

Particle size variation and retention characteristics of phosphorus in suspended sediments in Three Gorges Reservoir Area

CHEN Qingkong^{1,2,3}, CHEN Zhijun^{1,2}, WANG Dianchang^{3,4}, LAN Feng⁵, GAO Qianhong⁶, LI Shanze⁷

(1. Chongqing Engineering Laboratory of Environmental & Hydraulic Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. Joint Graduate Training Base of Resources and Environment between Chongqing Jiaotong University and Chongqing Gangli Environmental Protection Co., Ltd., Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 3. Yangtze Eco-Environment Engineering Research Center, China Three Gorges Corporation, Wuhan 430014, Hubei, China; 4. Yangtze Ecology and Environment Co., Ltd., Wuhan 430062, Hubei, China; 5. Upper Changjiang River Bureau of Hydrological and Water Resources Survey, Hydrology Bureau of Changjiang Water Resources, Chongqing 400020, China; 6. Three Gorges Bureau of Hydrological and Water Resources Survey, Hydrology Bureau of Changjiang Water Resources, Yichang 443008, Hubei, China; 7. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: [Objective] Phosphorus is the main pollutant and biogenic element in the Yangtze River, and the completion of the Three Gorges Dam has led to the interception of a large number of suspended sediment (particulate phosphorus) carrying phosphorus, which has affected the ecological environment of the Yangtze River Basin. Particle size (D) is an important physical property of suspended sediment, but there is a lack of information on particle size (D) in the study of particulate phosphorus in the Yangtze River. [Methods] Suspended sediment particle size gradation analysis and suspended sediment phosphorus content (PP') monitoring were carried out monthly in eight hydrological sections of the Yangtze River mainstream and its tributaries Jialing River and Wujiang River in the reservoir area in 2021, and the PP' values of suspended sediment at different time and different particle size sections were obtained. Sediment transport rate, flow velocity and other hydrological parameters, as well as total phosphorus (TP), dissolved phosphorus (DP) and particulate phosphorus (PP) concentrations, the temporal and spatial variation of suspended sediment particle size characteristics and phosphorus content in the reservoir area were summarized, the main suspended sediment components dominating the transport of particulate phosphorus in the reservoir area were analyzed, and the interception effect of the reservoir area on different suspended sediment components was estimated. [Results] The results show that: (1) The suspended sediment in the reservoir area was dominated by fine particles with $D \leq 0.062$ mm, and there was a trend of refinement from upstream to downstream. Silt is the main carrier of particulate phosphorus in the reservoir area, accounting for 77% of the annual suspended sediment flux ($D \leq 0.062$ mm) and 82% of the annual suspended sediment flux ($D \leq 0.062$ mm). (2) The average phosphorus content of suspended sediment in each section of the Yangtze River mainstream in the non-flood season is greater than that in the flood season, and the smaller the particle size is, the greater the PP' value is, but in the flood season, the clay with $0.002 < D < 0.004$ mm contains the most phosphorus, and the sediment transport rate determines the amount of suspended sediment flux, which is the main factor affecting the transport of particulate phosphorus. (3) The phosphorus in the reservoir water is mainly DP in the non-flood season and PP in the flood season, and the suspended sediment and PP are retained throughout the year, especially in the flood season, and the suspended sediment and particulate phosphorus retention in the flood period account for about 94.5% and 97.1% of the annual retention, respectively. The retention rate of silt particulate phosphorus in the reservoir area is more than 80%, and that of clay particulate phosphorus is more than 60%. [Conclusion] The results show that the combined monitoring method of particle size distribution of suspended sediment and soil phosphorus measurement could determine the phosphorus content of suspended sediment with different particle sizes in the reservoir area, which provided a new technical reference for phosphorus monitoring in the reservoir area. The ratio of suspended sediment composition has greater influence on the transport of particulate phosphorus than the particle size of suspended sediment in the reservoir area, and the greater the ratio of suspended sediment composition is, the greater the influence on the transport of particulate phosphorus is. Therefore, phosphorus control in the upper reaches of the Yangtze River should focus more on the ratio of suspension sediment composition.

Keywords: Three Gorges Reservoir Area; suspended sediment; particle size; phosphorus; interception rate; spatiotemporal variation; water quality

0 引言

磷是维持河流生态平衡的重要营养物质^[1], 但总磷(total phosphorus, TP)已成为长江流域的首要污

染物^[2]。由于磷的颗粒吸附属性, 易与河流泥沙结合形成颗粒磷^[3](particulate phosphorus, PP)。进入三峡水库的泥沙中, 悬沙通量占99%以上, 与泥沙结合的磷又占总磷的90%^[4], 因此, 长江中的颗粒

磷主要是悬沙颗粒磷,依靠悬沙的运动在库区迁移。此外,当河流水相中的磷含量降低时,部分颗粒磷可转化为溶解活性磷被生物所利用^[5],所以颗粒磷也是生物可利用磷的重要储库。水坝是影响磷在河流中输移的重要因素,其拦截悬沙的同时也会拦截颗粒磷,并使输送到下游的生要素减少,影响下游水体各种营养元素的配比^[6]。娄保锋等^[7]研究表明,水沙条件变化是磷形态发生变化的主要原因,三峡水库运行后,长江上游向下游输送的总磷年通量和颗粒磷年通量分别下降了38.0%和74.9%,向下游输送的磷由颗粒态为主变为溶解态为主。唐小娅等^[8]研究表明,三峡水库入库的总磷通量和泥沙通量具有较好的正相关,2008—2012年库区泥沙滞留约84%,是导致三峡水库磷大量滞留的主要原因。2021年6月位于长江上游金沙江段的白鹤滩水电站首次发电^[9],与乌东德、溪洛渡和向家坝水电站共同构成了上游梯级水库群,势必进一步改变上游水沙情势和颗粒磷在三峡库区中的分布。此外,据报道建库以来上游泥沙有细化趋势^[10],也使得泥沙对磷的吸附力增强^[11],大量的磷吸附于悬沙上,并被滞留在库区。因此,研究库区悬沙的含磷量和时空变化对三峡水库以及长江上游水库群的运行调度和长江控磷有重要意义。

虽然已有研究对颗粒磷在三峡库区的输移进行了估算,评估了三峡水库对颗粒磷的拦截效应,但目前颗粒磷监测值是基于水质浑样总磷TP和溶解性总磷(dissolved phosphorus, DP)的差值($C_{PP} = C_{TP} - C_{DP}$),不包含悬沙的粒度信息。但粒度是悬沙的基本物理特性,粒度分析有利于了解流域水沙动力环境和输移趋势^[12],也有利于预测颗粒磷在河流中的运动规律。然而目前关于长江悬沙粒径与磷两者之间关系的探讨研究成果较少,仅有部分泥沙磷吸附试验结果包含粒径^[13],其泥沙粒径划分和《河流泥沙颗粒分析规程》(SL 42—2010)中的规定差异较大,也没有针对三峡库区不同粒径悬沙含磷量的野外监测,还缺乏对不同时期悬沙含磷量变化规律的认识,无法获得库区不同粒径悬沙的真实含磷量和库区对不同粒径颗粒磷的拦截效应。因此,有必要对库区悬沙粒径分布及不同粒径悬沙含磷量进行实测。

本文于2021年逐月对三峡水库长江干流和支流嘉陵江、乌江的朱沱、寸滩、清溪场、北碚、武隆、万州、庙河和黄陵庙8个水文断面开展了悬沙粒径分析和各粒径段悬沙的PP'值以及水温、流量、流速和含沙量等水文参数的同步监测。获得了悬沙粒径与含磷量的关系,结合水文参数分析了库区悬沙颗粒磷的

时空变化特征,估算了库区对不同粒径悬沙颗粒磷的拦截作用,明确了库区粉砂是库区颗粒磷的主要载体,输沙率是颗粒磷输移的决定性因素,以期为长江流域水污染防控和水生态安全保护提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 样点布置与样品检测

