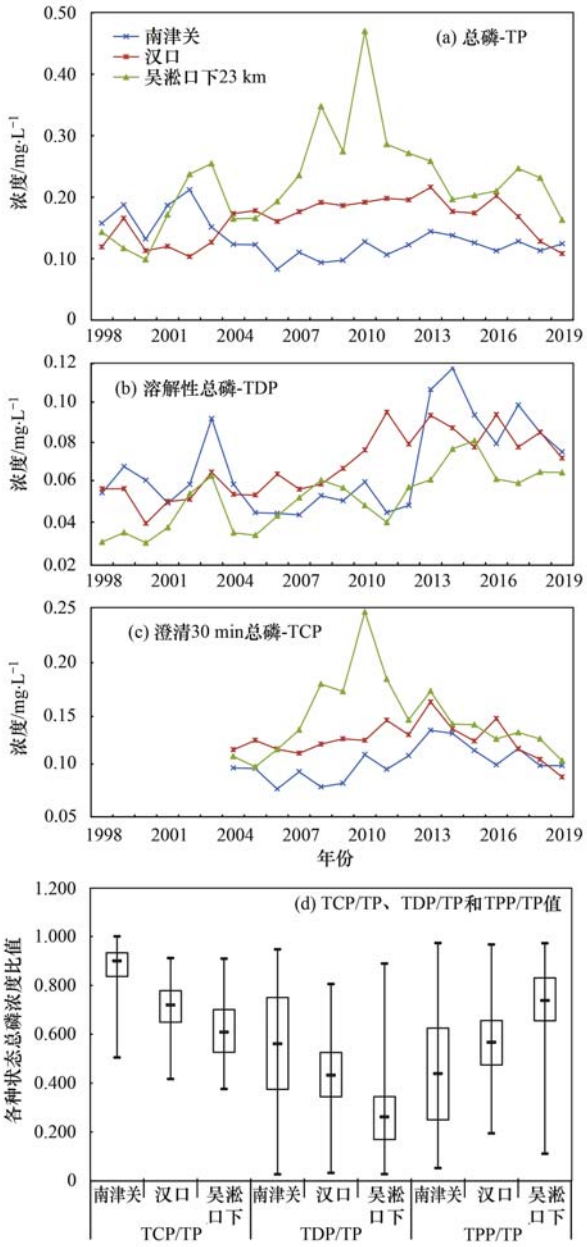

图 4　长江中下游干流主要控制断面水体中 TP、TDP、TCP 浓度及 TCP/TP、TDP/TP、TPP/TP 时空特征

Fig. 4　Spatial and temporal variation in concentrations of TP, TDP, TCP, and TDP/TP, TCP/TP, and TPP/TP at the main control sections in the middle and lower mainstem of the Yangtze River

南津关、汉口和吴淞口下 23 km 这 3 个断面 TCP/TP 比值相对比较收敛，其中位值分别为 0.900、0.720 和 0.609，沿河道从上游到下游依次降低．TP 与 TCP 之间的差值，即样品在采集后静置 30 min 后，包含(或吸附)在可沉降颗粒物中(或上)的磷酸盐．水体中悬浮物颗粒大小、形状、含沙量、颗粒构成及温度、含盐量等，均有可能对沉降造成影响[17]．若以各断面 TCP/TP 比值中位值估算相应河段水体中 TP 浓度，则长江中下游水体中沿程 TP 浓度上升趋势将更加显著，即图 3 中各条趋势线将可能有更大的斜率．这需要引起足够的关注．

长江中下游不同江段水体溶解态总磷和颗粒态总磷浓度比例不同,溶解态总磷沿程呈下降趋势,颗粒态磷浓度则呈上升态势. TDP/TP 值较发散,在 TDP 浓度变幅较小、总体趋于小幅升高的情况下,这也可以间接说明长江中下游不同河段、时间段水体中单位重量悬浮物颗粒中磷(TPP)含量变化较大. 新水沙条件下,南津关断面以溶解态磷(TDP)为主,2003 ~2019 年,其 TDP/TP 比值中位值达到 0.561;而汉口和吴淞口下 23 km 断面以(TPP)为主,TPP/TP 比值中位值则分别达到 0.567 和 0.738.

