

## 上游梯级水库建成运行对长江总磷输移影响分析及管控对策建议<sup>\*</sup>

张为<sup>1,2</sup>,黎睿<sup>1,2</sup>,王丹阳<sup>1,2</sup>,汤显强<sup>1,2\*\*</sup>

(1:长江科学院流域水环境研究所,武汉 430010)

(2:长江科学院流域水资源与生态环境科学湖北省重点实验室,武汉 430010)

**摘要:**长江上游梯级水库的建成运行改变了河流水沙条件,河流的天然水文节律被打乱,水—沙—磷由同步输送转变成非平衡性和不连续性输送,总磷的通量和赋存形态也发生改变。受水量水位调控、泥沙拦截淤积和水库滞热等影响,河流的径流、泥沙、温度等均发生改变,并产生系列生态环境效应。针对新形势下长江总磷问题,尤其是水利工程建设运行导致径流、泥沙、水温和磷的输送变异,从水沙空间格局及磷迁移转化特征等方面梳理长江流域的新情势,并分析了径流—泥沙—温度变化对磷输送的影响。结合总磷管控现状及存在的不足,建议加强河湖库中总磷标准的衔接,完善总磷环境标准体系,推动水质基准的研究,强化地方和流域标准的制定,并坚持将总磷排放浓度与总量双重控制相结合,最终为总磷问题的有效解决提供支撑。

**关键词:**长江流域;梯级水库;水文情势;总磷;水沙变化;对策建议

### The transport impact and control strategy recommendations of total phosphorus of the Yangtze River under the establishment and operation of upstream cascade reservoirs<sup>\*</sup>

Zhang Wei<sup>1,2</sup>, Li Rui<sup>1,2</sup>, Wang Danyang<sup>1,2</sup> & Tang Xianqiang<sup>1,2 \*\*</sup>

(1: Basin Water Environmental Research Department, Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, P.R. China)

(2: Hubei Provincial Key Lab of Basin Water Resource and Eco-Environmental Science, Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, P.R. China)

**Abstract:** The water and sediment conditions have been changed by the establishment and operation of the cascade reservoirs in the upper reaches of the Yangtze River, resulting in the disruption of natural hydrological rhythm. The transports of water-sand-phosphorus have been transformed into imbalanced and discontinuous, as well as alterations in the flux and occurrence form of total phosphorus. Furthermore, under the influence of water level regulation, sediment interception and reservoir thermal stagnation, the river runoff, sediment, temperature has changed, producing a series of regional ecological environment effects. In view of the total phosphorus in the Yangtze River, especially the variation of runoff, sediment, water temperature and phosphorus transport caused by the construction and operation of water conservancy project, this paper reviewed the new situation of the Yangtze River basin from the aspects of the spatial pattern of water-sediment, as well as the migration and transformation characteristics of phosphorus in the Yangtze River. Meanwhile, the influence of runoff-sediment-temperature change on phosphorus transport was analysed. Based on the deficiencies of total phosphorus monitoring and management, it was recommended to strengthen the connection between total phosphorus standards in rivers, lakes and reservoirs, improve the environmental standard system of total phosphorus, promote the study of water quality benchmark, enhance the formulation of local and watershed standards, and adhere to the dual control of total phosphorus emission concentration and total load. These measures will ultimately contribute to the effective resolution of total phosphorus issues.

**Keywords:** Yangtze River; cascade reservoirs; hydrological regime; total phosphorus; water and sediment changes; countermeas-

\* 2023-10-09 收稿;2024-03-13 收修改稿。

中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(CKSF2023188/SW, CKSF2021442/SW)和国家自然科学基金项目(41907155)联合资助。

\*\* 通信作者;E-mail:ckyshj@126.com。

ures and suggestions

水、沙和污染物是水环境中相互关联和相互作用的基本要素。自然状态下,汇入河流湖泊的污染物,通过水体溶解分配和泥沙颗粒吸附解吸等过程实现水、沙、污染物的连续性和平衡性输送<sup>[1-2]</sup>。随着长江上游梯级水库的建成运行,受水量水位调控、泥沙拦截和淤积等影响,长江流域水文情势发生了改变,而水、沙输送变异势必改变污染物的输送格局。

2006年以来,长江流域各省市相继实施了污染物总量控制和减排措施,并制定了以化学需氧量、氨氮控制为导向的水污染防治政策,但对总磷控制相对薄弱。2016年,磷在长江流域各监测断面中超标率最高,成为长江流域的首要污染物,也是导致长江流域水体富营养化的限制性生源要素<sup>[3-7]</sup>。水、沙、磷的输送变异导致流域性生态环境效应的产生,其中支流磷输入加速了上游水库磷的累积,导致水体的富营养化风险进一步增强<sup>[8]</sup>。长江中下游浅水湖泊则普遍存在总磷超标现象,洞庭湖、鄱阳湖、巢湖、滇池、洪湖等湖泊总磷浓度难以稳定达到国家考核要求<sup>[9-11]</sup>。“十三五”时期,各地开展的总磷污染控制工作虽然取得了一定的成效,但总磷污染形势依然严峻。总体而言,长江干流水质良好,总磷达标,但局部区域总磷浓度接近标准限值,且不少监控断面总磷在汛期和非汛期差异较大<sup>[12]</sup>。2022年8月,生态环境部编制印发了《长江流域总磷污染控制方案编制指南》,指导各地因地制宜推进总磷污染控制工作,推动长江流域水生态环境持续改善,总磷防控工作是“十四五”工作的重点之一。

针对新形势下的长江总磷问题,本文从水、沙、磷的空间格局及磷输送特征等方面梳理分析长江流域的水、沙、磷情势,结合总磷监测、标准设定和考核中存在的不足,提出针对性的管控对策和建议,为全面分析长江流域水体磷污染状况、加强流域磷污染管理提供支撑。

## 1 长江流域水—沙—磷时空格局

长江干流全长6397 km,流域总面积约180万km<sup>2</sup>,流域水资源丰富,长江干流宜昌以上为上游,宜昌至湖口为中游,湖口以下为下游,流域概况如图1所示<sup>[13]</sup>。水—沙—磷之间动态的变化关系是流域中最活跃的一部分,与水势稳定、江湖关系、河湖生态系统均紧密相关。随着长江上游水电开发的逐渐深入,控制性水库群先后投入运行,其在水资源时空配置、水资源高效利用等方面发挥了重要作用。但大规模筑坝蓄水改变了河流的天然过程,天然水文节律被打乱,河流的连续性也被打破,受水位水量调控、泥沙拦截淤积和营养盐选择性拦截等影响,水、沙和磷呈现出非平衡性和不连续性输送(图2)<sup>[14]</sup>。大坝的拦截作用使中下游水体中的泥沙含量显著减小,“清水下泄”导致下游河道不断冲刷,长江中下游已经变成了“清水河流”,水体中磷的形态和浓度也发生了变化,颗粒态磷明显减少,总磷浓度大幅降低<sup>[15]</sup>。