本文设置了朱沱、北碚、武隆、寸滩、清溪场、万州、庙河和黄陵庙8个监测断面,如图1所示。其中,朱沱、北碚和武隆代表了上游长江干流、嘉陵江和乌江的入库断面,清溪场代表接收长江、嘉陵江和乌江三方来水、来沙的入库断面,万州是库区中部断面,黄陵庙为水库出库和坝后断面,庙河代表坝前断面^[14-15]。为保证有足够的悬沙用于级配分析和测磷,依据《水环境监测规范》(SL 219—2013)和《河流悬移质泥沙测验规范》(GB/T 50159—2015)对每个监测断面进行了每月1次的全断面混合采样,采样体积250 L/月·次,同步采集水样3 L测定水质TP、DP和PP。悬沙样采集后,根据《河流泥沙颗粒分析规程》(SL 42—2010)中的沉降法,采用粒径计法和吸管法进行级配分析(粒径范围分别是0.500 mm、0.250 mm、0.125 mm、0.062 mm、0.031 mm、0.016 mm、0.008 mm、0.004 mm和0.002 mm,其中0.062 mm<D<2.000 mm的悬沙被定义为砂粒,0.004 mm<D<0.062 mm的悬沙被定义为粉砂,D<0.004 mm的悬沙被定义为黏粒);级配出的悬沙依据《土壤总磷的测定 碱熔-钼锑抗分光光度法》(HJ 632—2011)测定其含磷量,水样根据《水质样品的保存和管理技术规定》(HJ 493—2009)进行保存和运输,TP和DP根据《水和废水监测分析方法》(第四版)进行检测。其中,2021年6—10月为汛期,1—5月、11—12月为非汛期。在现场采样的同时测定流速、水温、含沙量和流量。所有监测数据均出自具有“检验检测资质认定证书(CMA)”的环境水利工程重庆市工程实验室。

1.2 数据处理

1.2.1 通量计算

实际工作中无法实现对污染物、泥沙和流量的连续同步监测,只能获得在一段时间内的代表值。长江干流水文站监测通常每月1次,结合2021年各月各断面的水文监测数据,根据误差最小原则^[16]和文献^[17]进行通量计算,公式如下

$$F = C \times Q \quad (1)$$

式中,F为监测断面水体磷通量(kg/s);Q为监测断面流量(m³/s);C为监测断面水体磷的质量

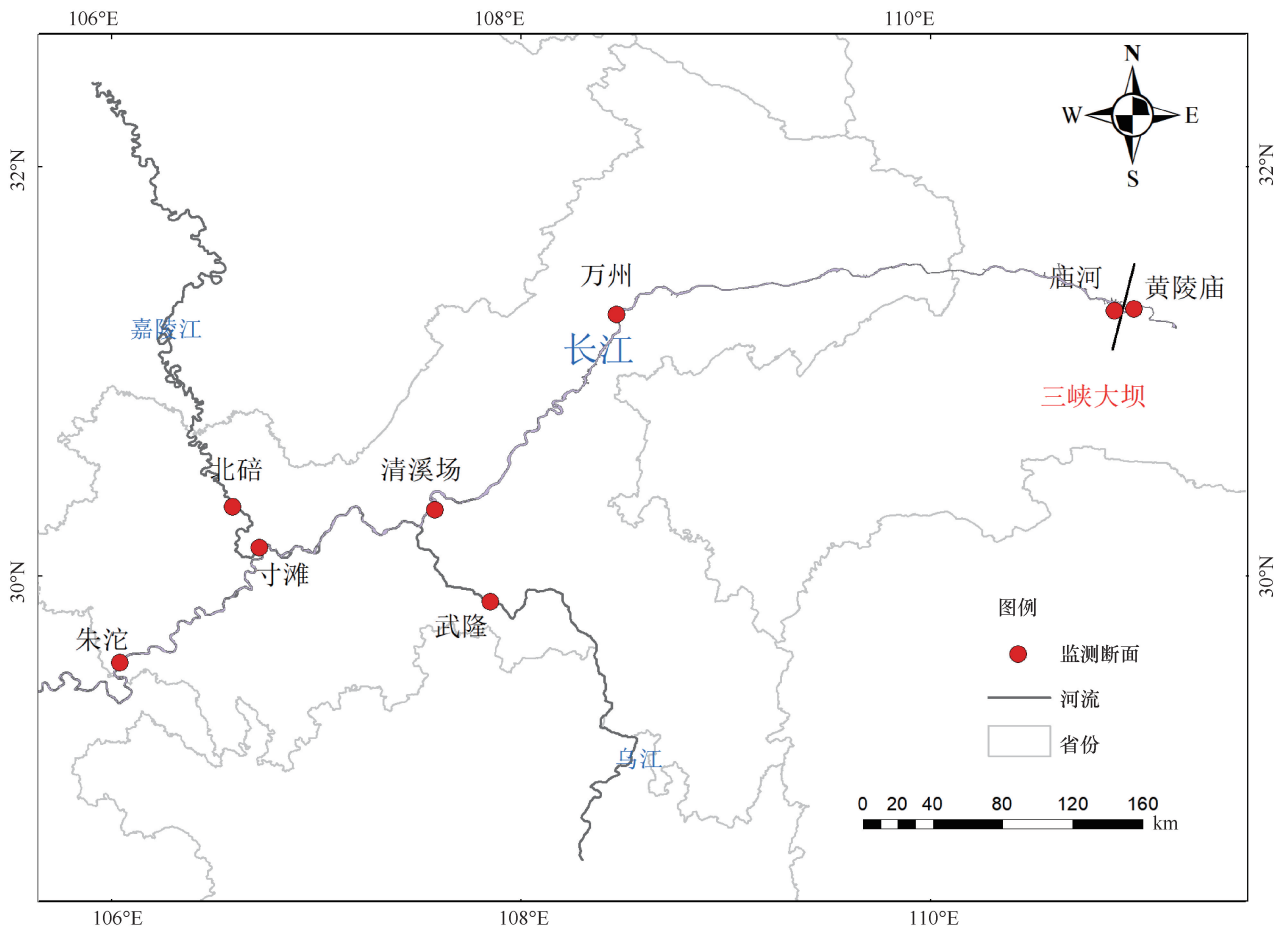


图1 监测断面

Fig. 1 Monitoring cross-section

浓度(mg/L)。

1.2.2 输运系数计算

为判定在输移过程中各监测断面间水体中 DP 和 PP 的形态转化, 参考文献[15], 采用计算公式如下

$$T_W = F_{W2}/F_{W1} \quad T_{DP} = F_{DP2}/F_{DP1} \quad (2)$$

$$T_{DP}/T_W = (F_{DP2} \times F_{W1}) / (F_{DP1} \times F_{W2}) \quad (3)$$

$$T_S = F_{S2}/F_{S1} \quad T_{PP} = F_{PP2}/F_{PP1} \quad (4)$$

$$T_{PP}/T_S = (F_{PP2} \times F_{S1}) / (F_{PP1} \times F_{S2}) \quad (5)$$

式中, T_W 、 T_{DP} 、 T_S 、 T_{PP} 分别为上断面到下断面的水量输运系数、DP 输运系数、沙量输运系数、PP 输运系数; F_{W1} 、 F_{DP1} 、 F_{S1} 、 F_{PP1} 分别为上游断面流量、DP 通量、输沙率、PP 通量; F_{W2} 、 F_{DP2} 、 F_{S2} 、 F_{PP2} 分别为下游断面流量、DP 通量、输沙率、PP 通量。

1.2.3 水、沙、磷的负荷和滞留率计算

基于质量平衡原理, 参考文献[6]、文献[14]和文献[18]等, 磷、水和沙的通量作为负荷, 将朱沱作为长江上游干流入库负荷, 北碚和武隆作为嘉陵江和乌江两条主要支流入库负荷, 由于库区其余输入汇入量较少, 忽略不计, 即库区总入库负荷为朱沱、北碚、