为进一步说明新水沙条件对磷浓度分布影响,对三峡水库蓄水前后长江中下游干流主要控制断面悬浮物、TP 和 TDP 浓度变化进行统计,结果见表 1. 从中可知,南津关、汉口、吴淞口下 23 km 断面悬浮物和 TP 浓度均发生了较大变化. 2003 年后,南津关断面悬浮物浓度较之前大幅下降,尤其是丰水期和平水期,下降接近 90%,枯水期也超过 80%. 与此同时,该断面 TP 浓度也出现大幅下降,且平水期下降幅度最大,降幅近 40%;丰水期其次,约为 32%;枯水期下降约 17%. 汉口断面悬浮物浓度枯水期下降约 21.6%,平水期下降 54.2%,丰水期则大幅下降 66.2%. 但与此同时,汉口断面枯水期 TP 浓度大幅上升 54.5%,平水期和丰水期均上升约 30%. 吴淞口下 23 km 断面悬浮物浓度枯水期、平水期、丰水期下降分别为 52.7%、41.7% 和 59.1%,但 TP 浓度除丰水期小幅上升 5.0% 外,枯水期、平水期均大幅上升,升高达一倍. 随着时间的推移,南津关、汉口和吴淞口下 23 km 断面水体中 TDP 浓度总体呈现出上升趋势. 除南津关在平水期蓄水前后 TDP 浓度持平外,虽然其余各水期各断面均有较大升幅,但升高绝对值仍较低.

表 1 蓄水前后长江中下游干流主要控制断面悬浮物和 TP 浓度统计/mg·L^{-1}

Table 1 Statistics of suspended sediments and TP concentrations at the main control sections in the middle and lower mainstem of the Yangtze River before and after impoundment/mg·L^{-1}

断面	检测项目	水期	浓度/mg·L^{-1}				蓄水后比蓄水前增加/%
			蓄水前范围	蓄水前均值	蓄水后范围	蓄水后均值	
南津关	SS	丰水期	623.6 ~ 1285.6	958.4	40.4 ~ 245.9	111.7	-88.3
		枯水期	70.9 ~ 178.0	118.4	10.9 ~ 28.4	19.4	-83.6
		平水期	187.1 ~ 624.2	327.0	22.7 ~ 60.1	36.4	-88.9
	TP	丰水期	0.16 ~ 0.31	0.22	0.08 ~ 0.19	0.15	-31.8
		枯水期	0.11 ~ 0.16	0.12	0.07 ~ 0.16	0.10	-16.7
		平水期	0.12 ~ 0.21	0.18	0.08 ~ 0.16	0.11	-38.9
	TDP	丰水期	0.03 ~ 0.06	0.05	0.03 ~ 0.11	0.07	40.0
		枯水期	0.04 ~ 0.09	0.06	0.04 ~ 0.14	0.07	16.7
		平水期	0.06 ~ 0.08	0.07	0.04 ~ 0.13	0.07	0.0
汉口	SS	丰水期	220.4 ~ 353.4	258.8	32.5 ~ 221.2	87.5	-66.2
		枯水期	52.6 ~ 103.2	75.6	40.6 ~ 94.8	59.3	-21.6
		平水期	122.1 ~ 185.7	152.7	33.1 ~ 148.6	69.9	-54.2
	TP	丰水期	0.10 ~ 0.18	0.14	0.12 ~ 0.22	0.18	28.6
		枯水期	0.09 ~ 0.13	0.11	0.11 ~ 0.23	0.17	54.5
		平水期	0.10 ~ 0.18	0.13	0.10 ~ 0.25	0.17	30.8
	TDP	丰水期	0.04 ~ 0.05	0.05	0.04 ~ 0.11	0.07	40.0
		枯水期	0.04 ~ 0.06	0.05	0.06 ~ 0.10	0.08	60.0
		平水期	0.04 ~ 0.07	0.05	0.05 ~ 0.11	0.07	40.0
吴淞口下 23 km	SS	丰水期	167.1 ~ 437.8	294.6	30.4 ~ 353.0	120.6	-59.1
		枯水期	157.6 ~ 775.7	392.0	61.3 ~ 488.4	185.4	-52.7
		平水期	209.0 ~ 400.6	271.0	64.9 ~ 421.2	158.1	-41.7
	TP	丰水期	0.13 ~ 0.29	0.20	0.12 ~ 0.32	0.21	5.0
		枯水期	0.05 ~ 0.28	0.14	0.15 ~ 0.63	0.28	100.0
		平水期	0.06 ~ 0.23	0.12	0.16 ~ 0.47	0.24	100.0
	TDP	丰水期	0.02 ~ 0.06	0.03	0.02 ~ 0.07	0.05	66.7
		枯水期	0.03 ~ 0.05	0.04	0.03 ~ 0.09	0.07	75.0
		平水期	0.03 ~ 0.07	0.04	0.03 ~ 0.08	0.05	25.0

