

2008 年调水调沙期间黄河下游悬浮颗粒物中磷的赋存形态

魏俊峰¹, 陈洪涛^{1*}, 刘月良², 单凯², 姚庆祯¹, 何会军¹, 于志刚¹

(1. 中国海洋大学海洋化学理论与工程技术教育部重点实验室, 青岛 266100; 2. 山东黄河三角洲国家级自然保护区管理局, 东营 257091)

摘要:2008 年调水调沙期间在黄河利津采集悬浮颗粒物样品, 并采用水淘选法对样品进行了粒径分级, 应用改进后的 SEDEX 法对颗粒物中磷的赋存形态进行了分析. 结果表明, 自生磷灰石磷和有机磷是调水调沙期间黄河悬浮颗粒物中磷的主要赋存形态; 调水调沙期间悬浮颗粒物中总磷、弱吸附态磷、有机磷和非活性有机磷的含量低于非调水调沙时期, 而碎屑磷灰石磷的含量高于非调水调沙时期; 粒径是影响悬浮颗粒物中各形态磷含量的重要因素, 弱吸附态磷、有机磷和非活性有机磷在细颗粒中含量较高, 而碎屑磷灰石磷在粗颗粒中含量较高; 调水调沙期间生物可利用磷的含量约占颗粒态总磷的 28.3%, 其中有有机磷又是生物可利用磷的主要组成部分; 2008 年调水调沙期间黄河输送的泥沙、颗粒态磷和潜在的生物可利用磷总量分别为 6.63×10^7 、 3.42×10^4 和 8.30×10^3 t, 分别占全年输送通量的 83.2%、78.6% 和 80.2%.

关键词: 磷形态; 粒径; 悬浮颗粒物; 调水调沙; 黄河

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2011)02-0368-07

Phosphorus Forms of the Suspended Particulate Matter in the Yellow River Downstream During Water and Sediment Regulation 2008

WEI Jun-feng¹, CHEN Hong-tao¹, LIU Yue-liang², SHAN Kai², YAO Qing-zhen¹, HE Hui-jun¹, YU Zhi-gang¹

(1. Key Laboratory of Marine Chemistry Theory and Technology, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Administration of Shandong Yellow River Delta National Nature Reserve, Dongying 257091, China)

Abstract: Suspended particulate matter samples were collected from Lijin Station on the Yellow River during the 2008 water and sediment regulation. Using water elutriation method, samples were physically separated according to grain size, and phosphorus forms were detected by the improved SEDEX technology. Results show that authigenic apatite phosphorus and organic phosphorus are the dominant forms of the particulate phosphorus. During water and sediment regulation, concentrations of total particulate phosphorus, loosely adsorbed phosphorus, organic phosphorus and refractory phosphorus are lower than those in other time of the year, while the concentration of detrital fluorapatite phosphorus is higher than that in other time. Grain size is the primary variable in the determination of the content of various particulate phosphorus forms. In fine particles, loosely adsorbed phosphorus, organic phosphorus and refractory phosphorus concentrations are high, while detrital fluorapatite phosphorus concentration is high in coarse particles. About 28.3% of the total particulate phosphorus is in the form of bio-available phosphorus, of which organic phosphorus is the major component. During the water and sediment regulation, the fluxes of sediment, particulate phosphorus and particulate bio-available phosphorus are 6.63×10^7 t, 3.42×10^4 t, and 8.30×10^3 t, which are 83.2%, 78.6%, and 80.2% each of the total fluxes in 2008.

Key words: phosphorus forms; grain size; suspended particulate matter; water and sediment regulation; Yellow River

磷是重要的生源要素, 是生物体生长和繁殖必需的成分. 全球河流每年向海洋输送的磷通量约为 $17.5 \times 10^9 \sim 21.0 \times 10^9$ kg^[1], 其中绝大部分是以颗粒态形式输送的^[2]. 黄河是世界上含沙量最高的河流, 多年平均输沙量为 8.23 亿 t, 黄河自 2002 年开始调水调沙, 调水调沙成为黄河泥沙输送的主要时期^[3]. 同时, 不同粒径颗粒物在水体中的运动不同^[4], 对磷的携带能力也不尽相同^[5,6], 而调水调沙过程中, 泥沙扰动、引水控制等手段, 显著改变了黄河悬浮颗粒物的级配^[7], 因此调水调沙过程必将对

由黄河输入到渤海的颗粒磷产生重要影响.