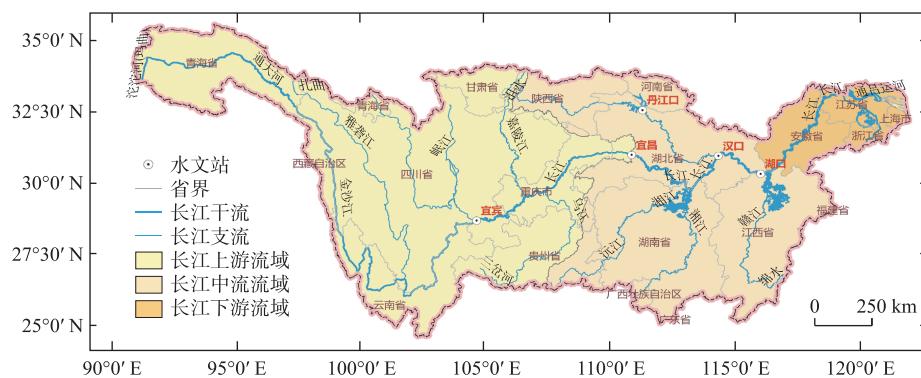


图1 长江流域概况<sup>[13]</sup>

Fig.1 Overview of the Yangtze River Basin<sup>[13]</sup>

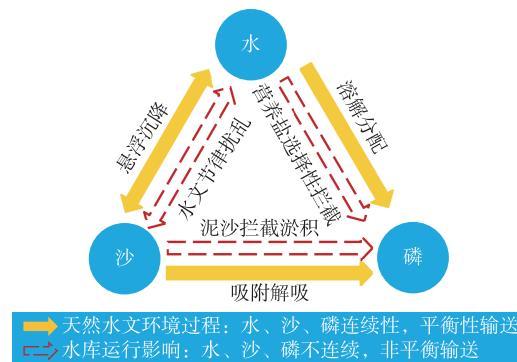


图 2 水库建设运行前后长江流域水—沙—磷输送变化

Fig.2 Changes of water-sand-phosphorus transport in Yangtze River Basin before and after the construction and operation of reservoir

### 1.1 长江干流水沙情势变化

长江上游梯级水库群的建成运行在一定程度上改变了中下游的径流量分布,具体表现为汛期洪峰削减、枯水期流量增加、中水期的持续时间延长。由于长江流域降水和径流的内陆循环是一个动态平衡的过程,所以整体上年径流量的变化并不明显。自 2003 年蓄水以来,入海径流量基本维持在  $9 \times 10^{11} \text{ m}^3$ 。但此期间,三峡大坝年均淤积泥沙量约为 1.31 亿 t,导致中下游年平均输沙量和水体含沙量发生了明显变化<sup>[16]</sup>。

根据《长江泥沙公报》,长江干流主要控制站直门达、石鼓、攀枝花等 10 个断面的水沙情况如表 1 所示<sup>[17]</sup>。2003 年三峡水库首次蓄水,蓄水前长江干流的泥沙呈现连续性变化,自三峡大坝蓄水后,长江干流水沙情势发生了变化。2003—2020 年,长江干流各控制站的年径流量呈现沿程逐渐增加的趋势,大通断面的年径流量最大,为 8782 亿  $\text{m}^3$ 。干流水体含沙量则沿程逐渐降低,泥沙含量高的区域主要集中在流域上游,这主要是由于长江上游河流比降大、流量大,细颗粒的泥沙难以沉积,水体含沙量较高。干流水体含沙量在宜昌发生突变,由寸滩断面  $0.418 \text{ kg/m}^3$  骤减到宜昌断面  $0.083 \text{ kg/m}^3$ ,泥沙中值粒径也由  $0.010 \text{ mm}$  降到  $0.007 \text{ mm}$ ,这主要由于宜昌断面是反映长江干流梯级水库累积影响的第一个断面,受水库拦沙作用,大颗粒的泥沙被拦截,导致水体中泥沙含量显著下降,泥沙也以细颗粒为主。从宜昌站往下,沙市、汉口和大通断面的输沙量和含沙量又开始上升,这是由于水库下泄水以清水为主,且多为不饱和含沙水流,携带泥沙的能力很强,在输移的过程中会对下游河床产生冲刷并带走泥沙颗粒,进而使得水体的含沙量开始上升<sup>[18]</sup>。

为进一步分析干流水沙年际变化规律,选取朱沱、寸滩和宜昌 3 个断面为分析对象,2002—2021 年间,各断面的年径流量和年输沙量的变化情况如图 3 所示。除部分特殊年份,各断面年径流量变化波动不大,年输沙量则呈现出下降趋势,其中宜昌断面年输沙量降幅最大,2021 年的输沙量相比 2002 年从  $2.28 \times 10^8 \text{ t}$  下降到  $0.111 \times 10^8 \text{ t}$ ,输沙量减少了 95.13%。但部分特殊年份,径流量和输沙量存在突变的现象,例如 2020 年各断面的年径流量和年输沙量大幅升高,主要是由于 2020 年长江发生流域性大洪水,三峡水库入库泥沙较 2003—2019 年均值偏多 30%,最大洪峰流量达到了  $75000 \text{ m}^3/\text{s}$ ;而 2006 年和 2011 年,长江流域属于枯水少沙年,流域降雨减少是各断面径流量相比其他年份显著下降的主要原因。

2021 年,朱沱、寸滩、宜昌断面的径流量和输沙量的逐月变化如图 4 所示。各断面径流量和输沙量主要集中在 5—10 月,期间朱沱、寸滩、宜昌断面的径流量分别占全年的 69%、76% 和 71%,输沙量分别占全年的 95%、98% 和 97%,5—10 月为长江流域的汛期,说明汛期和非汛期会存在明显的水沙差异,长江水沙年内分配不均匀<sup>[19-21]</sup>。

### 1.2 长江主要支流水沙情势变化

支流是长江干流水沙的主要来源,也是影响长江泥沙变异的关键因素之一。长江 8 大支流从上到下依次是雅砻江、岷江、嘉陵江、乌江、汉江、沅江、湘江和赣江。其中流域面积最大的支流为嘉陵江,长度最长的支流是汉江。基于长江八大支流年径流量和年输沙量数据(表 2),2011—2020 年,八大支流中岷江的年径

表 1 长江干流主要水文控制站多年平均水沙特征值

Tab.1 Annual average water and sediment characteristic values in the main hydrological control stations of the Yangtze River

水文控制站	控制流域面积/ 万 km <sup>2</sup>	年径流量/亿 m <sup>3</sup>		年输沙量/亿 t		年平均含沙量/(kg/m <sup>3</sup> )		中值粒径/mm	
		蓄水前	2003— 2020 年	蓄水前	2003— 2020 年	蓄水前	2003— 2020 年	蓄水前	2003— 2020 年
直门达	13.77	123.0 (1957—2002 年)	162.2 (1957—2002 年)	0.094 (1957—2002 年)	0.115 (1957—2002 年)	0.624 (1957—2002 年)	0.707 (1957—2002 年)	/	/
石鼓	21.42	423.1 (1952—2002 年)	437.3 (1958—2002 年)	0.244 (1958—2002 年)	0.328 (1958—2002 年)	0.511 (1958—2002 年)	0.750 (1987—2002 年)	0.018	0.014
攀枝花	25.92	560.4 (1966—2002 年)	584.9 (1966—2002 年)	0.520 (1966—2002 年)	0.246 (1966—2002 年)	0.916 (1966—2002 年)	0.421 (1966—2002 年)	0.014	0.012
向家坝	45.88	1437.3 (1956—2002 年)	1393 (1956—2002 年)	2.545 (1956—2002 年)	0.794 (1956—2002 年)	1.773 (1956—2002 年)	0.570 (1956—2002 年)	0.014	0.012
朱沱	69.47	2688.2 (1954—2002 年)	2613 (1954—2002 年)	3.027 (1954—2002 年)	1.16 (1954—2002 年)	1.145 (1954—2002 年)	0.442 (1954—2002 年)	0.012	0.010
寸滩	86.66	3475.5 (1950—2002 年)	3367 (1953—2002 年)	4.293 (1953—2002 年)	1.41 (1953—2002 年)	1.250 (1953—2002 年)	0.418 (1953—2002 年)	0.010	0.010
宜昌	105.55	4368.0 (1950—2002 年)	4218 (1950—2002 年)	4.918 (1950—2002 年)	0.349 (1950—2002 年)	1.135 (1950—2002 年)	0.083 (1950—2002 年)	0.009	0.007
沙市	/	3941.4 (1955—2002 年)	3907 (1956—2002 年)	4.309 (1956—2002 年)	0.522 (1956—2002 年)	1.098 (1956—2002 年)	0.134 (1956—2002 年)	0.012	0.025
汉口	148.80	7127.3 (1954—2002 年)	6929 (1954—2002 年)	3.979 (1954—2002 年)	0.967 (1954—2002 年)	0.561 (1954—2002 年)	0.140 (1954—2002 年)	0.009	0.015
大通	170.54	9051.3 (1950—2002 年)	8782 (1951—2002 年)	4.261 (1951—2002 年)	1.34 (1951—2002 年)	0.475 (1951—2002 年)	0.153 (1951—2002 年)	0.010	0.012