由此可以看出,引起水体中 TP 浓度变化的主要为颗粒磷. 南津关断面悬浮物浓度在三峡蓄水后大幅下降,从而引起 TP 浓度下降;而汉口和吴淞口下 23 km 等两断面在悬浮物浓度大幅下降的同时,TP 浓度不降反而大幅上升,说明水体中单位质量颗粒物所吸附的含磷污染物大幅度增加;同时,该两

个断面蓄水后 TP 浓度较蓄水前的大幅增加. 这些都显示,在新水沙条件下,长江中下游沿程含磷污染物进入长江干流水体的总量也大幅增加.

2.2.2　断面均匀性

为了说明新的水沙条件下,长江中下游干流水体磷浓度断面均匀性,仍以南津关、汉口和吴淞口下 23 km 这 3 代表断面、以 2004 年(首次蓄水至 135 m 后 1a)、2010 年(首次蓄水至 175 m)和 2019 年(目前)为代表年份进行分析. 断面总磷浓度分布见图 5.

从图 5 可知,南津关断面 TP、TCP 和 TDP 浓度在左、中泓和右不同垂线之间或表层、中层和底层测点之间虽然存在一些差异,但不论是相对偏差或差值绝对值均较小,一般小于 10% 或 0.01 mg·L^{-1},未发现明显的分层或侧向分布. 与此同时,还可以发现,南津关断面水体中 TP、TCP 和 TDP 浓度不同垂线间或测点间的相对偏差或绝对值在所选取的年份中出现递减,而汉口断面则未出现这种现象. 南津关断面处于三峡大坝下游和葛洲坝水库回水范围内. 三峡下泄水流的“搅拌”作用及葛洲坝水库的“顶托”效应,都可能使得水体中污染物得到较充分的混合与扩散,因此各垂线、测点间不会出现较大差异. 汉口断面可以较明显观察到测线、测点间的差