悬浮颗粒物中的磷以不同的化学形态存在, 研究表明^[8-10], 由于物理、化学和生物因素的作用, 颗粒磷在河流输送过程中其赋存形态会发生变化, 这些变化对于下游及河口的营养状况具有重要的

收稿日期: 2010-03-08; 修订日期: 2010-05-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(40876038); 国家基础科学人才培养基金项目(J0730530); 山东省自然科学基金项目(Y2008E06)

作者简介: 魏俊峰(1983~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为海洋生物地球化学, E-mail: junfengwei@yahoo.cn

* 通讯联系人, E-mail: chenht@ouc.edu.cn

影响。

本研究利用水淘选法对 2008 年调水调沙期间黄河利津水文站的悬浮颗粒物进行了粒径分级,采用改进后的 SEDEX 方法对调水调沙期间悬浮颗粒物及不同粒径悬浮颗粒物中磷的赋存形态进行了分析,对其含量、分布特征及影响因素进行了初步的讨论,以期为评估调水调沙对黄河口乃至渤海生态系统的影响提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集与分级

2008 年黄河调水调沙始于 6 月 19 日,止于 7 月 3 日。基于黄河利津断面河道较窄、水深较浅,调水调沙期间水量大、流速快,悬浮颗粒物在河道中分布较为均匀的状况,于 2008 年调水调沙前后(6 月 16 日~7 月 12 日),每天 08:00 在黄河利津断面(118°18'22"E;37°30'55"N)用塑料桶采集上层水样,用 0.45 μm 的醋酸纤维滤膜(预先用 1:1 000 HCl 浸泡 24 h,并以 Milli-Q 水洗至中性,烘干称重)过滤,滤膜冷冻保存,用于悬浮颗粒物中磷赋存形态的分析。另取一瓶水样用于粒度分析。

分别于 6 月 20 日流量较小时(调水调沙尚未影响到利津站)和 6 月 26 日流量接近峰值时,在利津站采集约 100 L 上层水样,采用基于 Stokes 原理的水淘选装置^[11,12],将水体中的悬浮颗粒物分为 5 个粒级^[13],按颗粒从小到大依次为:黏土(< 8 μm)、细粉砂(8~16 μm)、中粉砂(16~32 μm)、粗粉砂(32~63 μm)、砂和砾石(>63 μm)。各粒级样品用前述滤膜过滤后,冷冻保存,用于磷赋存形态的分析。

1.2 样品分析方法

磷的赋存形态采用改进后的 SEDEX 法^[14]进行分析,将颗粒物中的磷分为弱吸附态磷、有机磷、铁结合态磷、自生磷灰石磷、碎屑磷灰石磷和非活性有机磷。

样品粒度采用 Mastersizer2000 激光粒度仪(英国 MALVERN 公司)进行测定。该仪器的测试粒度范围为 0.02~2 000 μm ,多次重复测量误差 <3%。

2 结果与分析

2.1 水文特征

图 1 为采样期间利津站流量和含沙量变化。小浪底水库位于观测点上游约 870 km 处,6 月 19 日 09:00 调水调沙开始,水库下泄流量为 2 600 m^3/s ,6

月 23 日人造洪峰到达利津,流量由调水调沙前的约 400 m^3/s 持续增长,6 月 30 日达到最大值 3 940 m^3/s ,然后逐渐回落,7 月 8 日利津站流量为 887 m^3/s ,流量处于正常防汛状态。含沙量的变化趋势与流量不尽相同,6 月 23 日含沙量开始上升,6 月 24 日达到第 1 个峰值 17.3 kg/m^3 后略有下降,这是由于小浪底水库下泄清水冲刷下游河道造成的;7 月 5 日开始含沙量再次迅速升高,7 月 6 日达到第 2 个峰值 43.6 kg/m^3 后迅速下降,这是由于小浪底水库高含沙量的异重流^[15]下泄造成的,7 月 12 日利津站含沙量降至 6.59 kg/m^3 ,利津站受调水调沙的影响基本结束,本研究所指调水调沙期间为 6 月 23 日~7 月 12 日,是针对利津站所受到影响的时间。

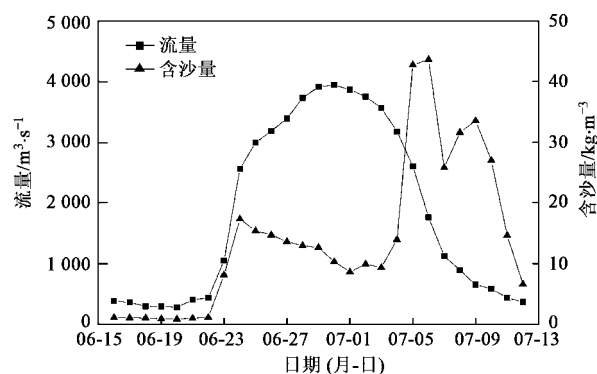


图 1 2008 年黄河调水调沙期间利津站流量和含沙量的变化

Fig. 1 Water discharges and suspended particle matter concentrations at Lijin station during water and sediment regulation in 2008

