

黄河上游沉积物中磷的存在形态及生物可利用性

李北罡, 刘培怡

(内蒙古师范大学化学与环境科学学院, 呼和浩特 010022)

摘要:采用七步连续提取法分别对黄河上游 11 个不同段位表层沉积物样中 7 种形态磷进行了分离分析,探讨了其变化规律和分布特征,分析了其生物可利用性及对黄河及海洋水体营养状况的影响。结果表明:所获得沉积物中磷的 7 种赋存形态为:交换态磷(Ex-P)、铝结合态磷(Al-P)、铁结合态磷(Fe-P)、闭蓄态磷(Obs-P)、自生钙结合磷(Ca-P)、原生碎屑磷(De-P)和有机磷(OP),其中 De-P 和 Ca-P 的含量范围分别为 $139.08\sim 482.89\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $40.30\sim 125.55\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,二者共占总磷(TP,为各形态磷的总和)含量的约 87%,是沉积磷和无机磷(IP,前 6 种磷形态之和)的主要存在形态;OP 含量范围为 $6.14\sim 36.74\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均占 TP 的 4%;Ex-P、Al-P、Fe-P 和 Obs-P 含量均较低,平均值分别为 7.53 、 25.85 、 $5.05\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.64\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,共占 TP 含量的约 9%。各形态磷的含量分布直接与取样点及沉积物粒径有关。Ex-P、Al-P、Fe-P、Or-P 和部分 Ca-P 作为黄河表层沉积物中潜在的生物可利用磷(BP),其总量至少占 TP 的 5.91%~30.17%。根据黄河每年进入渤海的输沙量可初步估算出黄河泥沙入海后为海洋提供的 BP 的量达 3.21~8.92 万 t。

关键词:黄河;沉积物;磷形态;生物可利用磷

中图分类号:X522 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2012)01-0185-07

Forms and Bioavailability of Phosphorus in Surface Sediments from the Upper Reaches of the Yellow River

LI Bei-gang, LIU Pei-yi

(College of Chemistry & Environment Science, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, China)

Abstract: Form distribution and bioavailability of phosphorus (P) in natural waters are affecting the primary productivity and nourishment equilibrium of the waters directly. Seven forms of P were separated and analyzed by using the seven-step sequential extraction method in different sediments from the upper reaches of the Yellow River. Distribution characteristics and bioavailability of P forms in sediments and impact on the trophic status of the natural water column were discussed. The results indicated that seven forms of P in sediments were exchangeable+loosely-bound P(Ex-P), aluminum-bound P(Al-P), iron-bound P(Fe-P), obstinate-bound P(Obs-P), authigenic + biogenic apatite +calcium carbonate-bound P(Ca-P), detrital apatite + other remaining inorganic P(De-P) and organic P(OP). In all samples with different particle sizes, contents of De-P and Ca-P ranged from $139.08\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ to $482.89\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ and from $40.30\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ to $125.55\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectively, both of them occupied about 87% of TP(the sum of all seven form P), which were the major components of sediment P and inorganic P (IP); content ranges of OP were $6.14\sim 36.74\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ and the mean was 4% of TP; Contents of Ex-P, Fe-P, Al-P were all lower and that of Obs-P was the lowest, their mean were 7.53 , 25.85 , $5.05\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ and $0.64\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectively, and 9% of TP. The content distribution of various form P in studied sediments correlated with the grain size and the sampling sites directly. Ex-P, Al-P, Fe-P, OP and part of Ca-P, acting as the bioavailable P(BP), accounted for 5.91%~30.17% of TP at least. Based on the quantity of paticulates transported from the Yellow River to the Bohai Sea and the above results, the amount of potential BP was estimated approximately 32.1~89.2 thousand ton.

Keywords: The Yellow River; sediments; phosphorus forms; bioavailable phosphorus

收稿日期:2011-05-28

基金项目:国家自然科学基金项目(20467002);内蒙古自然科学基金项目(200711020214);内蒙古师范大学科研基金项目(ZRYB08019)

作者简介:李北罡(1964—),女,内蒙古呼和浩特人,教授,主要从事水环境化学方面的研究。E-mail:libg@imnu.edu.cn

生源物质的循环对维持整个生态系统的平衡极其重要。作为生源物质的磷(P)在自然界中的循环主要通过固体颗粒物/水界面作用实现迁移、转化和累积,水体沉积物对P的生物地球化学循环举足轻重,其中P的存在形态及含量高低直接决定着P的生物有效性、水体的营养状况和初级生产力,因此研究沉积物中P的赋存形态及分布特征具有重要的生态环境意义,对不同水域的相关研究已有大量报道^[1-6]。磷形态研究的重要方法之一是化学连续提取法,但因所用提取剂种类和提取方案的不同,其结果反映出沉积物P的释放潜力和生物有效性不尽相同^[7-11]。综合前人的研究结果及各方法利弊,李悦等提出了较系统的磷形态七步连续提取法^[12],优点是对P的形态分离更明确,可对P的循环机制、成岩过程和沉积环境等有更全面、更清晰地认识,对地球化学行为研究应用价值更高,但可能因其实际操作步骤较繁琐或只限于海洋沉积物应用等问题使得后续应用报道较少。朱广伟等将该法用于淡水沉积物磷形态分析,并较详细探讨了在应用中存在的问题^[13]。马钦等将该法用于黄河中下游沉积物分析,并对个别实验操作进行了适当改进,取得了较理想的实验结果^[14]。