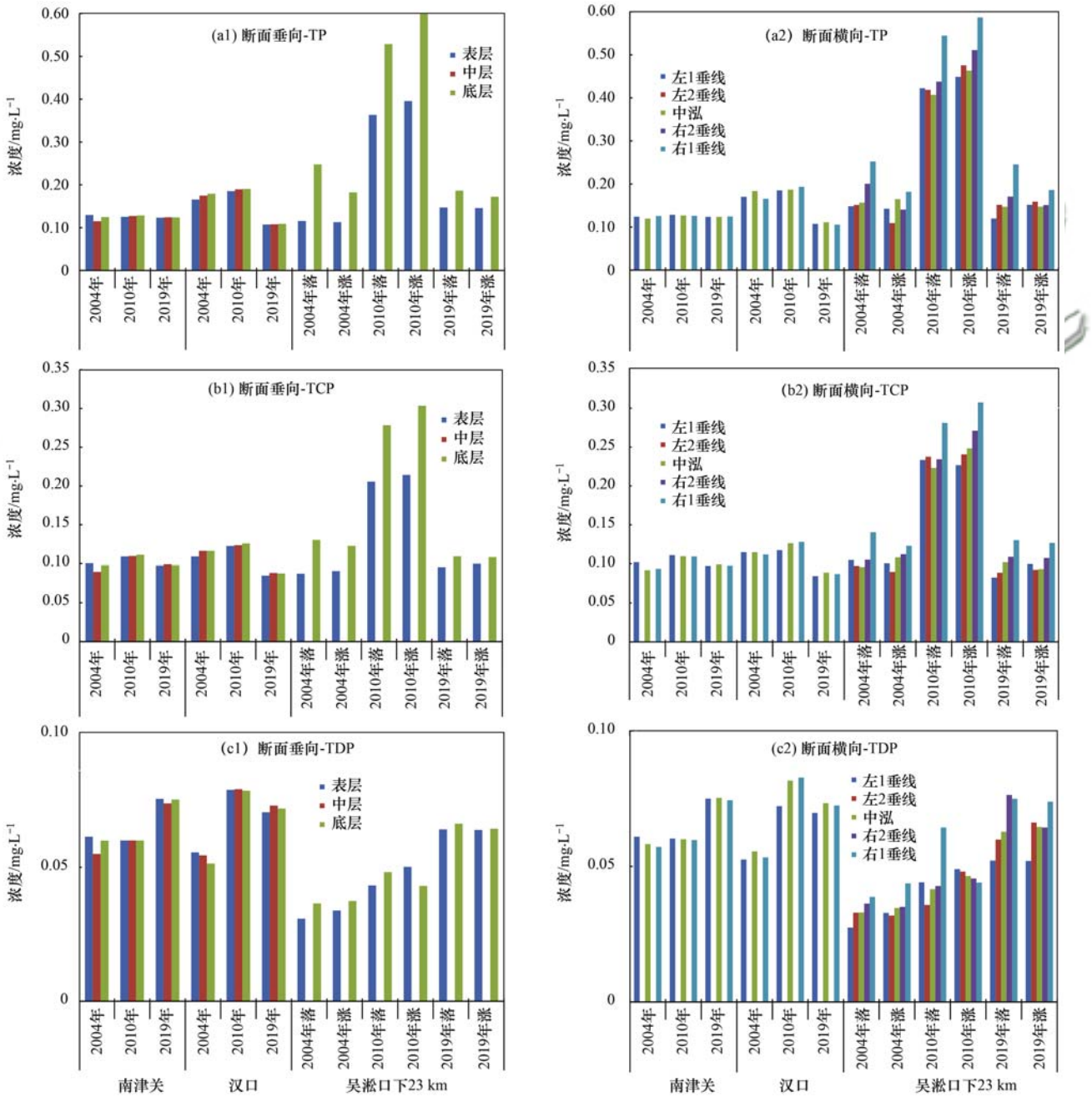

图 5　不同时期长江中下游干流主要控制断面 TP、TCP 和 TDP 在垂向和横向的浓度差别

Fig. 5　Difference in TP, TCP, and TDP concentrations among different sites in vertical and transverse directions at the main control sections in the middle and lower mainstem of the Yangtze River during different periods

异,但差异仍不显著. 吴淞口下 23 km 断面涨落潮之间、表层与底层间 TP、TCP 和 TDP 浓度均可以观测到明显的差异,尤其是前两者. 吴淞口下 23 km 影响因素比较复杂,河口区域江面急剧变宽,河道较浅,流速较缓,且泥沙颗粒小[18]. 另外,潮汐会改变水体流态,长江下游感潮河段自河口可上溯到安徽大通[19]. 在这些因素的综合影响下,下游相关断面各测点、涨落潮及不同时段间水体磷浓度可能出现较大差异.