图 2 中给出了采样期间不同粒级颗粒物在总悬浮颗粒物中所占比例。从中可知,细颗粒的黏土是悬浮颗粒物的主要组成部分,所占比例为 29.7%~71.2%,且调水调沙前期所占比例低于非调水调沙时期,后期则高于非调水调沙时期;中粉砂、粗粉砂和砂所占比例分别为 6.3%~29.4%、1.36%~19.3%和 0.35%~8.18%,且随着黏土比例的升高而降低;细粉砂所占比例的变化不大,介于 19.4%~27.6%之间。图 3 为采样期间悬浮颗粒物中值粒径的变化,与流量变化大致相同,采样期间中值粒径总体上呈现出先升高后降低的趋势,调水调沙前期中值粒径显著高于非调水调沙时期,后期低于非调水调沙时期,这主要是由于调水调沙前期和后期泥沙来源不同造成的。图 4(a)中利津站流量-含沙量呈现顺时针延迟,表明调水调沙前期悬浮颗粒物主要来自于河道^[16],此阶段小浪底水库下泄清水冲刷河道,利津站泥沙粗化^[17],中值粒径高于非调水调

沙时期. 图 4(b) 中流量-含沙量呈现逆时针延迟, 表明调水调沙后期利津站悬浮颗粒物主要来自于外源输入^[16], 即小浪底水库下泄的以细颗粒为主的异重流^[17,18], 因此, 这一阶段泥沙的中值粒径明显小于调水调沙前期和非调水调沙时期.

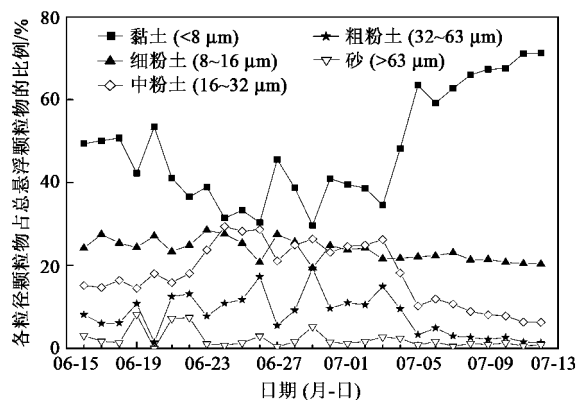


图 2 2008 年黄河调水调沙期间利津站各粒径颗粒物占总悬浮颗粒物的比例

Fig. 2 Contribution of various size fractions to the total suspended particulate matter at Lijin station during water and sediment regulation in 2008

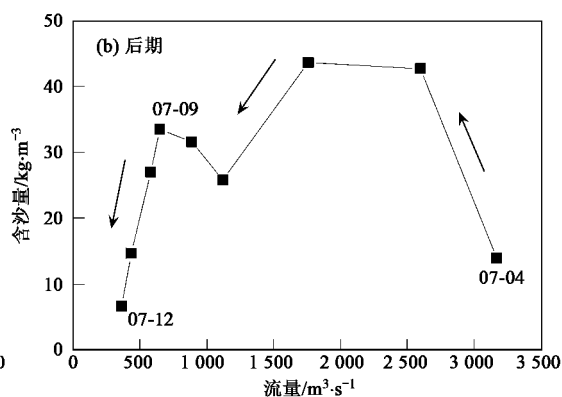
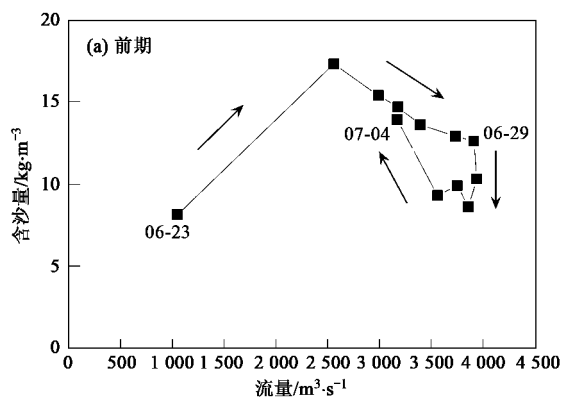


图 4 2008 年黄河调水调沙前期及后期利津站流量与含沙量之间的关系

Fig. 4 Relationship of discharges and suspended particle matter concentrations at Lijin station during former period and latter period of water and sediment regulation in 2008