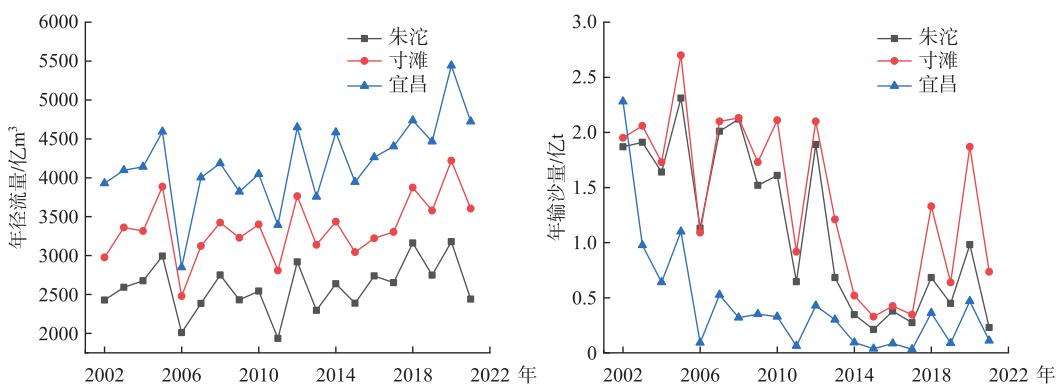


图 3 2002—2021 年朱沱、寸滩和宜昌断面的年径流量和年输沙量变化

Fig.3 Variation of annual runoff and sediment discharge at Zhutuo, Cuntan and Yichang sections from 2002 to 2021

流量最大,为 869.4 亿 m<sup>3</sup>;嘉陵江的年输沙量最大,为 0.357 亿 t;沅江、湘江和赣江的年径流量和嘉陵江相当,但年输沙量分别仅为嘉陵江的 3.9%、12.3% 和 5.6%,沅江的年输沙量最小,为 0.014 亿 t;沅江、湘江通过洞庭湖与长江相连,赣江通过鄱阳湖与长江相连,沅江、湘江、赣江的径流量与岷江和嘉陵江相当,但是年输沙量显著低于岷江。各支流汇入长江的径流量与输沙量并非呈正相关,这表明支流汇入长江干流的水—沙

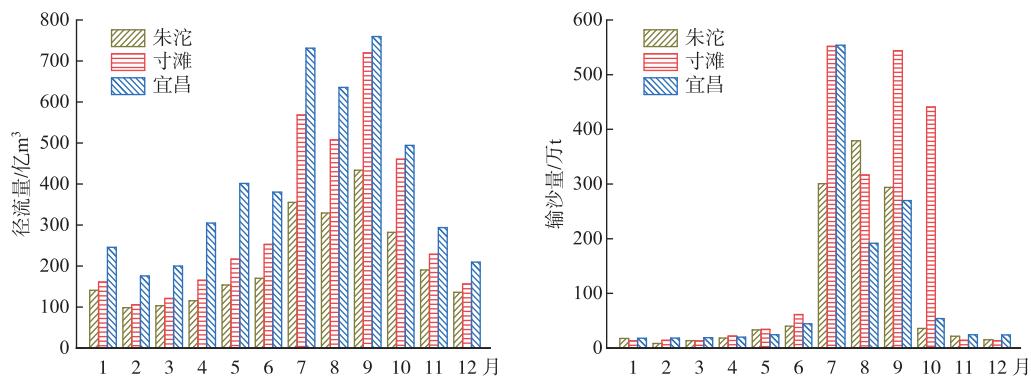


图 4 2021 年朱沱、寸滩和宜昌断面逐月径流量和输沙量变化

Fig.4 Variation of monthly runoff and sediment discharge at Zhutuo, Cuntan and Yichang sections in 2021

表 2 2011—2020 年长江流域主要支流的年径流量和年输沙量

Tab.2 Annual runoff and sediment discharge of major tributaries of the Yangtze River Basin from 2011 to 2020

支流 名称	水文 控制站	年径流量/ 亿 $\text{m}^3$	年输沙量/ 亿 t	含沙量/ ( $\text{kg/m}^3$ )
雅砻江	桐子林	592.0	0.105	0.177
岷江	高场	869.4	0.229	0.263
嘉陵江	北碚	713.5	0.357	0.500
乌江	武隆	494.2	0.028	0.056
汉江	皇庄	378.3	0.038	0.100
沅江	桃源	732.1	0.014	0.019
湘江	湘潭	686.0	0.044	0.064
赣江	外洲	737.8	0.020	0.027

成渝城市群的建设,使得城市磷输入的贡献也不断增大。相比之下,中下游地区人口密集和工业化程度较高,中下游地区农业活动和生活污水是磷的主要来源。

翟婉盈等<sup>[23]</sup>对三峡水库不同蓄水阶段总磷的变化特征进行研究,结果显示三峡水库对磷的滞留作用从2005年开始凸显。2003—2017年朱沱、寸滩断面总磷年均值、丰水期均值和枯水期均值时间变化如图5所示,朱沱、寸滩断面总磷浓度呈现类似的变化规律,总磷年均值和丰水期均值在2008年和2012年出现极大值,但整体上从2008年开始沿程降低,朱沱断面和寸滩断面2017年总磷浓度平均值相比2003年分别降低了38%和27%,丰水期均值分别降低63%和60%,但枯水期总磷浓度反而略有上升。

长江水体磷以颗粒态为主,颗粒态磷与水沙关系密切,易于被水体中悬浮泥沙吸附并随之迁移,水沙情势的变化使得磷的输移扩散也发生相应变化。随着长江大保护的不断深入,长江流域污染治理和管理水平不断提升,点源污染得到了有效控制,长江干流总磷主要来自面源污染<sup>[24]</sup>。受水库建设和上游水土流失减少的影响,长江总磷形态发生明显改变,具体表现为颗粒态磷减少而溶解态磷增加,相比于1980年,2015年大通站颗粒态总磷占比由97%下降到50%,溶解态总磷占比由3%增加到50%<sup>[25]</sup>。卓海华等<sup>[15]</sup>研究了新水沙条件下长江中下游干流水体总磷的时空变化规律,表明三峡蓄水后,长江干流已形成新的水沙条件,2004年以来,中下游干流水体澄清30 min样品总磷浓度基本在0.10~0.15 mg/L之间变动,在时间尺度上总体呈

输送不同步,存在异源、不平衡现象。支流水沙异源与支流上的水电站运行有关,目前,长江各支流上均建有水电站,例如雅砻江上建有二滩、锦屏、两河口和官地水电站,乌江上建有乌江渡、构皮滩水电站,汉江上建有孤山、丹江口水电站,水电站的运行会改变支流的水沙特性。王正成等<sup>[22]</sup>发现支流(雅砻江、岷江、嘉陵江和乌江)的水沙特性会影响长江干流泥沙变异,2002—2016年期间,受水电站运行的影响,各支流的年均含沙量、年输沙量、中值粒径、年输沙模数分别降低43.37%~71.48%、25.00%~79.26%、5.00%~16.67%和19.72%~79.34%。

### 1.3 新水沙情势下长江流域磷的分布情况

长江流域涵盖了广阔的地理区域,中上游地区地质构造活跃,存在大量富磷矿物岩石,地表径流和土壤侵蚀过程会加速磷释放,农业活动也是中上游地区磷的重要来源之一,近年来随着城镇化进程加快,尤其是