武隆的总和。将黄陵庙作为三峡水库的出库负荷, 库区对悬沙和悬沙总磷的滞留率(IR)计算公式如下

$$IR = \left(1 - \frac{I_{出}}{I_{入}}\right) \times 100\% \quad (6)$$

式中, IR 为库区对沙或磷的滞留率(%); $I_{出}$ 为沙或磷的出库负荷(万 t 或 t); $I_{入}$ 为沙或磷的入库负荷(万 t 或 t)。

2 结果与分析

2.1 水、沙和磷的输移转化特征

三峡水库主要断面的流量和输沙率变化如图 2 所示。“三江之和”表示朱沱、嘉陵江北碚和乌江武隆断面的输沙率、流量分别相加, 可见两时期的输沙率、流量沿程变化规律基本一致, 但汛期变化更明显, 其输沙率和流量远大于非汛期, 这说明全年库区水沙输运主要以汛期为主。此外, 两时期流量整体变化幅度小, 而输沙率沿程有减小趋势, 即库区对悬沙的拦截能力大于对水的拦截能力。非汛期、汛期三江入库水量占清溪场比值分别是 99%、74%, 入库沙量

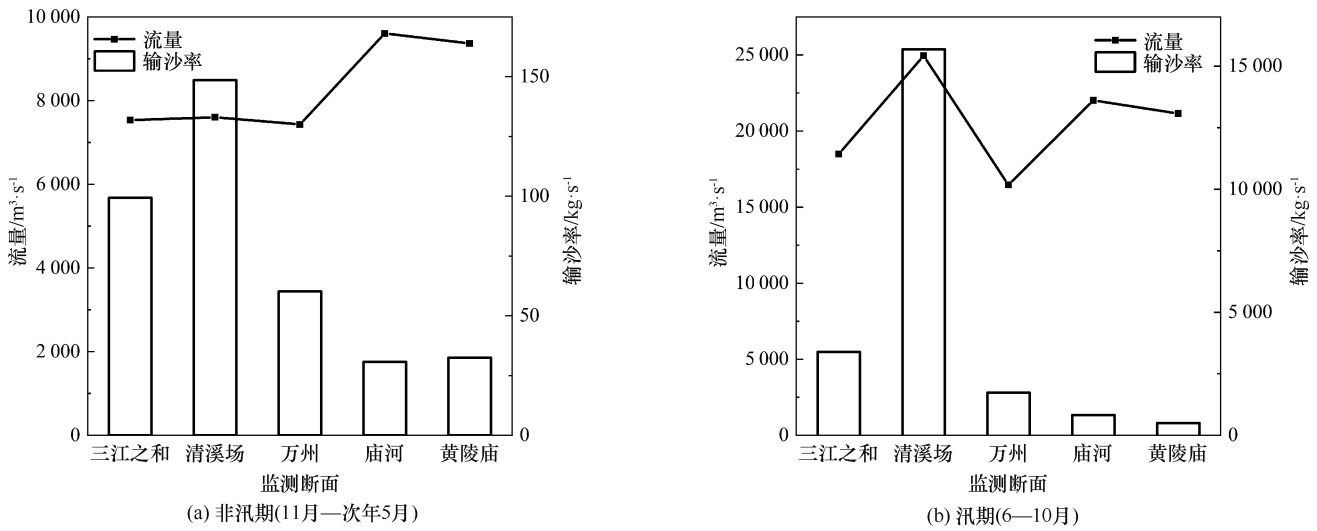


图2 三峡水库主要断面的流量和输沙率变化

Fig. 2 Changes in runoff and sand transport in the main sections of the Three Gorges Reservoir

占比分别是67%、22%，说明在非汛期进入清溪场的水量以三江水量为主，支流汇入和降雨量为辅；汛期的降雨时段长、雨量多使三江到清溪场段有33%的水量来自其他支流汇入和降雨。非汛期进入清溪场的沙以三江为主，汛期则是因为强降雨导致大量土壤侵蚀^[19]，使三江到清溪场段的支流和区间汇入的沙多于三江汇入的沙。此外，清溪场到万州段在汛期受蒸发和人类取水影响^[20]，水量流失达34%，同时非汛期和汛期沙量分别减少59%和89%。因此，清溪场到万州是三峡库区中水和悬沙滞留量最高的江段，与文献[15]的结论一致。

根据1.2.2计算两两断面间的输运系数(见表1)。由表1可知，三江到清溪场段全年的水和沙都有外源汇入，汛期悬沙汇入更多，且汇入的是含低浓度DP的水和含低浓度PP的悬沙，对DP和PP起稀释作用，同时PP向DP转化，含磷量高的悬沙可能有部分沉降使TP通量减小。清溪场到万州段全年的水量和悬沙都有损耗，但有外源汇入含高浓度PP

的悬沙和含高浓度DP的水。万州到庙河段，非汛期有水量汇入，但DP通量有损耗，说明水体中存在DP通过颗粒吸附和生物吸收转化为PP的行为，同时此江段悬沙有损耗，有部分PP随悬沙沉降被滞留，此时悬沙对水体中的DP吸附作用较强；汛期此江段悬沙和磷也因沉降损耗，有含低浓度DP的水汇入，DP相对水和PP相对沙均表现为移除作用。庙河到黄陵庙段，非汛期有含低浓度PP的悬沙汇入，DP相对水和PP相对沙均表现为移除作用，这可能是此时期水库蓄水，水位升高悬沙更容易滞留^[21]，带走了水中的磷；汛期此江段水量和悬沙都有损耗，但DP相对水和PP相对沙均表现为添加作用，可能是在汛期水库低水位的情况下，坝后排沙使水动力条件发生变化沉降的泥沙再悬浮^[22]，其携带的磷再向水体中的DP和PP转化。

此外，三江到黄陵庙段各时期均表现为 $T_w > 1$ 、 T_{DP} 、 T_{DP}/T_w 、 T_s 、 T_{PP} 和 T_{PP}/T_s 都远小于1，全年库区有明显的悬沙和PP滞留，DP相对水量和PP相对

表1 各监测断面间的输运系数

Table 1 The transport coefficient between different monitoring sections

时期	江段	T_w	T_{DP}	T_{DP}/T_w	T_s	T_{PP}	T_{PP}/T_s
非汛期	三江之和—清溪场	1.01	0.96	0.95	1.50	0.32	0.22
	清溪场—万州	0.98	1.08	1.10	0.41	2.00	4.94
	万州—庙河	1.29	0.48	0.37	0.51	0.81	1.59
	庙河—黄陵庙	0.98	0.64	0.66	1.06	0.40	0.38
	三江之和—黄陵庙	1.24	0.32	0.26	0.33	0.21	0.65
汛期	三江之和—清溪场	1.35	0.83	0.61	4.62	0.11	0.02
	清溪场—万州	0.66	1.19	1.80	0.11	4.41	39.85
	万州—庙河	1.34	0.52	0.39	0.48	0.09	0.20
	庙河—黄陵庙	0.96	1.30	1.35	0.60	0.94	1.56
	三江之和—黄陵庙	1.14	0.67	0.59	0.15	0.04	0.29

沙量表现为移除作用, 库区对磷的滞留能力大于对悬沙的滞留能力; 对比 T_{DP}/T_W 和 T_{PP}/T_S 大小, 非汛期 DP 转化为 PP 的效果比汛期明显, 汛期 PP 转化为 DP 的效果比非汛期明显。三峡水库主要断面水体不同形态磷通量变化如图 3 所示。在非汛期三峡水库各断面水中不同磷形态通量大小是 $TP > DP > PP$, 此时的 TP 以 DP 为主, 这可能是输沙率小^[23], 导致 DP 通量 $> PP$ 通量, 此时期 DP 更易向 PP 转化; 同理在汛期, 除黄陵庙断面, 其他断面水中不同磷形态通量大小是 $TP > PP > DP$, 此时, TP 以 PP 为主, 而黄陵庙 $DP > PP$ 的原因可能是汛期流量大, 作为出库断面水流湍急, 流速越大沉积物中的磷释放得越多^[24], 冲刷悬沙中的 PP 使其向 DP 转化。