$\mu\text{mol/g}$ (平均值为 $3.77 \mu\text{mol/g}$)、 $0.37 \sim 3.31 \mu\text{mol/g}$ (平均值为 $1.82 \mu\text{mol/g}$)、 $2.63 \sim 8.35 \mu\text{mol/g}$ (平均值为 $5.31 \mu\text{mol/g}$)、 $0.51 \sim 8.42 \mu\text{mol/g}$ (平均值为 $3.25 \mu\text{mol/g}$)、 $0.76 \sim 5.06 \mu\text{mol/g}$ (平均值为 $2.52 \mu\text{mol/g}$)；悬浮颗粒物中各形态磷占总磷的比重分别为 6.68% 、 21.6% 、 10.3% 、 29.5% 、 18.2% 、 13.6% 。可以看出, 各形态磷在总磷中所占的比例为: 自生磷灰石磷 > 有机磷 > 碎屑磷灰石磷 > 非活性有机磷 > 铁结合态磷 > 弱吸附态磷, 其中自生磷灰石磷和有机磷是黄河悬浮

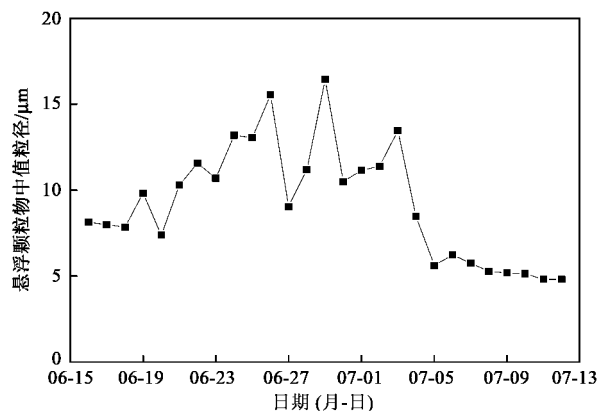


图 3 2008 年黄河调水调沙期间利津站悬浮颗粒物中值粒径变化
Fig. 3 Middle size of the suspended particulate matter at Lijin station during water and sediment regulation in 2008

2.2 悬浮颗粒物中各形态磷的含量和分布

采样期间悬浮颗粒物中总磷的含量为 $10.6 \sim 25.9 \mu\text{mol/g}$, 平均值为 $17.8 \mu\text{mol/g}$. 其中弱吸附态磷、有机磷、铁结合态磷、自生磷灰石磷、碎屑磷灰石磷、非活性有机磷含量的变化范围分别为 $0.72 \sim 2.96 \mu\text{mol/g}$ (平均值为 $1.13 \mu\text{mol/g}$)、 $1.83 \sim 7.81$

颗粒物中磷的主要赋存形态.

图 5 为采样期间悬浮颗粒物中各形态磷的分布, 可以看出, 采样期间悬浮颗粒物中总磷含量总体上呈现出先降低后升高的趋势, 且调水调沙期间的含量 (平均值为 $17.6 \mu\text{mol/g}$) 低于非调水调沙时期 (平均值为 $22.9 \mu\text{mol/g}$). 各形态磷含量的变化则不尽相同, 采样期间弱吸附态磷、有机磷含量呈现出先升高、后降低、而后又略有升高的趋势, 调水调沙期间两者的平均含量分别为 $0.97 \mu\text{mol/g}$ 和 $3.10 \mu\text{mol/g}$, 均低于非调水调沙时期的 $1.61 \mu\text{mol/g}$ 和