先上升后下降的趋势,在空间尺度上沿程呈现升高趋势。娄保锋等<sup>[21]</sup>对2000—2018年长江干流水质和污染物通量变化趋势进行分析发现,长江中磷通量、输送形态和时空分布特征均发生了明显变化,长江总磷汇入量中游强于下游,从上游向下游磷的输送形态也发生了变化,由以颗粒态为主逐渐开始转变为以溶解态为主。受水沙情势变化的影响,长江支流上的磷浓度和形态也发生了变化。娄保锋等<sup>[26]</sup>对乌江入长江控制断面(武隆断面)磷浓度和形态变化进行研究发现,1998—2019年,乌江总磷和溶解态磷浓度与通量在总体上呈现先升高后下降的趋势,2009—2013年为磷污染峰值期,总磷和溶解态磷浓度与通量远高于其他时期。此外,2007年以前,总磷的赋存形态以颗粒态为主,颗粒态磷在总磷中的占比均值为65%,2007年后,总磷的赋存形态转变为以溶解态为主,颗粒态磷占比均值下降为16%,溶解态磷占比由35%上升为84%,水沙情势的改变是磷通量和形态发生显著变化的主要原因。

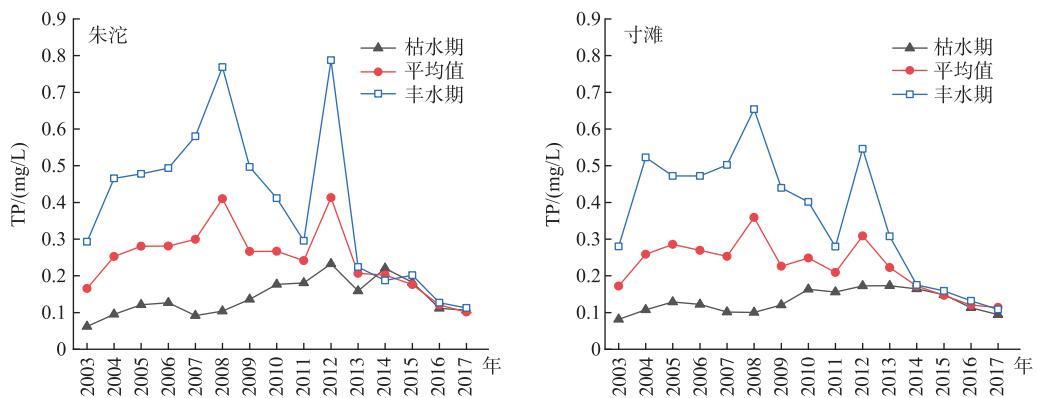


图5 2003—2017年朱沱、寸滩断面总磷平均值、丰水期均值和枯水期均值的变化<sup>[27]</sup>

Fig.5 Variation of mean value of total phosphorus, mean value of wet season and mean value of dry season in Zhutuo and Cuntan sections from 2003 to 2017<sup>[27]</sup>

## 2 天然水文节律改变对磷输送的影响

磷在水体中的迁移转化涵盖其在水环境中参与的一系列动态转变过程,包括吸附/解吸、沉积/再悬浮、平流/扩散等,在此过程中,径流、泥沙、温度是影响磷输送的重要因素,具体表现为水丰沙多污染多、水枯沙少污染少<sup>[1,27-28]</sup>。随着水利工程的建设运行,受水量水位调控、泥沙拦截淤积和水库滞热等影响,长江中下游的天然水文节律被打乱,河流的水动力特性、泥沙特性和温度特征均发生改变,磷的输移也相应发生改变<sup>[15]</sup>。

长江上游由于不同流域水土流失状况存在差异,入库径流、泥沙来源不同,导致洪峰和沙峰传播特性发生变化,水沙异源导致洪峰和沙峰出现异步现象<sup>[29,30]</sup>。三峡水库采用“蓄清排浑”和中小洪水(小于3万m<sup>3</sup>/s)调度,汛期沙峰和洪峰异步传输,75%的悬浮泥沙和颗粒磷在汛期被大坝拦截,导致坝下水体透明度升高,总磷以溶解态为主<sup>[2]</sup>。图6显示了2020—2021年汛期三峡水库出库流量、含沙量的变化情况,沙峰出现的时间明显滞后于洪峰,三峡水库蓄水后,水深增加,洪水波运动特性发生改变,洪峰传播时间从3 d减少到1 d,而沙峰在库区的传播时间

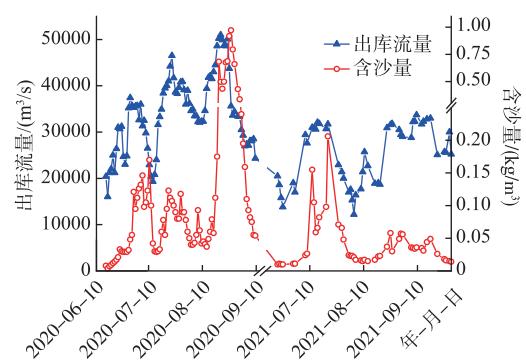


图6 2020—2021年汛期三峡水库出库流量、含沙量变化情况

Fig.6 Variation of discharge and sediment content of the Three Gorges Reservoir in flood season from 2020 to 2021

则明显增长,入库寸滩断面到坝前庙河断面平均沙峰输移时间由4.9 d延长至7.6 d,最大传播时长由8 d增加至15 d<sup>[29,30]</sup>,水沙不同步的现象进一步增强。

## 2.1 水动力条件变化对水体总磷的影响

水库调度运行导致库区周边的水力学条件发生明显变化,支流库湾水位升高、流速减缓、水动力条件变差、水体自净能力变弱,污染物易于滞留富集。三峡水库自2003年蓄水后,库区干流的流速为0.07~2.43 m/s,而天然河道的流速一般为3~5 m/s,流速下降明显<sup>[2]</sup>。水力条件改变还使支流回水区水体的停留时间较天然状态更长,例如从三峡上游库尾至下游库首,由于水体滞留和水动力状况的变化,水体的河流属性逐渐减弱,湖泊属性逐渐增强,坝前支流相较于上游支流更容易出现富营养化问题,主要超标因子总磷浓度在蓄水后高水位运行期较运行初期变高<sup>[8]</sup>。

## 2.2 泥沙变化对水体总磷的影响

磷对泥沙具有很强的亲和力,泥沙对磷的吸附沉降是河流水体自净的主要方式之一。当水体中磷以颗粒态磷为主时,水体含沙量(SS)越低,水体总磷浓度越小。但当水体悬浮泥沙含量低于临界阈值(0.2~1.0 g/L)时,颗粒态磷将不再是水体中磷的主要成分,水中大部分的磷将无法以沉降的方式去除<sup>[31]</sup>。

周建军等<sup>[32]</sup>通过对三峡蓄水前后原型观测发现,河流输送磷与泥沙含量密切相关,水库在拦截泥沙的同时还会拦截水体中的磷,相比于1961—1990年,2003—2012年宜昌站的总磷和颗粒态磷分别减少了77.6%和84.6%,其中汛期分别减少80%和84.1%,非汛期分别减少59.2%和83%。Tang等<sup>[33]</sup>在研究汛期三峡水库磷的输送及过坝特征时发现总磷与泥沙含量呈正相关关系,当泥沙含量较低时,水体总磷与泥沙含量呈线性关系,但泥沙含量超过200 mg/L后,水体总磷浓度不再随泥沙含量增加而呈线性升高趋势(图7)。这主要是由于泥沙含量高,颗粒碰撞几率增加,泥沙絮凝使整体沉降速率加快,颗粒态磷沉速随之增大;此外泥沙含量增大后,单位质量泥沙对磷的平衡吸附量减少,导致泥沙中吸附态磷浓度有所减少。