2.3 近岸水域

对长江中下游各城市江段近岸水体中 TCP 浓度进行统计分析,结果见表 2. 结果显示,TCP 浓度 ≤0.10、0.10 ~ 0.20(含)和 >0.20 mg·L^{-1}的分别占总样本数的 2.97%、89.72% 和 7.31%. 若按水期进一步分析,则丰水期长江干流江苏段、上海段 TCP 浓度大于 0.20 mg·L^{-1}的比例明显较总体均值高,尤其是上海段; 其余江段这一比例则低于总体均值. 枯水期仅湖北段 TCP 浓度大于 0.20 mg·L^{-1}的比例明显高于总体均值,其余江段均低于这一值. 虽然按干流江段所属省区统计会受沿江城市分布、河段长度和样本数等因素影响,但仍能较好说明各江段近岸水域水体磷污染程度.

将近岸水域不同水期各江段的值与图 2 和图 3 中相关区域多年均值及断面均值进行比较,近岸水域水体中 TCP 浓度明显高于相应河段断面监测值,大约高出约 0.01 ~ 0.04 mg·L^{-1}. 通常,在研究河流水体污染物污染程度时,会使用污染带进行描述. 对于"污染带"的定义,不同研究者从不同的角度有不同解读[20~22]; 从水体环境功能讲,超过水体环境功能所要求的水质标准区域即定义为污染带. 因此,若以超过《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)中Ⅲ类标准限值确定污染带,长江中下游干流水体总磷在部分城市河段近岸水域已经形成了较明显的污染带.

表 2 长江中下游干流近岸水域水体 TCP 浓度统计分析/%

Table 2 Statistics of TCP concentrations in the coastal waters of the middle and lower mainstem of the Yangtze River/%

水期	省份	岸别	样本数/个	浓度/mg·L^{-1}						平均值/mg·L^{-1}
				≤0.02	(0.02, 0.10]	(0.10, 0.20]	(0.20, 0.30]	(0.30, 0.40]	>0.40	
丰水期	湖北	左	64	0	0	96.88	3.13	0	0	0.149
		右	74	0	0	95.95	4.05	0	0	0.145
	江西	右	20	0	0	100	0	0	0	0.123
	安徽	左	76	0	2.63	93.42	3.95	0	0	0.140
		右	92	0	0	94.57	5.43	0	0	0.153
	江苏	左	170	0	1.18	81.18	15.29	0.59	1.76	0.168
		右	182	0	2.20	91.21	6.59	0	0	0.144
	上海	右	46	0	0	73.91	26.09	0	0	0.176
枯水期	湖北	左	164	0	5.49	78.05	9.76	0.61	6.10	0.201
		右	157	1.27	10.83	75.16	12.74	0	0	0.153
	湖南	右	18	0	94.44	5.56	0	0	0	0.091
	江西	右	36	0	0	100	0	0	0	0.153
	安徽	左	84	0	0	98.81	1.19	0	0	0.169
		右	98	0	0	94.90	5.10	0	0	0.165
	江苏	左	168	0	0	92.86	7.14	0	0	0.157
		右	204	0	0	100	0	0	0	0.134
	上海	右	38	0	0	100	0	0	0	0.134
平水期	湖北	左	60	0	0	100	0	0	0	0.139
		右	40	0	2.50	97.50	0	0	0	0.129
	湖南	右	28	0	0	96.43	0	0	3.57	0.134
	总计		1 819	0.11	2.86	89.72	6.43	0.11	0.77	0.154