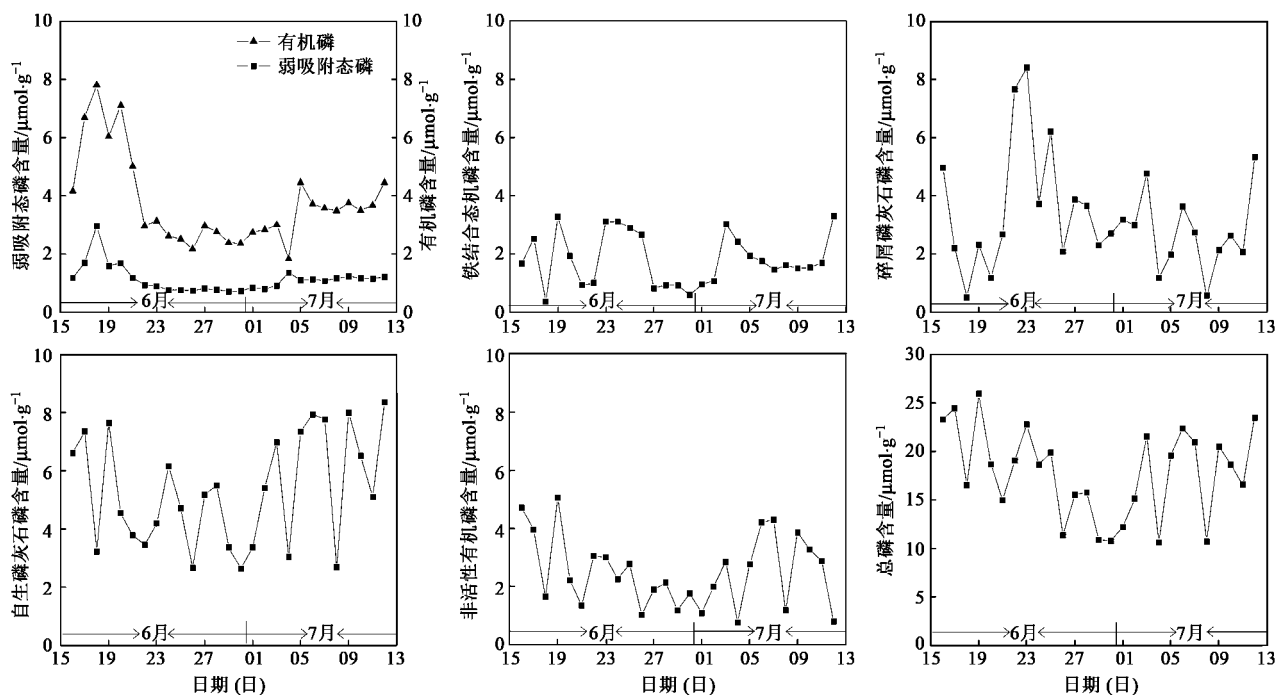


图5 2008 年黄河调水调沙期间利津站悬浮颗粒物中各形态磷的分布

Fig. 5 Distribution of different phosphorus fractions in suspended particles at Lijin station during water and sediment regulation in 2008

5. $68 \mu\text{mol/g}$. 而碎屑磷灰石磷在采样期间总体上呈现出先降低后升高而后降低的趋势, 调水调沙期间的平均含量 ($3.31 \mu\text{mol/g}$) 明显高于非调水调沙时期 ($3.07 \mu\text{mol/g}$). 铁结合态磷和自生磷灰石磷的含

量在调水调沙前后没有明显变化.