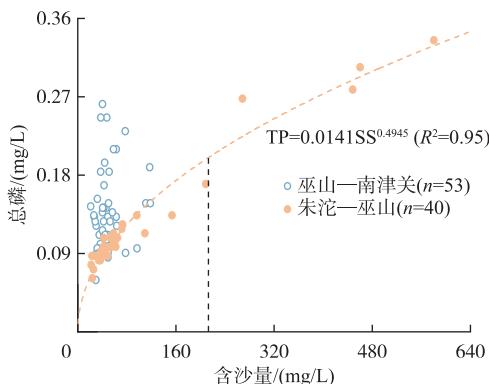


图7 三峡干流水体中总磷与含沙量的关系曲线<sup>[33]</sup>

Fig.7 Correlation between total phosphorus and suspended solid in the mainstream of Three Gorges Reservoir<sup>[33]</sup>

解态磷的吸附<sup>[34-35]</sup>。研究显示细颗粒泥沙对磷的吸附能力更强,三峡水库泥沙对磷吸附量最高达367 mg/kg,细颗粒泥沙中生物可利用性磷的浓度相对较高,其生物磷浓度(191 mg/kg)高于混合悬浮泥沙(125 mg/kg),残渣态磷也倾向于在细颗粒沉积物中富集<sup>[36]</sup>。

## 2.3 温度对水体总磷的影响

水库蓄水改变了库区及河流水温的时空分布,水深的沿程增大改变了库区内的水温分布,水库调控还会改变流域水热传递过程,造成水库迥异的水温分布。研究表明,溪洛渡和向家坝水库水温垂向分层明显,而三峡水库水温垂向几乎不分层<sup>[37-38]</sup>。受水库滞热影响,水库下游河段还会出现滞温效应,其影响程度与水库调节能力有关,调节库容越大,滞温效应影响越明显。三峡水库蓄水后,宜昌站在4—6月水温集中期对应的水温显著降低,出现“滞冷”现象,而在10—11月水温显著升高,出现“滞温”现象,三峡水库滞温效应使2009—2014年宜昌段春末水温降低4.4 °C,冬季升高4.1 °C<sup>[39]</sup>。流域水热传递过程变异改变了河流原有的能量场,进而影响库区及下游天然河道水体中磷的迁移转化。温度对磷的迁移转化主要有两方面的影响,一是影响磷的吸附—解吸的过程。研究显示温度对内源磷的释放有明显影响,随着环境温度的不断升高,沉积物释磷量明显增加。二是影响磷的生物转化。温度越低,磷酸酶活性也会降低,同时低温还会影响微生物的代谢作用,减缓磷扩散速率。若水温升高,水体和底泥微生物的活性则会得到增强,有机磷分解转化的速率也会得到提升<sup>[40]</sup>。

### 3 总磷管控现状与不足

#### 3.1 水文、水质监测不同步

河湖生态环境的变化与水文、水质密切相关,水沙输送变异产生水环境效应中的径流—泥沙—水温—磷,这是一个相互作用的整体。在长江开展的监测工作涉及多省市、多部门,各部门基于自身需要,在断面的选取、采样周期等方面有一套自己的标准体系,不同地方和部门间也会存在各自为政的情况,监测数据难以有效共享,水利、生态环境、自然资源、农业农村等部门在监测方面也存在重复建设的情况。此外,部门职能的改变也对数据资源共享造成影响,例如,以长江流域水资源保护局为主体成立生态环境部长江流域生态环境监督管理局后,长江水利委员会不再是长江水质数据权威发布部门,但“管水不得不对水质数据进行测量,测量后又不能对外发布,只好内部使用”,导致数据资源的浪费,而原长江流域水资源保护局和长江委水文局为主体的流域监测体系也不复存在,导致监测资源不足。因此水文水质监测亟待一体化整合,最好能实现“一个监测点,服务多个部门”。

#### 3.2 总磷检测标准有待进一步优化

2002年6月,新的《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)正式执行,由于检测方法的改变,地表水中一些水质指标检测会存在显著的差异,其中总磷指标受影响较为显著。现行标准中总磷测定方法对总磷的定义不清,依照标准方法经过自然沉降30 min后监测得到的数据既不是水中全部的磷,也不是水中总溶解态磷,水体中部分磷存在漏测的情况,尤其是颗粒态的磷被排除,使得目前的检测方法难以全面反映泥沙对水体中磷的影响。娄保锋等<sup>[41]</sup>将原水样定义为浑样,将澄清30 min取上层非沉降部分的样品称为澄清样,研究发现当水样中悬浮物浓度大于500 mg/L时,水体样品中90%以上的磷赋存于悬浮物中,但在现行标准下,水体样品中澄清样总磷仅为实际样品中总磷浓度的50%。此外,长江在汛期和非汛期的水沙含量存在较大的差异,而水沙又与磷密切相关,不同水期的磷在浓度和形态上会有较大的差异。一般而言,汛期的污染主要来自面源污染,汛期降雨径流对土壤颗粒的裹挟力大,导致水体含沙量增大,磷主要以颗粒态的形式存在;而非汛期的污染主要来自点源,以溶解态磷为主<sup>[19]</sup>,若忽略泥沙沉降及泥沙对磷吸附的影响,检测时将水体的颗粒磷漏掉,由于水沙含量差异造成磷形态的区别,使得不同水期磷污染情况难以有效比较。

#### 3.3 总磷标准设定和考核办法研究有待加强

磷作为水体营养盐指标,与水体的富营养化密切相关,过量输入会导致湖泊富营养化和生态系统退化,严重威胁湖泊流域生态安全和饮用水安全,因此有必要加强对水体总磷的管控。

目前,我国总磷标准参照发达国家的标准或基准来制定,这主要是由于我国缺乏本地生物区系、水体理化性质和污染物毒性特点等相关研究。但我国地域广阔,不同地区的湖泊特征差异明显,其中东部多为大型浅水性湖泊,西部多为深水高原湖泊,东部沿海、西南多为淡水湖泊,西北多为咸水湖泊,北方及中部多为碱性湖泊,而南方热带则有酸性湖泊,这与国外生态环境和环境本底值存在显著差异<sup>[42-43]</sup>。由于总磷浓度环境阈值的差异,同样的总磷浓度在一个区域会导致藻类大量繁殖而引起水华,但在另一个区域可能无任何不利影响,因此,简单设定统一的总磷浓度阈值并不能真实反映所有水域污染的控制条件,在制定标准时除了总磷浓度外,还需要同时考虑水文情势、生态背景值、气候条件等多方面因素。国外在制定磷基准时会综合考虑地理、气候等因素,采取基于区域差异的分区营养物基准,这在控制湖泊富营养化、恢复湖泊水生态系统健康方面发挥了重要作用,例如美国按照环境资源的类型、水环境质量和水量的特征,将境内划分为13个不同生态区,并设定了不同的基准值,其中湖库基准值涉及总氮、总磷、叶绿素a和透明度,河流基准值涉及总氮、总磷、叶绿素a和浊度<sup>[44-45]</sup>。我国目前虽然还未有明确的分区设定,但自“十一五”以来,我国研究者就开展了相关研究,并提出我国可按中东部湖区、云贵湖区、东北湖区、内蒙湖区、新疆湖区、青藏湖区和东南湖区7个分区来制定湖泊营养物基准<sup>[46-48]</sup>,中东部湖区的湖泊营养物基准已于2020年颁布,此外,我国还在参考美国湖泊营养物基准制定技术方法的基础上,发布了《湖泊营养物基准制定技术指南》(HJ 838—2017)。开展适合我国湖泊生态环境特征的分区营养物基准研究,是制订/修订湖泊总磷标准,实现湖泊科学化、差异化管理的科学依据,也是我国湖泊生态环境保护下一步工作的重点。