2.2 悬沙颗粒成分和 PP' 值的沿程分布特征

各监测断面悬沙主要粒径占比(该监测断面各粒径悬沙通量逐月相加之和/该断面总悬沙通量逐月相加之和)如表 2 所列, 万州 $D \leq 0.062$ mm 的悬沙占 85.6%, 其他断面 $D \leq 0.062$ mm 的悬沙均大于 99%, 说明库区起决定因素的悬沙是 $D \leq 0.062$ mm 的细颗粒。资料^[25-26]显示, 2003—2008 年间长江上游 $D > 0.125$ mm 的悬沙占比为 1.0% ~ 10.0% 之间, $D \leq 0.031$ mm 悬沙占比为 69.8% ~ 79.8%; 2009—2017 年

朱沱断面 $D \leq 0.031$ mm 的悬沙占比在 70.0% 左右, 宜昌断面 $D \leq 0.031$ mm 的悬沙占比在 85.0% 左右。2021 年各监测断面 $D \leq 0.031$ mm 的悬沙占比在 82.2% ~ 90.6%, 相比往年, 2021 年各断面 $D \leq 0.031$ mm 的悬沙占比更重, 长江干流各监测断面的悬沙仍在细化。此外, 根据 2021 年各断面悬沙级配曲线(见图 4), 各断面的曲线随沿程有向右偏移的现象, 即 2021 年库区长江干流悬沙沿程细化。

为讨论悬沙粒径和 PP' 值的关系, 根据长江干流各断面流速、水温和不同粒径 PP' 值变化(见图 5), 各时期 $PP'_{D \leq 0.062 \text{ mm}}$ ($D \leq 0.062$ mm 的悬沙 PP' 值)与图 3 中 PP 变化趋势一致, 说明悬沙沿程沉积会使水中悬沙携带的总磷量减少^[27], 因此总体沿程有减小趋势。从各监测点看, 朱沱全年的 PP' 值均为各断面最大, 到清溪场出现陡降, 即此江段有大量含低 PP 的悬沙汇入, 起到稀释作用。清溪场到万州, 非汛期 $PP'_{D \leq 0.062 \text{ mm}}$ 总体增大, 而其中 $PP'_{D \leq 0.004 \text{ mm}}$ 和 $PP'_{D \leq 0.002 \text{ mm}}$ 均减小, 汛期 $PP'_{D \leq 0.062 \text{ mm}}$ 、 $PP'_{D \leq 0.004 \text{ mm}}$ 和 $PP'_{D \leq 0.002 \text{ mm}}$ 均升高, 这表明万州汇入的含高浓度 PP 的悬沙中, 非汛期主要是粒径界于 0.004 ~ 0.062 mm 的悬沙, 而汛期各粒径的悬沙都有。万州到黄陵庙段, 各粒径段的 PP' 值都先减小后增大, 可能是大坝拦截悬

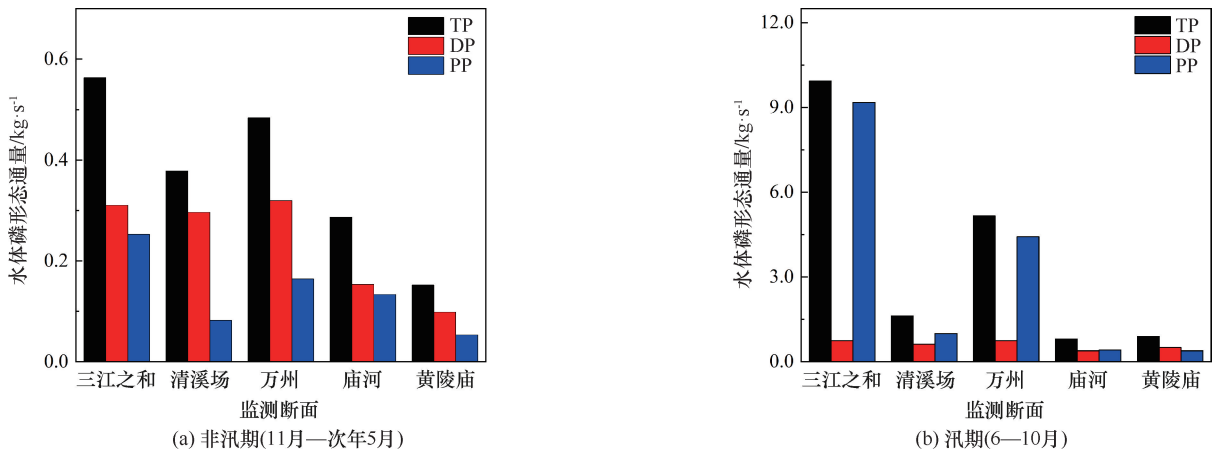


图 3 三峡水库主要断面水体不同形态磷通量变化

Fig. 3 Changes of phosphorus fluxes in different forms of water bodies in the main cross-sections of the Three Gorges Reservoir

表 2 2021 年三峡水库各监测断面不同粒径悬沙质量百分比

Table 2 Percentage of suspended sediment with different particle sizes at various monitoring sections of the Three Gorges Reservoir in 2021

粒 径	朱 沱	寸 滩	武 隆	北 碚	清溪场	万 州	庙 河	黄陵庙
$D \leq 0.062$ mm	99.8	99.2	99.9	99.8	100.0	85.6	100.0	100.0
$D \leq 0.031$ mm	84.3	88.8	84.1	82.2	87.9	51.7	90.6	88.1
$D \leq 0.004$ mm	34.5	37.8	27.4	35.1	37.9	16.9	41.7	44.9
$D \leq 0.002$ mm	21.5	26.7	18.8	23.0	25.4	11.4	27.6	31.6