2.3 不同粒级颗粒物中各形态磷的分布

图6为各形态磷在不同粒级颗粒物中的分布. 可以看出, 不同形态的磷同粒径的关系不尽相同. 随

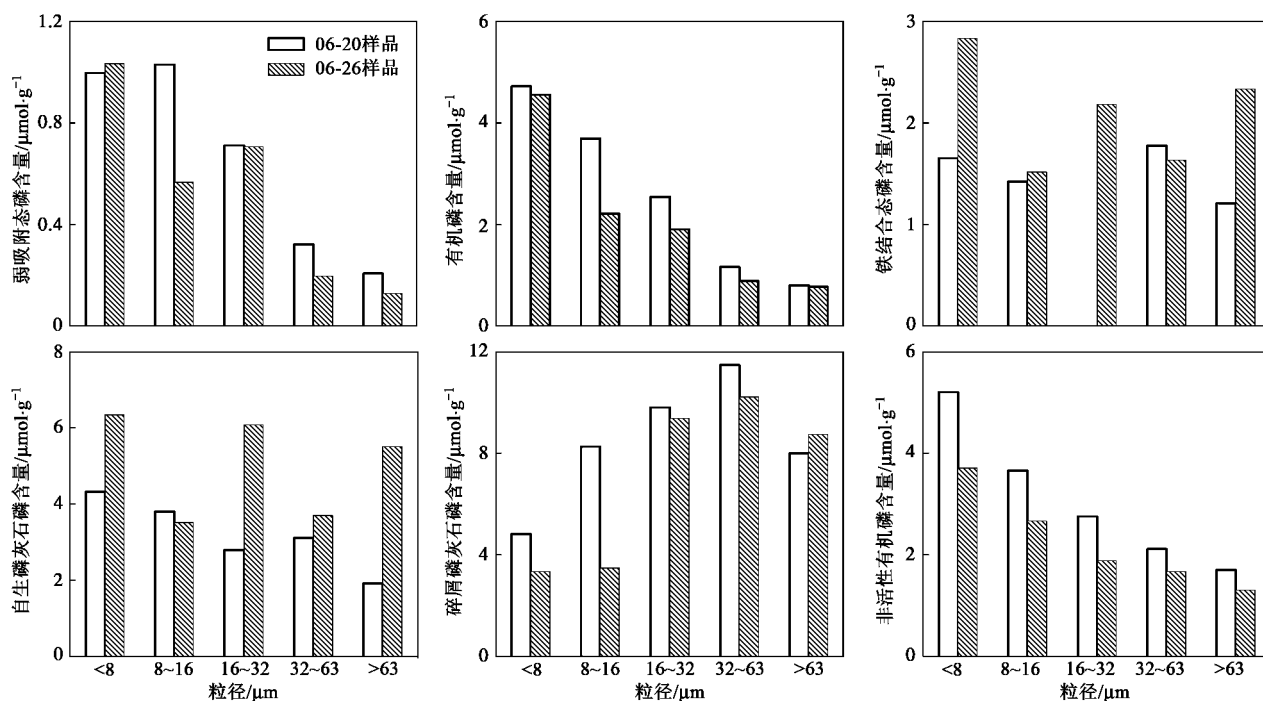


图6 2008 年黄河调水调沙期间利津站各形态磷在不同粒级颗粒物中的分布

Fig. 6 Distribution of particulate phosphorus forms in different particle size classes at Lijin station during water and sediment regulation in 2008

着颗粒物粒径的增大,弱吸附态磷、有机磷和非活性有机磷含量呈现出递减的趋势,而碎屑磷灰石磷却在较大粒径的颗粒中有着较高的含量,且最大含量均出现在 32 ~ 63 μm 的颗粒中,铁结合态磷和自生磷灰石磷的含量则与颗粒物粒径的关系不大。

3 讨论

3.1 颗粒物粒径对各形态磷的影响

弱吸附态磷、有机磷和非活性有机磷的含量随着颗粒物粒径的增大而呈现出减小的趋势(图 6),图 4 中采样期间这 3 种形态磷也表现出与颗粒物中值粒径(图 3)大致相反的变化趋势,说明弱吸附态磷、有机磷和非活性磷主要在小颗粒中富集.小颗粒物具有较大的比表面积^[19],易与有机物、金属氧化物及营养盐发生吸附等作用^[9].同时有机磷在细颗粒物中的富集与细颗粒物中有机物的含量有关,颗粒物粒径越小,有机质的含量越高^[20,21].

与弱吸附态磷、有机磷和非活性有机磷不同,碎屑磷灰石磷在粗颗粒物中有着较高的含量,在粒径 32 ~ 63 μm 的粗粉砂中含量最高(图 6).碎屑磷灰石磷主要来自于流域内黄土中的白云石^[22,23],而白云石是一种原生矿物^[23],随颗粒物粒径的增大,它的含量升高.

3.2 调水调沙过程对各形态磷的影响

黄河调水调沙是通过水库联合调度、泥沙扰动和引水控制等手段,把不同来源区、不同量级、不同泥沙颗粒级配的不平衡的水沙关系塑造成协调的水沙过程,从而实现下游河道的减淤甚至全线冲刷^[7].调水调沙分为 2 个阶段^[24]:一是利用小浪底水库泄流辅以人工扰动冲刷河道;二是通过水库联合调度,塑造人工异重流并实现排沙出库.

调水调沙过程对颗粒物中各形态磷的影响,主要与此过程中悬浮颗粒物粒径组成的变化有关.调水调沙初期小浪底水库大流量的清水下泄,河道沿程冲刷,利津站泥沙粗化^[17],中值粒径增大(图 3),细颗粒在悬浮颗粒物中所占的比例明显下降(图 2),致使与细颗粒相关的弱吸附态磷、有机磷和非活性有机磷含量明显低于非调水调沙时期,而在粗颗粒中富集的碎屑磷灰石磷的含量则比非调水调沙时期有一定的升高.调水调沙后期,以细颗粒为主的高含沙量的异重流下泄^[17,18],使利津站细颗粒比例升高(图 2),泥沙中值粒径减小(图 3),所以弱吸附态磷、有机磷和非活性有机磷的含量有所增加,而碎屑磷灰石磷的含量略有降低.

3.3 调水调沙期间颗粒磷的输送通量及生物可利用性

悬浮颗粒物中某些形态的磷,可以通过物理、化学、生物过程的作用释放到水体中,转化为可以被生物直接利用的磷.因此,悬浮颗粒物是水体中磷的一个不可忽视的来源和储库^[25,26].一般认为,颗粒物中的弱吸附态磷、有机磷是生物可利用磷^[5].按此计算,采样期间黄河悬浮颗粒物中生物可利用磷含量的变化范围为 2.91 ~ 10.8 $\mu\text{mol/g}$,平均值为 4.90 $\mu\text{mol/g}$,生物可利用磷占颗粒态总磷的比例平均为 28.3%.其中,弱吸附态磷、有机磷占生物可利用磷的比例分别为 23.5% 和 76.5%.从变化趋势看,调水调沙期间生物可利用磷的含量低于非调水调沙时期,调水调沙前期的含量低于后期(图 7),这是因为弱吸附态磷和有机磷在小颗粒物中有着较高的含量,而颗粒物粒径调水调沙期间大于非调水调沙时期,调水调沙前期大于后期(图 3).