在总磷考核评价方面,我国现行的评价方法中河流和湖库执行不同的总磷标准,这主要是由于河流和

湖泊水动力条件相差较大,二者对总磷的要求不一致。《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中河流总磷Ⅱ类限值为0.1 mg/L,而湖库总磷Ⅱ类限值为0.025 mg/L,限值相差4倍。我国河湖众多,河流和湖库联系密切,对于河道型水库和过水性湖泊,由于其兼具有河流和湖泊的特点,执行湖泊或者河流的标准均存在一定的局限性。针对河道型水库,由于水库的运行导致区域水利条件发生明显改变,大坝的建立阻断了上游水体的流通,使得库区及库区附近的汇入支流形成了类似湖泊的静水系统。例如三峡水库建成后,水库水位抬升导致回水区及库湾的出现,使得库区水体流速减缓,再加上支流回水顶托,特别是库区上游在枯水期来水量减少和坝前水位的升高,干支流的流速相比于蓄水前下降明显,人为调度运行也使得三峡水库成为“一库多型”水体,对于该类情况下水体中总磷阈值的设定,若仍执行河流总磷标准显然难以满足环境保护需求<sup>[49-50]</sup>。谢培等<sup>[50]</sup>将三峡水库流域及17条主要支流划分为河流区、河湖过渡区和湖泊区,通过对“一库多型”特殊水体水动力学空间特征进行研究,提出了河湖型水库总磷评价标准。针对过水性湖泊,尤其是“吞吐型”通江湖泊,如洞庭湖、鄱阳湖,换水周期短,湖水交换更新频繁。鄱阳湖还呈现“丰水一片、枯水一线”现象,在枯水期是河道特性,在丰水期又恢复湖泊特征,其水文情势受流域来水及长江来水影响较大。由于标准值上存在差异,实际管理中通过控制入湖河流总磷来改善湖泊水质时,湖泊总磷浓度往往达不到治理目标,若直接按照湖泊的标准来限制汇入湖泊的河流水质,又容易导致河流水质标准过严,增加河流污染防治的压力。过水性湖泊由于水力停留时间短,在温度、光照和营养盐浓度等都满足藻华发生的情况时,即使藻类有繁殖,也会很快被交换出去,并不会累积,因此洞庭湖大湖水体的总磷浓度虽然一直较高,但是湖体基本很少出现水华<sup>[51-52]</sup>。

#### 4 对策和建议

长江流域总磷污染分布时空差异大,从时间尺度上看,总磷浓度逐渐降低,但是部分区域仍存在超标风险,且不同水期存在较大差异;从空间尺度上看,长江干流上游污染最严重,支流则集中在乌江、岷江;长江流域总磷分布还存在明显的区域性特点,掌握总磷污染特征,厘清总磷污染来源,提出针对性的管控措施是目前亟待解决的问题。基于总磷污染现状及存在的问题,提出以下防控对策和建议。

1)开展水沙同步监测。目前生态环境部主要是从陆域上掌握总磷污染的排放情况,但对水文过程、水量等考虑较少;水利部门则主要从水域上了解不同断面的污染物浓度及水质状况,并掌握河湖水资源开发利用情况。两者的侧重点不一样,但均为总磷污染控制需要重点开展的工作,因此有必要将水动力、水质、水文数据进行耦合,同步开展水体总磷、水量、含沙量等的监测,保证监测数据的完整性,还需建立不同部门间总磷监管信息共享机制,加强数据共享。

2)优化总磷检测的标准方法。考虑设定不同形态磷的标准。现行标准中关于总磷方法中对总磷定义为30 min的“澄清样”,建议进一步规范总磷的定义。此外,目前针对磷的水环境质量标准是以总磷为标准,但在水环境中,并非所有形态的磷均能被利用,浮游植物或水生生物优先摄取可溶性正磷酸盐。现行《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)水质指标中化学需氧量和高锰酸盐指数,总氮和氨氮均属于同一类型的指标,因此可在现有总磷标准的基础上,考虑设立磷的形态指标(总磷和可溶性正磷酸盐),既能有效体现水体营养状态,又可细化对水体中磷的控制。

3)开展河湖库磷标准衔接研究。对流动性的过水性湖泊,在其余指标均能满足相应的标准且水体无富营养化风险时,可对总磷标准限值进行适当修正;对水体流速不均的大型湖泊,可考虑分区分类进行水质评价;对入库支流河段,在综合考虑各营养盐指标的基础上,适当提升总磷标准,通过分区分类管控的方式,增强河湖库中总磷标准的衔接,进而提高标准的可行性。

4)推动水质磷基准的基础研究。结合我国总磷区系特点和污染控制的需求,在已有研究的基础上,形成适合我国区域特点的水体总磷评价的基准体系,探究区域总磷阈值,解决我国水环境质量标准过程中缺乏环境基准的问题,形成支撑我国水体总磷标准的管理体系,为科学制订/修订水环境质量标准提供支撑。

5)加强流域和区域标准的制定。基于《长江保护法》,结合区域的特点和地方磷污染防控的实际需要,从流域层面上统筹协调推进总磷污染防控工作,加强地方标准和流域标准的制订,在国家水环境标准的基础上实施“一地一议”“一地一策”。

6)坚持总量控制与标准制定相结合。把污染物排放总量和环境质量标准极值有机结合,设定浓度和总量双控的考核评价标准,明确总磷的排放限值及管控要求,健全各种环保制度和监督机制,推行排污企业清洁生产、排污总量收费和排污权交易制度,使水环境标准适应现行经济社会发展和水环境保护的需要。

7)实施基于水质改善的水沙调控和水库群联合调度。通过实施精细化“蓄清排浑”,充分利用长江上游洪峰和沙峰在传播过程中不同步的现象,建立水情—泥沙实时监测与预报体系,合理安排各水库的蓄水时间,科学调配泥沙,最终实现水体水质改善。