据报道,长江干流相关水域,排污口下游可能会出现宽度几十米、长度数百米甚至数千米的污染带[23~25]. 本研究也选取一些较大排污口进行调查、分析,磷污染带出现的长度、宽度与这些研究类似,在此不再赘述. 但值得重点关注的是,在一些河段,如宜化所在河段,由于磷化工产业分布较集中,且排污口分布在较长岸线,使得 TCP 浓度在较长江段近岸水域出现较高现象. 另一个值得重点关注的是,随着"碧水"保卫战的深入推进,近年来排污口排查和整治力度加大,有研究表明[26],长江中下游干流相当比例的排污口以暗管或潜没的方式排放入江,有些甚至会深入至距岸较远的地方. 这虽然避免了对近岸水域的影响,但为研究磷排放对干流水质的影响带来更大的挑战.

若仅考虑污水排放因素，城市上游河段水体中 TCP 浓度一般会较下游河段低. 近岸水域水体中磷浓度也会与城市产业布局、河道岸线、流速流态、航道特征等密切相关. 长江中下游城市有些主要在江的一侧，有的则分布在两侧，工业布局也有差异. 这也会使得城市左右岸近岸水体中 TCP 浓度可能会出现较大差异，但一般不会出现全部江段一岸均高于另一岸的情形，这和相关研究结论不一致[6] 另外，在中下游感潮河段，受潮汐影响，近岸水域可能会观测到逆流[24]，若存在含磷废水的不连续排放，也可能对排放口上游水体产生影响. 同时，受自净、沉降和排污等过程的综合影响，调查结果也显示长江中下游近岸水体中 TCP 浓度在特定城市河段会出现沿程下降、上升、基本不变、先升高后降低和先降低后升高等现象，各类情况比较复杂，在此不详细赘述.

3　结论

(1)2004 ~ 2019 年，长江中下游干流水体 TCP 浓度基本在 0.10 ~ 0.15 $mg \cdot L^{-1}$ 之间变动，总体呈先上升后降低的趋势，不同水期 TCP 浓度呈现交错关系. 干流沿程水体中 TCP 浓度总体呈升高趋势，各水期升高趋势不同.

(2)以南津关、汉口 37 码头及吴淞口下 23 km 等 3 个断面代表不同江段，对水体中磷浓度变化趋势进行分析，3 个断面水体 TP、TCP 和 TDP 浓度变化情况各异. 南津关断面 TP 浓度在三峡蓄水后快速下降，2006 年后呈上升趋势，但总体显著低于三峡水库蓄水前水平. 汉口断面蓄水后至 2015 年 TP 浓度总体显著高于蓄水前，但 2016 年后快速下降. 吴淞口断面 TP 浓度较蓄水前变幅、波动较大，2010 年大幅振荡升高，其后又大幅振荡下降. 3 个断面 TCP 浓度变化趋势和 TP 浓度变化趋势总体相似，但波动幅度显著小于 TP，且 2012 年后前变化趋势趋同、浓度差异显著缩小. 不同江段水体中 TDP 浓度波动不大，但总体均呈上升趋势.

(3)水体中悬浮物含量对长江中下游水体中磷浓度分布存在一定影响(主要为可沉降部分产生的影响)，且在不同江段影响不一致，南津关、汉口和吴淞口下 23 km 三断面的 TCP/TP 比值中位值分别为 0.900、0.720 和 0.609，从上游到下游依次降低；水体中溶解态总磷(TDP)占总磷(TP)比例沿程下降，颗粒磷(TPP)占总磷(TP)比例沿程呈上升趋势. 受不同因素影响，不同江段监测断面各测点间水体磷浓度差异不一致，中上部分江段差异较小，河口附近较显著.

(4)水体中可沉降颗粒会对水体质量评价结果产生影响. 若按照《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)对长江中下游水体进行评价，各水期及年度 TCP 浓度均值符合Ⅱ ~ Ⅲ类标准，总体较好，此时 TCP 不是水体质量的控制因子. 若考虑水体中可沉降颗粒的影响，以水体总磷(TP)测定结果进行评价，可能会得出较比 TCP 评价要差的结果.