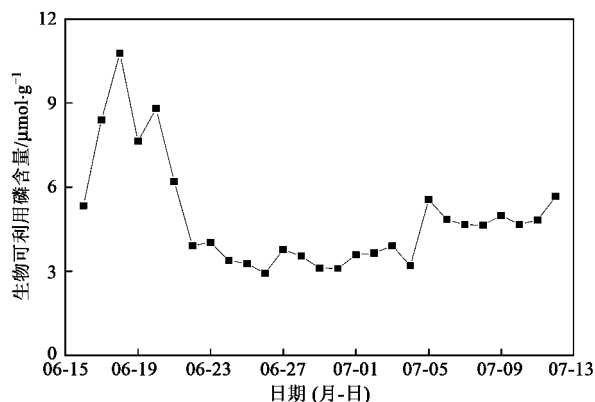


图 7 2008 年黄河调水调沙期间利津站悬浮颗粒物中生物可利用磷的变化

Fig. 7 Distribution of the particulate bio-available phosphorus at Lijin station during water and sediment regulation in 2008

根据利津站 2008 年各月及调水调沙期间的输沙量和各形态磷的含量,对颗粒物中各形态磷的输送通量进行了估算(表 1),计算公式为:

$$L(j) = C(j) \cdot Q$$

其中,调水调沙(2008-06-23 ~ 2008-07-12)通量计算中, $L(j)$ 为 j 组分日输送量, $C(j)$ 为 j 组分各日 08:00 所测含量, Q 为日输沙量,调水调沙期间输送通量为各日输送量总和;2008 年全年(2008-01 ~ 2008-12)通量计算中, $L(j)$ 为 j 组分月输送量, $C(j)$ 为 j 组分各月 20 日左右所测含量, Q 为月输沙总量,全年输送通量为各月输送量总和.

结果表明,2008 年全年黄河输送的泥沙总量为

7.97×10^7 t,其中调水调沙期间输送量为 6.63×10^7 t,占全年输送总量的 83.2%。调水调沙期间黄河输送的颗粒态总磷为 3.42×10^4 t,其中 24.4% (约为 8.30×10^3 t) 为生物可利用磷,颗粒态总磷和生物可利用磷分别占全年总输送量的 78.6% 和 80.2%。因此调水调沙过程对于维持黄河口及其临近海域水体的营养状况及初级生产力水平起着非常重要的作用。

表 1 2008 年黄河通过利津站向下游输送的
泥沙及各形态磷的通量

Table 1 Sediment and particulate phosphorus fluxes of
the Yellow River at Lijin station in 2008

磷形态	调水调沙期间 输送通量/t	全年输送 通量/t	调水调沙期间输送 通量占全年的比例/%
泥沙	6.63×10^7	7.97×10^7	83.2
弱吸附态磷	1 946	2 465	78.9
有机磷	6 351	7 876	80.6
铁结合态磷	3 659	3 973	92.1
自生磷灰石磷	11 126	13 894	80.1
碎屑磷灰石磷	6 243	8 908	70.1
非活性有机磷	4 828	6 318	76.4
颗粒态总磷	34 153	43 434	78.6
生物可利用磷	8 297	10 341	80.2

4 结论

(1)2008 年调水调沙期间,自生磷灰石磷和有机磷是黄河利津悬浮颗粒物中磷的主要赋存形态,调水调沙期间悬浮颗粒物中总磷、弱吸附态磷、有机磷和非活性有机磷的含量低于非调水调沙时期,碎屑磷灰石磷的含量高于非调水调沙时期,铁结合态磷和自生磷灰石磷的变化不明显。

(2)悬浮颗粒物粒径是影响黄河颗粒物中各形态磷含量的重要因素,弱吸附态磷、有机磷和非活性有机磷在细颗粒中含量较高,而碎屑磷灰石磷在粗颗粒中有着较高的含量,铁结合态磷和自生磷灰石磷的含量与颗粒物粒径的关系不明显。

(3)2008 年调水调沙期间生物可利用磷的含量约占颗粒态总磷的 28.3%,其中有机磷又是生物可利用磷的主要组成部分。调水调沙期间黄河通过利津向下游输送的泥沙、颗粒态磷和颗粒态潜在的生物可利用磷总量分别为 6.63×10^7 、 3.42×10^4 和 8.30×10^3 t,分别占全年输送通量的 83.2%、78.6% 和 80.2%。

参考文献:

[1] Bolin B, Cook R B. The major biogeochemical cycles and their interactions [M]. New York: John Wiley and Sons, 1983. 121.