## 5 参考文献

- [1] Wang YK, Rhoads BL, Wang D *et al.* Impacts of large dams on the complexity of suspended sediment dynamics in the Yangtze River. *Journal of Hydrology*, 2018, **558**: 184-195. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2018.01.027.
- [2] Tang XQ, Wu M, Li R. Distribution, sedimentation, and bioavailability of particulate phosphorus in the mainstream of the Three Gorges Reservoir. *Water Research*, 2018, **140**: 44-55. DOI: 10.1016/j.watres.2018.04.024.
- [3] Xu YX, Wu X, Lu R *et al.* Total phosphorus pollution, countermeasures and suggestions of the Yangtze River economic belt. *Chinese Journal of Environmental Management*, 2018, **10**(1): 70-74. [续衍雪, 吴熙, 路瑞等. 长江经济带总磷污染状况与对策建议. 中国环境管理, 2018, **10**(1): 70-74.]
- [4] Tang XQ. Evolution, driving mechanism and control strategy for eutrophication in Changjiang River Basin. *Yangtze River*, 2020, **51**(1): 80-87. [汤显强. 长江流域水体富营养化演化驱动机制及防控对策. 人民长江, 2020, **51**(1): 80-87.]
- [5] Qin YW, Ma YQ, Wang LJ *et al.* Pollution of the total phosphorus in the Yangtze River Basin: Distribution characteristics, source and control strategy. *Research of Environmental Sciences*, 2018, **31**(1): 9-14. DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2017.04.15. [秦延文, 马迎群, 王丽婧等. 长江流域总磷污染: 分布特征·来源解析·控制对策. 环境科学研究, 2018, **31**(1): 9-14.]
- [6] Li M, Jing H, Jia M *et al.* Analysis of total phosphorus pollution and treatment characteristics in the Yangtze River economic belt during 2016–2019. *Environmental Monitoring in China*, 2021, **37**(5): 94-102. DOI: 10.19316/j.issn.1002-6002.2021.05.11. [李曼, 敬红, 贾曼等. 2016—2019年长江经济带总磷污染及治理特征分析. 中国环境监测, 2021, **37**(5): 94-102.]
- [7] Chen SR, He LH, Zhang FY *et al.* Spatiotemporal characteristics of surface water quality of the Yangtze River Basin during 2016–2019. *Research of Environmental Sciences*, 2020, **33**(5): 1100-1108. DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2020.04.03. [陈善荣, 何立环, 张凤英等. 2016—2019年长江流域水质时空分布特征. 环境科学研究, 2020, **33**(5): 1100-1108.]
- [8] Jiao JL, Ma W, Pei QN *et al.* Study on the characteristics of eutrophication evolution of tributaries of the Three Gorges Reservoir. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2018, **6**(6): 544-548. [焦军丽, 马巍, 裴倩楠等. 三峡库区支流库湾水体富营养化演变特征研究. 中国水利水电科学研究院学报, 2018, **6**(6): 544-548.]
- [9] Ji PF, Xu H, Zhan X *et al.* Spatial-temporal variations and driving of nitrogen and phosphorus ratios in lakes in the middle and lower reaches of Yangtze River. *Environmental Science*, 2020, **41**(9): 4030-4041. DOI: 10.13227/j.hjkx.202002017. [季鹏飞, 许海, 詹旭等. 长江中下游湖泊水体氮磷比时空变化特征及其影响因素. 环境科学, 2020, **41**(9): 4030-4041.]
- [10] Zhu GW, Xu H, Zhu MY *et al.* Changing characteristics and driving factors of trophic state of lakes in the middle and lower reaches of Yangtze River in the past 30 years. *J Lake Sci*, 2019, **31**(6): 1510-1524. DOI: 10.18307/2019.0622. [朱广伟, 许海, 朱梦圆等. 三十年来长江中下游湖泊富营养化状况变迁及其影响因素. 湖泊科学, 2019, **31**(6): 1510-1524.]
- [11] Zhao YH, Li T, Huang B *et al.* Evolution characteristics and driving factors of water quality and eutrophication of typical lakes in the middle reaches of the Yangtze River from 2016 to 2020. *J Lake Sci*, 2022, **34**(5): 1441-1451. DOI: 10.18307/2022.0503. [赵晏慧, 李韬, 黄波等. 2016—2020年长江中游典型湖泊水质和富营养化演变特征及其驱动因素. 湖泊科学, 2022, **34**(5): 1441-1451.]
- [12] Yin W, Wang C, Zhang H. Consideration on total phosphorus problem in Yangtze River Basin. *Yangtze River*, 2022, **53**(4): 44-52. [尹炜, 王超, 张洪. 长江流域总磷问题思考. 人民长江, 2022, **53**(4): 44-52.]
- [13] Yang W, Li RQ. Characteristics and causes of the total phosphorus pollution in the Yangtze River and Han River. *China Rural Water and Hydropower*, 2021, (1): 42-47. DOI: 10.3969/j.issn.1007-2284.2021.01.009. [杨卫, 李瑞清. 长江和汉江总磷污染特征及成因分析. 中国农村水利水电, 2021, (1): 42-47.]
- [14] Poff NL, Schmidt JC. How dams can go with the flow. *Science*, 2016, **353**(6304): 1099-1100. DOI: 10.1126/science.ah4926.
- [15] Zhuo HH, Lou BF, Wu YL *et al.* Temporal and spatial characteristics of total phosphorus in the middle and Lower Yangtze River mainstem under new water and sediment conditions. *Environmental Science*, 2020, **41**(12): 5371-5380. DOI: 10.13227/j.hjkx.202005108. [卓海华, 娄保锋, 吴云丽等. 新水沙条件下长江中下游干流水体总磷时空变化分析. 环境科学, 2020, **41**(12): 5371-5380.]
- [16] Chen YX, Liu RM, Sun CC *et al.* Spatial and temporal variations in nitrogen and phosphorous nutrients in the Yangtze River Estuary. *Marine Pollution Bulletin*, 2012, **64**(10): 2083-2089. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2012.07.020.
- [17] 水利部长江水利委员会. 长江泥沙公报. 武汉: 长江出版社, 2001—2021.

- [18] 张祺. 滞缓河流悬浮颗粒物影响下的磷循环特征研究[学位论文]. 邯郸: 河北工程大学, 2021.
- [19] Yu Y, Wang DY, Tang XQ et al. Transport characteristics of main nutrients and contribution of tributaries in middle and lower reaches of Yangtze River at end of flood season. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2022, 31(5): 1039-1050. DOI: 10.11870/cjlyzyy-hj202205009. [俞洋, 王丹阳, 汤显强等. 汛末长江中下游主要营养盐输送特征及支流水系贡献. 长江流域资源与环境, 2022, 31(5): 1039-1050.]
- [20] Tang XQ, Li R, Han D et al. Response of eutrophication development to variations in nutrients and hydrological regime: A case study in the Changjiang River(yangtze) basin. *Water*, 2020, 12(6): 1634. DOI: 10.3390/w12061634.
- [21] Lou BF, Zhuo HH, Zhou Z et al. Analysis on alteration of water quality and pollutant fluxes in the Yangtze mainstem during recently 18 years. *Research of Environmental Sciences*, 2020, 33(5): 1150-1162. DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2020.04.24. [娄保锋, 卓海华, 周正等. 近18年长江干流水质和污染物通量变化趋势分析. 环境科学研究, 2020, 33(5): 1150-1162.]
- [22] Wang ZC, Mao HT, Shen JW et al. Analysis of water and sediment characteristics in the main tributaries of the Yangtze River and their associated influence factors. *Journal of East China Normal University: Natural Science*, 2020, (1): 126-138. DOI: 10.3969/j.issn.1000-5641.201841031. [王正成, 毛海涛, 申纪伟等. 长江上游主要支流水沙特性及其影响因素分析. 华东师范大学学报: 自然科学版, 2020, (1): 126-138.]
- [23] Zhai WY, Zhan RY, Zhuo HH et al. Variation characteristics of total phosphorus in different periods in the Three Gorges Reservoir after its impoundment. *China Environmental Science*, 2019, 39(12): 5069-5078. [翟婉盈, 湛若云, 卓海华等. 三峡水库蓄水不同阶段总磷的变化特征. 中国环境科学, 2019, 39(12): 5069-5078.]
- [24] Li HS, Yang QP, Zhao YM. Focusing on water eco-environment problems and sustainably promoting ecological conservation and restoration of the Yangtze River. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2022, 12(2): 336-347. DOI: 10.12153/j.issn.1674-991X.20220091. [李海生, 杨鹃平, 赵艳民. 聚焦水生态环境突出问题,持续推进长江生态保护修复. 环境工程技术学报, 2022, 12(2): 336-347.]
- [25] Hu MP, Liu YM, Zhang YF et al. Long-term (1980–2015) changes in net anthropogenic phosphorus inputs and riverine phosphorus export in the Yangtze River Basin. *Water Research*, 2020, 177: 115779. DOI: 10.1016/j.watres.2020.115779.
- [26] Lou BF, Huang B, Huang XL et al. Variation of phosphorus concentration and flux in Wujiang River entering the Yangtze River and source apportionment. *J Lake Sci*, 2024, 36(1): 64-76. DOI: 10.18307/2024.0120. [娄保锋, 黄波, 黄小龙等. 乌江磷浓度与通量变化及来源解析. 湖泊科学, 2024, 36(1): 64-76.]
- [27] Bowes MJ, House WA, Hodgkinson RA. Phosphorus dynamics along a river continuum. *Science of the Total Environment*, 2003, 313(1/2/3): 199-212. DOI: 10.1016/S0048-9697(03)00260-2.
- [28] Cai SZ, Li DP, Tang XY et al. Distribution of external phosphorus in the sedimentary phosphorus forms under different disturbances. *Environmental Science*, 2017, 38(11): 4607-4614. DOI: 10.13227/j.hjkx.201704166. [蔡顺智, 李大鹏, 唐鑫煜等. 不同扰动下外源磷在形态瞬间的分布规律. 环境科学, 2017, 38(11): 4607-4614.]
- [29] Zhang W, Li X, Ren JQ et al. Influence of the impoundment of cascade reservoirs on the asynchronies of flood peak and sediment peak in the Three Gorges Reservoir. *Advances in Water Science*, 2020, 31(4): 481-490. [张为, 李昕, 任金秋等. 梯级水库蓄水对三峡水库洪峰沙峰异步性的影响. 水科学进展, 2020, 31(4): 481-490.]
- [30] Wang YX, Jin ZW, Chen P et al. Water-sediment asynchrony and transport time of sand peak in flood season of Three Gorges Reservoir. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2022, 39(9): 24-29, 37. DOI: 10.11988/cyyb.20210510. [王玉璇, 金中武, 陈鹏等. 三峡水库汛期水沙异步特性及沙峰输移时间研究. 长江科学院院报, 2022, 39(9): 24-29, 37.]
- [31] Pan G, Krom MD, Zhang MY et al. Impact of suspended inorganic particles on phosphorus cycling in the Yellow River(China). *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(17): 9685-9692. DOI: 10.1021/es4005619.
- [32] Zhou JJ, Zhang M, Li Z. Dams altered Yangtze River phosphorus and restoration countermeasures. *J Lake Sci*, 2018, 30(4): 865-880. DOI: 10.18307/2018.0401. [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. 湖泊科学, 2018, 30(4): 865-880.]
- [33] Tang XQ, Li R, Wang DY et al. Reservoir flood regulation affects nutrient transport through altering water and sediment conditions. *Water Research*, 2023, 233: 119728. DOI: 10.1016/j.watres.2023.119728.
- [34] Tang XQ, Wu M, Dai XC et al. Phosphorus storage dynamics and adsorption characteristics for sediment from a drinking water source reservoir and its relation with sediment compositions. *Ecological Engineering*, 2014, 64: 276-284. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2014.01.005.
- [35] Wu P, Wang NR, Zhu LJ et al. Spatial-temporal distribution of sediment phosphorus with sediment transport in the Three Gorges Reservoir. *Science of the Total Environment*, 2021, 769: 144986. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.144986.
- [36] Wang XX, Zhou J, Wu YH et al. Fine sediment particle microscopic characteristics, bioavailable phosphorus and environmental effects in the world largest reservoir. *Environmental Pollution*, 2020, 265: 114917. DOI: 10.1016/j.envpol.2020.114917.
- [37] Luo HH, Li Q, Li C. The impact of water temperature during the fish reproduction in the Upper Yangtze River due to the cascade development in the lower Jinsha River. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2012, 10(4): 256-259, 266. [骆