(5)长江中下游干流城市江段近岸水域水体 TCP 浓度以低于 0.20 $mg \cdot L^{-1}$ 为主，但局部江段存在一定比例断面超过 0.20 $mg \cdot L^{-1}$ 的现象. 近岸水域水体中 TCP 浓度明显高于相应河段断面监测值，在部分城市河段近岸水域已经形成了明显的污染带.

参考文献：

[1] 黄仁勇，舒彩文，谈广鸣. 三峡水库调度运用对出库水沙过程影响研究[J]. 应用基础与工程科学学报，2019，**27**(4)：734-743.
Huang R Y, Shu C W, Tan G M. Influence of operation and application of the Three Gorges Reservoir on the outbound water and sediment process [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2019, **27**(4): 734-743.

[2] 水利部长江水利委员会. 长江泥沙公报[R]. 武汉：长江出版社，2000-2018.

[3] 长江流域水资源保护局. 长江三峡工程生态与环境监测系统水文水质同步监测年报[R]. 武汉：长江水利委员会，2000-2018.

[4] 周建军，张曼，李哲. 长江上游水库改变干流磷通量、效应与修复对策[J]. 湖泊科学，2018，**30**(4)：865-880.
Zhou J J, Zhang M, Li Z. Dams altered Yangtze River phosphorus and restoration countermeasures[J]. Journal of Lake Sciences, 2018, **30**(4): 865-880.

[5] 杨盼，卢路，向晨光，等. 长江干流氮、磷浓度变化趋势分析[J]. 环境工程，2019，**37**(2)：175-178，183.
Yang P, Lu L, Xiang C G, *et al*. Analysis of variation trend of nitrogen and phosphorus concentrations in the main stream of the Yangtze River[J]. Environmental Engineering, 2019, **37**(2): 175-178, 183.

[6] 董磊，林莉，赵良元，等. 长江中、下游干流磷的沿程分布特征研究[J]. 长江科学院院报，2015，**32**(6)：70-75.
Dong L, Lin L, Zhao L Y, *et al*. Features of phosphorus distribution along middle and lower reaches of mainstream Yangtze River[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2015, **32**(6): 70-75.

[7] Dong L, Lin L, Tang X Q, *et al*. Characteristics and spatial differences of phosphorus in the main stream of the urban river stretches of the middle and lower reaches of the Yangtze River [J]. Water, 2020, **12**(3): 910.

[8] 唐敏俐，李青云，曹慧群. 长江中下游磷元素垂向分布研究及展望[A]. 见：中国水利学会. 中国水利学会 2016 学术年会论文集(上册)[C]. 北京：中国水利水电出版社，2016. 62-66.

[9] 全为民，沈新强，韩金娣，等. 长江口及邻近水域氮、磷的形态特征及分布研究[J]. 海洋科学，2010，**34**(3)：76-81.
Quan W M, Shen X Q, Han J D, *et al*. Chemical compositions and distributions of nitrogen and phosphorus in Changjiang River Estuary and its adjacent East China sea[J]. Marine Sciences, 2010, **34**(3): 76-81.

[10] 陈野. 长江中游水体颗粒磷与悬沙定量关系及其通量变化研

究[D]. 武汉：长江科学院，2014.
Chen Y. Research of quantitative relationship and flux changes between particle phosphorus and suspended sediment in middle reaches of Yangtze River [D]. Wuhan: Changjiang River Scientific Research Institute of Changjiang Water Resources Commission, 2014.

[11] Liu X C, Beusen A H W, van Beek L P H, *et al*. Exploring spatiotemporal changes of the Yangtze River (Changjiang) nitrogen and phosphorus sources, retention and export to the East China Sea and Yellow Sea[J]. Water Research, 2018, **142**: 246-255.

[12] SL 219-2013，水环境监测规范[S].