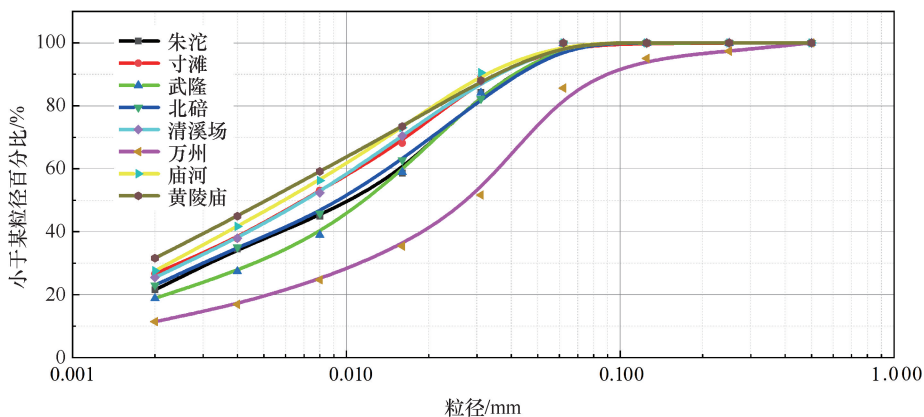


图4 2021年各断面悬沙级配曲线

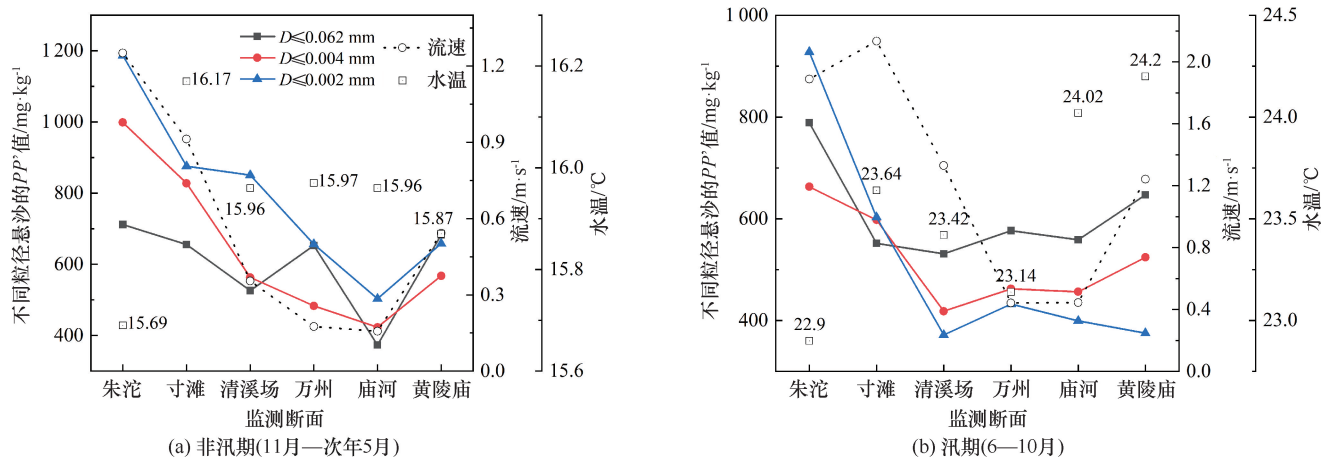
Fig. 4 Sand suspension grading curve of each section in 2021

沙的同时拦截了悬沙携带的磷,使庙河各粒径段的 PP' 值减小,坝后排水时沉积物再悬浮使黄陵庙的 PP' 值增大。

此外,各监测点中 $PP'_{D \leq 0.062 \text{ mm}}$ 、 $PP'_{D \leq 0.004 \text{ mm}}$ 和 $PP'_{D \leq 0.002 \text{ mm}}$ 非汛期值都大于汛期,而平均流速在汛期大于非汛期。非汛期粒径越小的悬沙 PP' 值越大,且 $PP'_{D \leq 0.002 \text{ mm}}$ 的贡献最大,说明低流速有利于 $D \leq 0.002 \text{ mm}$ 的悬沙吸附水中的 DP,而悬沙粒径越小,单位质量吸附磷越多,与郭长城^[13]、陈野等^[28] 的结论相符。但汛期则不同, $PP'_{D \leq 0.002 \text{ mm}}$ 值并不是最大,且越到下游值越小,而 $D \leq 0.004 \text{ mm}$ 的悬沙对 PP' 值的贡献较多,说明汛期 $0.002 \text{ mm} < D < 0.004 \text{ mm}$ 的悬沙对磷的吸附能力较强。有研究表明,吸附到单位质量颗粒中的磷量与 DP 呈正相关,与含沙量呈负相关^[29],汛期雨季暴雨期间,侵蚀土壤使悬沙输入量大,含沙量变高,导致悬沙对磷的吸附能力降低,弱吸附磷从悬沙到水体的解吸量增加^[27],这可能是

汛期不同粒径悬沙的 PP' 值小于非汛期的原因。

根据《河流泥沙颗粒分析规程》(SL 42—2010),将 $D \leq 0.062 \text{ mm}$ 的悬沙划分为粉砂($0.004 \text{ mm} < D < 0.062 \text{ mm}$)和黏粒($D < 0.004 \text{ mm}$)。综合考虑输沙率、流量等水文条件,长江干流各断面 $D \leq 0.062 \text{ mm}$ 的悬沙中不同成分的通量占比和颗粒磷通量占比(以 PP' 值计算)如图 6 所示,库区全年悬沙以粉砂为主,约占 $D \leq 0.062 \text{ mm}$ 悬沙总量的 49.0%~77.0%,其次是黏粒,约占 22.0%~51.0%,黏粒中 $D \leq 0.002 \text{ mm}$ 约占 17.0%~34.0%。汛期输沙率更大,但各断面汛期粉砂占比略小于非汛期,这说明粉砂在汛期沉降更多。从全年看,磷主要吸附在粉砂上,变化规律和悬沙成分变化一致,其中粉砂颗粒磷约占悬沙总磷的 57.0%~82.0%,黏粒颗粒磷约占 18.0%~43.0%, $D \leq 0.002 \text{ mm}$ 的黏粒颗粒磷约占 12.0%~29.0%,这说明库区中的磷大部分是由粉砂输送。虽然诸多研究表明泥沙粒径越小吸附能力越强^[30-31],但本文监测

图5 长江干流各断面流速、水温和不同粒径 PP' 值变化Fig. 5 Changes of flow velocity, water temperature and PP' values of different particle sizes in each section of the main stream of the Yangtze River

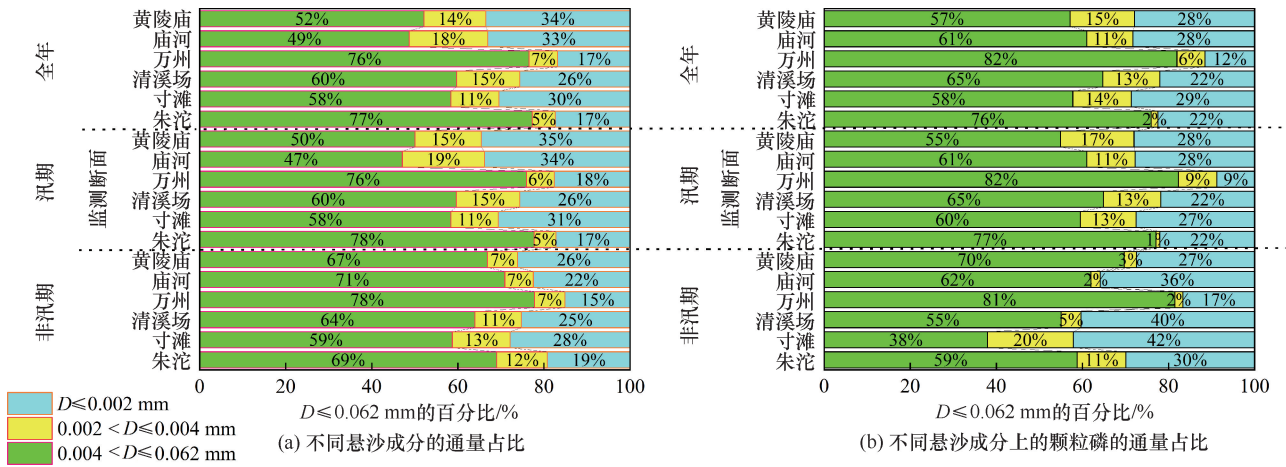


图6 长江干流各断面 $D \leq 0.062$ mm 中不同悬沙成分的通量占比和颗粒磷通量占比

Fig. 6 The flux ratio of different components and the proportion of granular phosphorus flux in the hanging sand of $D \leq 0.062$ mm in each section of the main stream of the Yangtze River

结果表明黏粒粒径小于粉砂，其携带的磷却少于粉砂 [见图 5(b)]。若要评判悬沙携带磷能力的强弱，引进“携磷系数”（即不同悬沙成分的颗粒磷通量占比与不同悬沙成分的通量占比的比值）这个参数，其值若大于 1 说明该单位质量悬沙成分携带的磷多，反之则少，结果如表 3 所列。非汛期 $D \leq 0.002$ mm 的悬沙携带磷最多，汛期反而最少，这说明粒径越小的悬沙吸附磷的能力不一定越强，这可能与该粒径段悬沙的比表面积、孔隙度等有关，更大比例的大孔隙泥沙，更容易吸附磷酸根离子^[32]。秦宇等^[33]对不同粒径的泥沙进行吸附特性研究，发现细沙 (0.150 ~ 0.250 mm) 粒径虽然大于粉粒 (0.038 ~ 0.075 mm)，但二者对磷的吸附特性却接近，可能是细沙的内部孔隙较多，总比表面积甚至高于粒径更小的粉粒。另外，小粒径悬沙的絮凝也会改变其比表面积和沉降性能^[34]。当悬沙对磷吸附平衡时，各粒径段悬沙的饱和吸附量是固定值，而各个断面单位质量悬沙吸附磷的能力是不同的，且越到下游越小。从监测断面考虑，当地的水文条件影响了各粒径段对磷的吸附能力，水温的升高会使泥沙的最大吸附量增加^[35]，流