- 辉煌, 李倩, 李翀. 金沙江下游梯级开发对长江上游保护区鱼类繁殖的水温影响. 中国水利水电科学研究院学报, 2012, **10**(4): 256-259, 266.]
- [38] Cao GJ, Hui EQ, Hu XE. Analysis of the vertical structure of water temperature in the vicinity area of Three Gorges Dam since the Three Gorges Reservoir impounds. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2012, **43**(10): 1254-1259. [曹广晶, 惠二青, 胡兴娥. 三峡水库蓄水以来近坝区水温垂向结构分析. 水利学报, 2012, **43**(10): 1254-1259.]
- [39] Tao YW, Wang YK, Wang D et al. Assessing water temperature variations and impacts on fish spawning downstream of Three Gorges Dam. *Journal of Hydropower Engineering*, 2018, **37**(10): 48-55. DOI: 10.11660/slfxb.20181006. [陶雨薇, 王远坤, 王栋等. 三峡水库坝下水温变化及其对鱼类产卵影响. 水力发电学报, 2018, **37**(10): 48-55.]
- [40] Peng SX, Chen DP, Wang JW et al. Progress in phosphorus biogeochemical cycle under global changes. *Environmental Ecology*, 2020, **2**(12): 1-7, 22. [彭淑娴, 陈登鹏, 王嘉伟等. 全球变化背景下磷生物地球化学循环研究进展. 环境生态学, 2020, **2**(12): 1-7, 22.]
- [41] Lou BF, Zang XP, Hong YP et al. The effect of sample pretreatment on determination of total phosphorus in water. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, **26**(8): 1393-1399. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2006.08.027. [娄保锋, 臧小平, 洪一平等. 水样不同处理方式对总磷监测值的影响. 环境科学学报, 2006, **26**(8): 1393-1399.]
- [42] Wu FC, Meng W, Song YH et al. Research progress in lake water quality criteria in China. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, **28**(12): 2385-2393. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2008.12.016. [吴丰昌, 孟伟, 宋永会等. 中国湖泊水环境基准的研究进展. 环境科学学报, 2008, **28**(12): 2385-2393.]
- [43] Zhang Y, Lin JN, Wang H et al. Research on environmental quality standard for surface water. *Research of Environmental Sciences*, 2020, **33**(11): 2523-2528. DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2020.10.14. [张远, 林佳宁, 王慧等. 中国地表水环境质量标准研究. 环境科学研究, 2020, **33**(11): 2523-2528.]
- [44] Wang YY, Wang YL, Han YW et al. Review of surface water environmental quality standards(2): Introduction and analysis of foreign surface water environmental quality standards and benchmarks. *Sichuan Environment*, 2022, **41**(2): 273-280. [王以尧, 王雅璐, 韩永旺等. 地表水环境质量标准综述(二)——国外地表水环境质量标准、基准介绍及分析. 四川环境, 2022, **41**(2): 273-280.]
- [45] Wang YY, Wang YL, Chen XT et al. Review of surface water environmental quality standards(3): Common problems and analysis in standard connection. *Sichuan Environment*, 2022, **41**(3): 252-257. [王以尧, 王雅璐, 陈新拓等. 地表水环境质量标准综述(三)——标准衔接中常见问题及分析. 四川环境, 2022, **41**(3): 252-257.]
- [46] Huo SL, Ma CZ, Xi BD et al. Determining ecoregional numeric nutrient criteria by stressor-response models in Yungui ecoregion lakes, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, **21**(14): 8831-8846. DOI: 10.1007/s11356-014-2819-6.
- [47] Zhang YL, Huo SL, Ma CZ et al. Using stressor-response models to derive numeric nutrient criteria for lakes in the eastern plain ecoregion, China. *CLEAN-Soil, Air, Water*, 2014, **42**(11): 1509-1517. DOI: 10.1002/clen.201300708.
- [48] Huo SL, Ma CZ, Xi BD et al. Nonparametric approaches for estimating regional lake nutrient thresholds. *Ecological Indicators*, 2015, **58**: 225-234. DOI: 10.1016/j.ecolind.2015.05.065.
- [49] Yao JZ, Fan XJ, Yang X et al. Current situation, causes and control measures of water bloom in the key tributaries of the Three Gorges Reservoir. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2022, **16**(6): 2041-2048. DOI: 10.12030/j.cjee.202112199. [姚金忠, 范向军, 杨霞等. 三峡库区重点支流水华现状、成因及防控对策. 环境工程学报, 2022, **16**(6): 2041-2048.]
- [50] Xie P, Sun N, Fang Y et al. Study on hydrodynamic partition and total phosphorus standard in the Three Gorges Reservoir. *China Environmental Science*, 2022, **42**(10): 4752-4757. [谢培, 孙宁, 方源等. 三峡水库水动力分区及总磷标准研究. 中国环境科学, 2022, **42**(10): 4752-4757.]
- [51] Luo YP, Liao YH, Pan HT. The control standard of total phosphorus in water-passing lakes should be treated differently. *Environmental Economy*, 2017, (8): 60-61. [罗岳平, 廖岳华, 潘海婷. 过水型湖泊总磷控制标准要区别对待. 环境经济, 2017, (8): 60-61.]
- [52] Yang XY, Pan HT, Liao YH et al. Water quality evaluation of Dongting Lake should be based on river standards. *Environmental Economy*, 2018, (18): 58-59. [阳星宇, 潘海婷, 廖岳华等. 洞庭湖水质评价应按河流标准. 环境经济, 2018, (18): 58-59.]