[13] HJ/T 91-2002，地表水和污水监测技术规范[S].

[14] HJ 495-2009，水质 采样方案设计技术规定[S].

[15] 夏青，陈艳卿，刘宪兵. 水质基准与水质标准[M]. 北京：中国标准出版社，2004.

[16] 中国环境监测总站. 地表水总磷现场前处理技术规定(试行)[R]. 北京：中国环境监测总站，2019.

[17] 张志忠，阮文杰，蒋国俊. 长江口动水絮凝沉降与拦门沙淤积的关系[J]. 海洋与湖沼，1995，**26**(6)：632-638.
Zhang Z Z, Yuan W J, Jiang G J. The relationship between flocculating settlement in flowing water and deposition in the Changjiang River estuary mouth bar area[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1995, **26**(6): 632-638.

[18] 杨海飞，张鹏. 新水沙形势下长江口悬沙浓度的时空分布研究[J]. 人民长江，2019，**50**(10)：37-41.
Yang H F, Zhang P. Study on spatial and temporal distribution of suspended sediment concentration in Yangtze Estuary under new flow and sediment condition[J]. Yangtze River, 2019, **50**(10): 37-41.

[19] 侯成程，朱建荣. 长江河口潮流界与径流量定量关系研究[J]. 华东师范大学学报(自然科学版)，2013，(5)：18-26.
Hou C C, Zhu J R. Study on the quantitative relationship of the location of the tidal current limit and the river discharge in the Changjiang Estuary [J]. Journal of East China National University (Natural Science), 2013, (5): 18-26.

[20] 黄时达，刘光前，朱庆，等. 沿岸污染带的评价指标和评价方法[J]. 中国环境科学，1991，**11**(4)：306-310.
Huang S D, Liu G Q, Zhu Q, *et al*. Methods and indexes of assessing pollution zone along the banks of river[J]. China Environmental Science, 1991, **11**(4): 306-310.

[21] 邱晨霞，廖文根. 长江中下游污染带趋势预测的初步探讨[J]. 科技导报，1996，(3)：56-57.
Qiu C X, Liao W G. Trend forecast of pollution belt in the middle and lower reaches of the Yangtse River[J]. Science & Technology Review, 1996, (3): 56-57.

[22] 长江流域水环境监测中心. 长江干流主要城市江段近岸水域水环境质量状况报告[R]. 武汉：长江流域水资源保护局，2005.

[23] 侯国祥，叶闽，张勇传，等. 三峡成库后重庆主城区岸边污染带的研究[J]. 水电能源科学，2003，**21**(3)：24-26.
Hou G X, Ye M, Zhang Y C, *et al*. Research on pollution region of Chongqing urban area after Three Gorge Reservoir operation [J]. Water Resources and Power, 2003, **21**(3): 24-26.

[24] 刘晓东. 长江下游水域码头硫酸泄漏事故风险评价[J]. 水资源保护，2009，**25**(3)：76-79.
Liu X D. Risk assessment of vitriol leakage accident at wharf in downriver reach of Yangtze River [J]. Water Resources Protection, 2009, **25**(3): 76-79.

[25] 黄程，钟成华，邓春光，等. 三峡水库 139 m 蓄水后排污口污染带特性分析——以云阳污水处理厂为例[J]. 水资源保护，2007，**23**(2)：20-24.
Huang C, Zhong C H, Deng C G, *et al*. Characteristics of contamination zone around discharge outlet after water storage of Three Gorges Reservoir at water level of 139m: a case study on Yunyang sewage treatment plant [J]. Water Resources Protection, 2007, **23**(2): 20-24.

[26] 长江水利委员会. 长江入河排污口核查工作报告[R]. 武汉：长江入河排污口监督管理工作领导小组办公室，2017.

HUANJING KEXUE Vol. 41 No. 12
Environmental Science (monthly) Dec. 15, 2020

CONTENTS