速降低会延长泥沙吸附磷的时间^[36]；从沿程考虑，长江干流水体中 DP 浓度沿程减小，其 DP 越小吸附平衡时单位质量悬沙对磷的吸附量越小^[37]。

2.3 悬沙和颗粒磷在三峡库区的滞留

长江上游干流中不同悬沙成分、不同悬沙成分颗粒磷通量沿程变化如图 7 所示。由图 7 可知，非汛期万州的悬沙和颗粒磷通量最大，万州到庙河段粉砂通量和粉砂颗粒磷通量分别减少 95%、97%，黏粒通量和黏粒颗粒磷通量分别减少 93%、91%，为此时期库区悬沙和颗粒磷滞留最高的江段。汛期清溪场的悬沙和颗粒磷通量最大，清溪场到庙河段粉砂通量和粉砂颗粒磷通量分别减少 93%、90%，黏粒通量和黏粒颗粒磷通量均减小 88%，为此时期库区悬沙和颗粒磷滞留最高的江段。说明颗粒磷滞留区段与悬沙滞留区段对应，绝大部分吸附于沙上的磷会随沙的沉降而沉降。此外，非汛期黏粒吸附磷的能力虽强，但其黏粒通量小于粉砂通量，造成黏粒颗粒磷通量小于粉砂颗粒磷通量，因此输沙率是三峡水库颗粒磷输移的决定性因素。

用 PP' 值计算颗粒磷在库区的滞留率 (见表 4)，

表 3 库区长江干流各时期的携磷系数

Table 3 Phosphorus Carrying Coefficients of the Yangtze river main stream in the three gorges reservoir area during different periods

粒径/mm	非汛期			汛期			全年		
	0.004~0.062	0.002~0.004	≤ 0.002	0.004~0.062	0.002~0.004	≤ 0.002	0.004~0.062	0.002~0.004	≤ 0.002
朱沱	0.85	0.97	1.55	0.99	0.18	1.28	0.98	0.28	1.29
寸滩	0.65	1.48	1.51	1.02	1.18	0.90	0.99	1.21	0.94
清溪场	0.86	0.43	1.60	1.09	0.90	0.85	1.09	0.90	0.86
万州	1.05	0.26	1.10	1.08	1.39	0.50	1.07	0.97	0.69
庙河	0.87	0.33	1.59	1.30	0.59	0.82	1.25	0.59	0.85
黄陵庙	1.04	0.40	1.05	1.10	1.11	0.81	1.10	1.05	0.83

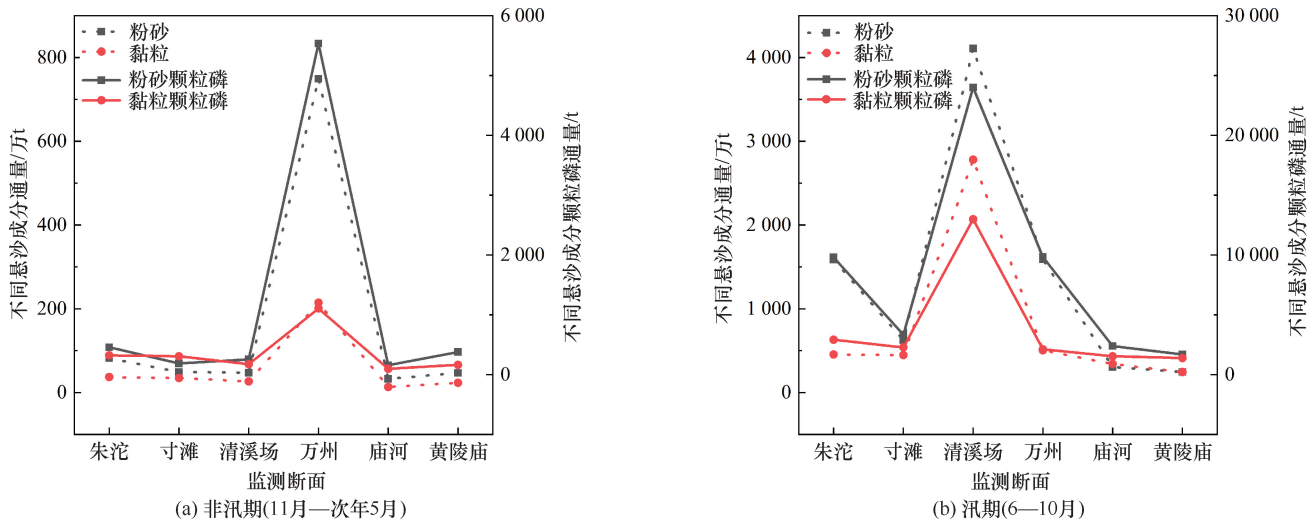


图7 长江上游干流中不同悬沙成分、不同悬沙成分颗粒磷通量沿程变化

Fig. 7 The phosphorus flux of particles with different hanging sand components and different hanging sand components in the main stream of the upper reaches of the Yangtze River varies

表4 三峡库区不同悬沙成分的年负荷和颗粒磷年负荷及其滞留率

Table 4 Annual load and granular phosphorus load of different hanging sand components in the Three Gorges reservoir area and their retention rates

粒径/mm	时段	不同悬沙成分的年负荷			不同悬沙成分颗粒磷的年负荷		
		三江之和 年负荷/万 t	黄陵庙 年负荷/万 t	滞留率/%	三江之和 年负荷/t	三江之和 年负荷/t	滞留率/%
$D \leq 0.062$	汛期	2 505.8	490.8	80.4	16 253.1	3 067.5	81.1
	非汛期	188.1	70.3	62.6	938.6	542.4	42.2
	全年	2 693.9	561.0	79.2	17 191.6	3 609.9	79.0
0.004< D <0.062 (粉砂)	汛期	1 795.4	245.5	86.3	10 690.4	1 683.2	84.3
	非汛期	135.1	47.0	65.2	535.4	378.3	29.3
	全年	1 930.5	292.4	84.9	11 225.8	2 061.5	81.6
$D < 0.004$ (黏粒)	汛期	710.4	245.3	65.5	5 562.7	1 384.3	75.1
	非汛期	53.0	23.3	56.0	403.2	164.1	59.3
	全年	763.4	268.6	64.8	5 965.8	1 548.4	74.0

汛期 $D \leq 0.062$ mm 的悬沙和颗粒磷入库负荷分别约占全年入库负荷的 93% 和 94%，即悬沙和颗粒磷的输移主要发生在汛期。同时，粉砂和粉砂颗粒磷全年滞留率在 80% 以上，黏粒和黏粒颗粒磷在 60% 以上，说明库区拦截粉砂及粉砂颗粒磷的能力大于对黏粒和黏粒颗粒磷的拦截。在非汛期，黏粒的携磷系数更大，单位质量的黏粒携带的磷更多，出现粉砂滞留率大于黏粒，而粉砂颗粒磷滞留率小于黏粒颗粒磷的结果。从全年库区对悬沙和颗粒磷的滞留率看，粒径越小其拦截率越低，随着长江上游悬沙的逐渐细化，小粒径悬沙对磷的输运应重点关注。

2.4 结果讨论

目前，对于河湖等水体颗粒磷的监测多使用公式 $C_{PP} = C_{TP} - C_{DP}$ 进行近似计算，而颗粒粒径大小与其含磷量的关系多通过室内吸附试验得到^[38-39]，缺乏对