[2] Meybeck M. Carbon, nitrogen and phosphorus transport by world rivers [J]. American Journal of Science, 1982, **282**(4):401-450.

[3] 王开荣. 黄河调水调沙对河口及其三角洲的影响和评价 [J]. 泥沙研究, 2005, (6):29-33.

[4] Krein A, Schorer M. Road runoff pollution by polycyclic aromatic hydrocarbons and its contribution to river sediments [J]. Water Research, 2000, **34**(16):4110-4115.

[5] Andrieux-Loyer F, Aminot A. Phosphorus forms related to sediment grain size and geochemical characteristics in French coastal areas [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2001, **52**(2):617-629.

[6] Koch M S, Benz R E, Rudnick D T. Solid-phase phosphorus pools in highly organic carbonate sediments of northeastern Florida Bay [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2001, **52**(2):279-291.

[7] 水利部黄河水利委员会. 黄河首次调水调沙试验 [M]. 郑州:黄河水利出版社, 2003. 12.

[8] Kufel L. Particulate phosphorus sedimentation at the river inflow to a lake [J]. Hydrobiologia, 1993, **251**(1-3):269-274.

[9] Pacini N, Gächter R. Speciation of riverine particulate phosphorus during rain events [J]. Biogeochemistry, 1999, **47**(1):87-109.

[10] 魏俊峰,陈洪涛,刘鹏霞,等. 长江悬浮颗粒物中磷的赋存形态 [J]. 水科学进展, 2010, **21**(1):131-136.

[11] Walling D E, Woodward J C. Use of a field-based water elutriation system for monitoring the in situ particle size characteristics of fluvial suspended sediment [J]. Water Research, 1993, **27**(5):1413-1421.

[12] 何会军,于志刚,陈洪涛,等. 水淘选颗粒物分级方法的研究与应用 [J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2010, **41**(1):1-6.

[13] 国家技术监督局. 海洋调查规范 [M]. 北京:中国标准出版社, 2002. 11-13.

[14] Vink S, Chambers R M, Smith S V. Distribution of phosphorus in sediments from Tamales Bay California [J]. Marine Geology, 1997, **139**(1-4):157-180.

[15] 张再厚,黄峰. 黄河第八次调水调沙取得成功 [J]. 人民黄河, 2008, **30**(7):F0004.

[16] Steegen A, Govers G, Nachtergaele J, et al. Sediment export by water from an agricultural catchment in the Loam Belt of central Belgium [J]. Geomorphology, 2000, **33**(1-2):25-36.

[17] 刘俊峰,和瑞莉,姚宝萍. 黄河调水调沙试验对泥沙粒径变化影响分析 [J]. 中国粉体技术, 2005, (2):40-43.

[18] 李国英. 黄河中下游水沙的时空调度理论与实践 [J]. 水利学报, 2004, **35**(8):1-7.

[19] Stone M, Mudroch A. Effect of particle size, chemistry and mineralogy of river sediments on phosphate adsorption [J]. Environmental Technology Letters, 1989, **10**(5):501-510.

[20] Keil R G, Mayer L M, Quay P D, et al. Loss of organic matter from riverine particles in deltas [J]. Geochimica Cosmochimica Acta, 1997, **61**(7):1507-1511.

- [21] Bergamaschi B A, Tsamakis E, Keil R G, *et al.* The effect of grain size and surface area on organic mater, lignin and carbohydrate concentration, and molecular compositions in Peru margin sediments[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1997, **61**(6): 1247-1260.
- [22] Ruttenberg K C. Development of a sequential extraction method for different forms of phosphorus in marine sediments [J]. *Limnology and Oceanography*, 1992, **37**(7): 1460-1480.
- [23] Yang J D, Chen J, An Z S, *et al.* Variations in $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios of calcites in Chinese loess: a proxy for chemical weathering associated with the East Asian summer monsoon [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2000, **157**: 151-159.
- [24] 李国英. 基于水库群联合调度和人工扰动的黄河调水调沙 [J]. *水利学报*, 2006, **37**(12): 1439-1446.
- [25] Perkins R G, Underwood G J C. The potential for phosphorus release across the sediment-water interface in an eutrophic reservoir dosed with ferric sulphate[J]. *Water Research*, 2001, **35**(6): 1399-1406.
- [26] Jensen H S, McGlathery K J, Marino R, *et al.* Forms and availability of sediment phosphorus in carbonate sand of Bermuda seagrass beds[J]. *Limnology Oceanography*, 1998, **43**(5): 799-810.