水文因素的考虑，导致两者的实际关系仍不明朗。因此，本研究通过实测三峡库区 8 个代表性水文断面不同粒径悬沙颗粒的含磷量，结合水文条件评价不同粒径悬沙在库区的输移，能更好地贴合库区悬沙颗粒磷的实际情况，可为建立含沙量与含磷量的定量关系以及库区水沙调度提供支撑。在方法上，为保证数据的参考价值，本文首先选取了水文断面作为监测点，并根据《河流悬移质泥沙测验规范》(GB/T 50159—2015)实施了全断面采样，而非朱玘^[40]、李俊杰^[41]报道中使用岸边表层沙替代悬沙；还根据《河流泥沙颗粒分析规程》(SL 42—2010)，使用水文站现行的悬沙级配分析方法中既能实现悬沙粒径分级测定又能获取各级悬沙样的“沉降法”结合“土壤测磷法”构建了悬沙含磷量的分析方法，保证了本文研究的悬沙粒径与规范保持一致。不过，由于库区悬沙量比成

库前大量减少, 使单次采样量很大, 不利于开展高频率和大范围监测, 因此需对监测方法进一步优化。

3 结论

(1) 三峡库区的悬沙以 $D \leq 0.062$ mm 的细颗粒为主, 从上游到下游沿程有细化趋势; 其中, 粉砂通量占 $D \leq 0.062$ mm 的悬沙总通量的 43%~77%, 且所含磷占 $D \leq 0.062$ mm 的悬沙颗粒磷总通量的 23%~82%, 颗粒磷主要吸附于粉砂上。

(2) 2021 年三峡库区长江干流断面各粒径段悬沙的年平均含磷量沿程下降, 非汛期各粒径段悬沙含磷量大于汛期, 且非汛期悬沙粒径越小含磷量越高, 尤以 $D \leq 0.002$ mm 的悬沙含磷量最高, 但汛期却是 $0.002 \text{ mm} < D < 0.004$ mm 的悬沙含磷最多。

(3) 三峡库区水体中的磷形态在非汛期以 DP 为主, 汛期以 PP 为主, 库区全年都有悬沙和 PP 滞留, DP 相对水量和 PP 相对沙量均表现移除作用; 汛期是一年中库区拦截悬沙和磷的主要时段, 输沙率是库区颗粒磷输移的决定性因素; 清溪场到庙河是粉砂和粉砂颗粒磷的滞留区段, 清溪场到万州是黏粒和黏粒颗粒磷的主要滞留区段; 粉砂和粉砂颗粒磷的全年滞留率均大于 80%, 黏粒和黏粒颗粒磷的滞留率均大于 60%。

参考文献 (References):

[1] MAINSTONE C P, PARR W. Phosphorus in rivers: Ecology and management [J]. *Science of The Total Environment*, 2002, 282-283: 25-47.

[2] 徐建军, 徐建荣. 白鹤滩水电站特高拱坝技术创新与实践[J]. *水电能源科学*, 2024, 42 (11): 1-6.
XU Jianjun, XU Jianrong. Technical innovation and practice of Baihetan Ultra-high Arch Dam [J]. *Water Resources and Power*, 2024, 42(11): 1-6.

[3] PAN G, KROM M D, HERUT B. Adsorption-desorption of phosphate on airborne dust and riverborne particulates in East Mediterranean seawater [J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, 36(16): 3519-3524.

[4] 段水旺, 章申, 陈喜保, 等. 长江下游氮、磷含量变化及其输送量的估计 [J]. *环境科学*, 2000(1): 53-56.
DUAN Shuiwang, ZHANG Shen, CHEN Xibao, et al. Concentrations of nitrogen and phosphorus and nutrient transport to estuary of the Yangtze River [J]. *Environmental Science*, 2000(1): 53-56.

[5] DORICH R A, NELSON D W, SOMMERS L E. Estimating algal available phosphorus in suspended sediments by chemical extraction [J]. *Journal of Environmental Quality*, 1985, 14(3): 400-405.

[6] 王维, 李叙勇. 张家口清水河拦沙坝对磷输移-滞留的影响 [J]. *环境科学*, 2021, 42(2): 681-687.
WANG Wei, LI Xuyong. Effect of check dam on phosphorus transport and retention in the Qingshui River, in Zhangjiakou City [J]. *Environmental Science*, 2021, 42(2): 681-687.

[7] 娄保锋, 欧阳雪姣, 杨霞. 三峡水库出水断面磷通量及形态研究 (1998—2019 年) [J]. *湖泊科学*, 2023, 35(2): 435-448.
LOU Baofeng, OUYANG Xuejiao, YANG Xia. Flux and form of phosphorus in overlying water at the effluent section of the Three Gorges Reservoir from 1998 to 2019 [J]. *Lake Science*, 2023, 35 (2): 435-448.

[8] 唐小娅, 童思陈, 黄国鲜, 等. 三峡水库总磷时空变化特征及滞留效应分析 [J]. *环境科学*, 2020, 41(5): 2096-2106.
TANG Xiaoya, TONG Sichen, HUANG Guoxiang, et al. Temporal-spatial and retention analysis of total phosphorus in the Three Gorges Reservoir [J]. *Environmental Science*, 2020, 41(5): 2096-2106.

[9] 王博, 刘大喜, 罗朝, 等. 我国水域的磷污染及其治理 [J]. *生态经济*, 2024, 40(9): 5-8.
WANG Bo, LIU Daxi, LUO Chao, et al. Phosphorus pollution and its management in chinese waters [J]. *Ecological Economy*, 2024, 40 (9): 5-8.

[10] 许炯心. 近 40 年来长江上游干支流悬移质泥沙粒度的变化及其与人类活动的关系 [J]. *泥沙研究*, 2005(3): 8-16.
XU Jiongxin. Variation in grain size of suspended load in upper Changjiang River and its tributaries by human activities [J]. *Journal of Sediment Research*, 2005(3): 8-16.

[11] XIAO Y, ZHU X L, CHENG H K, et al. Characteristics of phosphorus adsorption by sediment mineral matrices with different particle sizes [J]. *Water Science and Engineering*, 2013, 6(3): 262-271.

[12] WALLING D E, MOOREHEAD P W. The particle size characteristics of fluvial suspended sediment: An overview [J]. *Hydrobiologia*, 1989, 176: 135-149.

[13] 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 Ye. 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, 2014.

[14] 王殿常, 吴兴华. 三峡水库磷输移规律研究 [J]. *水利学报*, 2021, 52(8): 885-895.
WANG Dianchang, WU Xinghua. Analysis of phosphorus transport in the Three Gorges Reservoir [J]. *Hydraulic Engineering*, 2021, 52 (8): 885-895.

[15] 秦延文, 韩超南, 郑丙辉, 等. 三峡水库水体溶解磷与颗粒磷的输移转化特征分析 [J]. *环境科学*, 2019, 40(5): 2152-2159.
QIN Yanwen, HAN Chaonan, ZHENG Binhui, et al. Analysis of

- transport and transformation characteristics between dissolved phosphorus and particulate phosphorus in water of the Three Gorges Reservoir[J]. *Environmental Science*, 2019, 40(5): 2152-2159.
- [16] 郝晨林, 邓义祥, 汪永辉, 等. 河流污染物通量估算方法筛选及误差分析[J]. *环境科学学报*, 2012, 32(7): 1670-1676.
- HAO Chenlin, DENG Yixiang, WANG Yonghui, et al. Study on the selection and error analysis of riverine pollutant flux estimation methods [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, 32(7): 1670-1676.
- [17] 关文海, 骆国辉, 王攀菲, 等. 嘉陵江总磷通量变化及空间来源解析[J]. *中国环境科学*, 2024, 44(3): 1448-1456.
- GUAN W H, LUO G H, WANG P F, et al. Variation of TP flux in Jialing River and spatial source apportionment [J]. *China Environmental Science*, 2024, 44(3): 1448-1456.
- [18] 冉祥滨. 三峡水库营养盐分布特征与滞留效应研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009.
- RAN Xiangbin. Nutrient distributions and retention of the Three Gorges Reservoir [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2009.
- [19] 向治安, 喻学山, 刘载生, 等. 长江泥沙的来源、输移和沉积特性分析[J]. *长江科学院院报*, 1990, 7(3): 9-19.
- XIANG Zhi'an, YU Xueshan, LIU Zaisheng, et al. Characteristics analyses of sediment yielding, transportation and sedimentation in Yangtze River [J]. *Changjiang River Scientific Research Institute*, 1990, 7(3): 9-19.
- [20] 熊景华, 郭生练, 王俊, 等. 长江流域陆地水储量变化及归因研究[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2024, 49(12): 2241-2248.
- XIONG Jinghua, GUO Shenglian, WANG Jun, et al. Variation and attribution of terrestrial water storage in the Yangtze River Basin [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(12): 2241-2248.
- [21] LI W, YANG S, XIAO Y, et al. Rate and distribution of sedimentation in the Three Gorges Reservoir, upper Yangtze River [J]. 2018, 144(8): 05018006.
- [22] 范成新, 刘敏, 王圣瑞, 等. 近20年来我国沉积物环境与污染控制研究进展与展望[J]. *地球科学进展*, 2021, 36(4): 346-374.
- FAN Chengxin, LIU Min, WANG Shengrui, et al. Research progress and prospect of sediment environment and pollution control in China in recent 20 years [J]. *Advances in Earth Science*, 2021, 36(4): 346-374.
- [23] 王文静, 赵旻, 韩韵. 三峡水库不同形态磷浓度变化趋势分析[C]//中国水利学会. 中国水利学会2021学术年会论文集第三分册. 郑州: 黄河水利出版社, 2021: 442-449.
- WANG Wenjing, ZHAO Min, HAN Yun. Variation trend of different forms of phosphorus concentration in Three Gorges Reservoir [C]//China Hydraulic Engineering Society. 2021 CHIS Annual Conference. Zhengzhou: The Yellow River Water Conservancy Press, 2021: 442-449.
- [24] LI H, LIU L, LI M, et al. Effects of pH, temperature, dissolved oxygen, and flow rate on phosphorus release processes at the sediment and water interface in storm sewer [J]. *Journal of Analytical Methods in Chemistry*, 2013, 2013: 104316.
- [25] LIU J, ZHENG H, SHEN Y, et al. Variation in sediment sources and the response of suspended sediment grain size in the upper Changjiang River Basin following the large dam constructions [J]. *Science of The Total Environment*, 2023, 904: 166869.
- [26] 崔晨甲, 杨柠, 姜哈琳. 关于三峡生态型库区管理机制体系建设的思考[J]. *水利发展研究*, 2023, 23(5): 18-22.
- CUI Chenjia, YANG Ning, JIANG Hanlin. Thoughts on the construction of the management mechanism system of the Three Gorges eco-environment reservoir area [J]. *Water Resources Development Research*, 2023, 23(5): 18-22.
- [27] HAN C, ZHENG B, QIN Y, et al. Impact of upstream river inputs and reservoir operation on phosphorus fractions in water-particulate phases in the Three Gorges Reservoir [J]. *Science of The Total Environment*, 2018, 610-611: 1546-1556.
- [28] 郭长城, 王国祥, 喻国华. 天然泥沙对富营养化水体中磷的吸附特性研究[J]. *中国给水排水*, 2006(9): 10-13.
- GUO Changcheng, WANG Guoxiang, YU Guohua. Study on adsorption of phosphorus eutrophied water body by natural sediment [J]. *China Water & Wastewater*, 2006(9): 10-13.
- [29] YAO Q Z, DU J T, CHEN H T, et al. Particle-size distribution and phosphorus forms as a function of hydrological forcing in the Yellow River [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23(4): 3385-3398.
- [30] WU P, WANG N, ZHU L, et al. Spatial-temporal distribution of sediment phosphorus with sediment transport in the Three Gorges Reservoir [J]. *Science of The Total Environment*, 2021, 769: 144986.
- [31] 崔双超, 丁爱中, 潘成忠, 等. 不同粒径泥沙理化特性对磷吸附过程的影响[J]. *环境工程学报*, 2013, 7(3): 863-868.
- CUI Shuangchao, DING Aizhong, PAN Chengzhong, et al. Effect of sediment physicochemical properties on phosphorus sorption for different size particles [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2013, 7(3): 863-868.
- [32] HUANG L, FANG H, HE G, et al. Phosphorus adsorption on natural sediments with different pH incorporating surface morphology characterization [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23(18): 18883-18891.
- [33] 秦宇, 王紫薇, 韩超. 悬移质泥沙粒径对磷吸附的影响[J]. *中国给水排水*, 2017, 33(7): 80-83.
- QIN Yu, WANG Ziwei, HAN Chao. Effect of different size of suspended sediment on adsorption of phosphorus [J]. *China Water & Wastewater*, 2017, 33(7): 80-83.

- [34] MHASHHASH A, BOCKELMANN-EVANS B, PAN S. Effect of hydrodynamics factors on sediment flocculation processes in estuaries [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2018, 18(10): 3094-3103.
- [35] SUGIYAMA S, HAMA T. Effects of water temperature on phosphate adsorption onto sediments in an agricultural drainage canal in a paddy-field district [J]. *Ecological Engineering*, 2013, 61: 94-99.
- [36] 吉飞, 李志伟, 赵汗青. 水动力作用下泥沙对磷的吸附特征 [J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2017, 45(1): 56-62.
JI Fei, LI Zhiwei, ZHAO Hanqing. Characteristics of adsorption of phosphorus by sediment under hydrodynamic action [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2017, 45(1): 56-62.
- [37] 李旺, 李振亮, 祖波. 三峡库区泥沙对磷的吸附试验及模型研究 [J]. *科学技术与工程*, 2018, 18(33): 86-92.
LI Wang, LI Zhenliang, ZU Bo. Adsorption experiment and model study on phosphorus in sediment in the Three Gorges Reservoir area [J]. *Science Technology and Engineering*, 2018, 18(33): 86-92.
- [38] 杨程. 三峡库区悬浮态泥沙吸附解吸磷酸盐影响因素研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2007.
YANG Cheng. Study on Influence Factor of Phosphate Adsorption/Desorbs of Suspended Sediments in the Three Gorges Reservoir Area [D]. Chongqing: Chongqing University, 2007.
- [39] 尧印鹏, 许春阳, 陈永平, 等. 泥沙级配与成分对磷吸附作用影响试验研究 [J]. *泥沙研究*, 2023, 48(6): 1-8.
YAO Yinpeng, XU Chunyang, CHEN Yongping, et al. Experimental study on the effect of sediment gradation and component on phosphorus adsorption [J]. *Journal of Sediment Research*, 2023, 48(6): 1-8.
- [40] 朱妃. 澜沧江悬沙粒度形态特征与总磷含量关系研究 [D]. 昆明: 云南大学, 2022.
ZHU Qi. Research on the Relationship Between the Morphological Characteristics of Grain Size and Total Phosphorus Content in the Suspended Sediment of Lancang River [D]. Kunming: Yunnan University, 2022.
- [41] 李俊杰. 大亚湾和胶州湾颗粒磷的分布、输出与转化研究 [D]. 厦门: 厦门大学, 2020.
LI Junjie. Distribution, Export and Transformation of Particulate Phosphorus in Daya Bay and Jiaozhou Bay [D]. Xiamen: Xiamen University, 2020.

(责任编辑 王璐)

作者单位名称勘误声明

论文“高密度地震映像在北京‘23·7’流域性特大洪水应急除险中的应用”(已于2024年增刊2第799页正式出版),作者单位信息有误。

经与作者逐一核实,对作者单位名称勘正如下:

第一作者马国凯、第二作者刘爱友,第三作者魏定勇,作者单位不变,单位名称为:北京市水利规划设计研究院,邮编100044,单位英文名称:Beijing Institute of Water;

第四作者李宝元,作者单位勘正为:北京市水务建设管理事务中心,邮编100036,单位英文名称:Beijing Water Affairs Construction Management Center;

第五作者翟吉璇,作者单位勘正为:北京十一学校,邮编100039,单位英文名称:Beijing National Day School。

特此声明。