黄河是我国北部海域P循环的重要组成部分,为更深入了解黄河全流域沉积物中磷的形态分布及其生物可利用性,以及这条特色河流对磷相对贫乏的我国海域水生生态环境的影响^[15],本文在前期研究基础上^[14,16-17],仍用七步连续提取法探讨黄河上游不同粒径沉积物中磷的形态分布,重点估算生物可利用磷,为整个陆-河-海间磷循环研究提供依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集与前处理

2008年和2009年在黄河源头到黄河上中游分

界点内蒙古托克托河口的上游河段用箱式拉力采泥器采集11个不同断面的表层样,采样点(GPS定位)分别为:玛多(Y1):34°53'N,98°10'E;兴海(Y2):35°30'N,100°10'E;贵德(Y3):36°02'N,101°24'E;西固(Y4):36°07'N,103°39'E;中卫(Y5):37°27'N,105°03'E;石嘴山(Y6):39°14'N,106°47'E;乌海(Y7):39°41'N,107°47'E;临河(Y8):40°44'N,107°25'E;乌拉特前旗(Y9):40°43'N,108°37'E;包头(Y10):40°31'N,109°54'E;河口(Y11):40°11'N,111°11'E。所有样品现场封存于塑料袋中,运回后冷冻保存。用时自然晾干,分别过0.149、0.074mm和0.061mm筛备用。

1.2 沉积物样中各形态磷的连续提取与分析

本研究采用文献[18]中的七步连续提取法对沉积物中各形态磷进行分离和分析,每个样品设置6次重复实验,结果取其平均值,相对误差<5%。所用器皿均用稀硝酸浸泡,所用药品均为分析纯以上,所用水为二次亚沸石英蒸馏水。

2 结果与讨论

2.1 沉积物中各种形态磷的含量分布

黄河上游不同粒径沉积物中总磷(TP,各形态P含量的总和)含量范围为265.62~664.58 mg·kg⁻¹,平均值416.41 mg·kg⁻¹(图1)。无机磷(IP,除OP以外的其他各种形态P的总和)含量范围为251.82~647.60 mg·kg⁻¹(图2),平均占TP的96.10%,是沉积物中P的主要组成部分。图1和图2表明,不同段位沉积物中TP和IP含量分布变化趋势相同,且在粒径<63 μm的颗粒物中含量较高(个别点除外),最大值均出现在贵德段。黄河水中以悬沙为主,粒径<50 μm的来沙占总沙量的82%以上,是注入海洋的主要泥沙部分,也是对海洋磷输入贡献最大的部分。

有机磷(OP)含量在6.14~36.74 mg·kg⁻¹之间(图

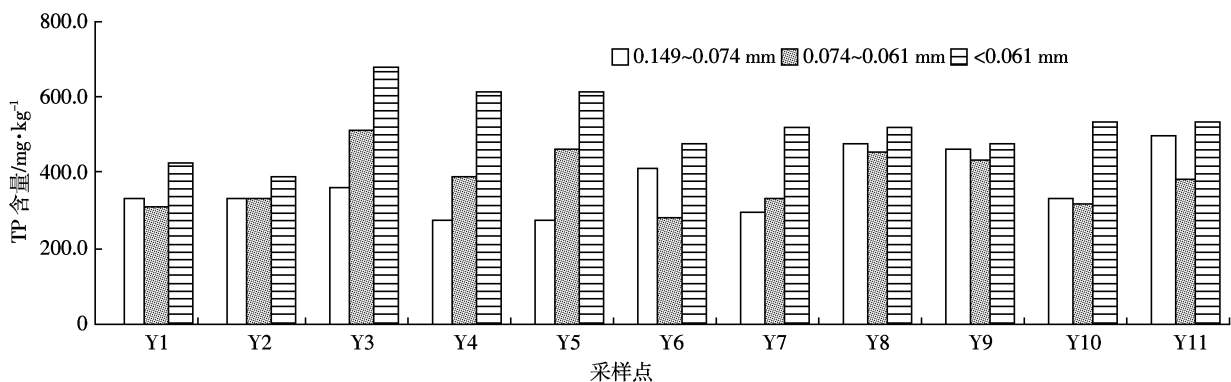


图1 沉积物中TP的含量分布

Figure 1 Distribution of TP content in sediments

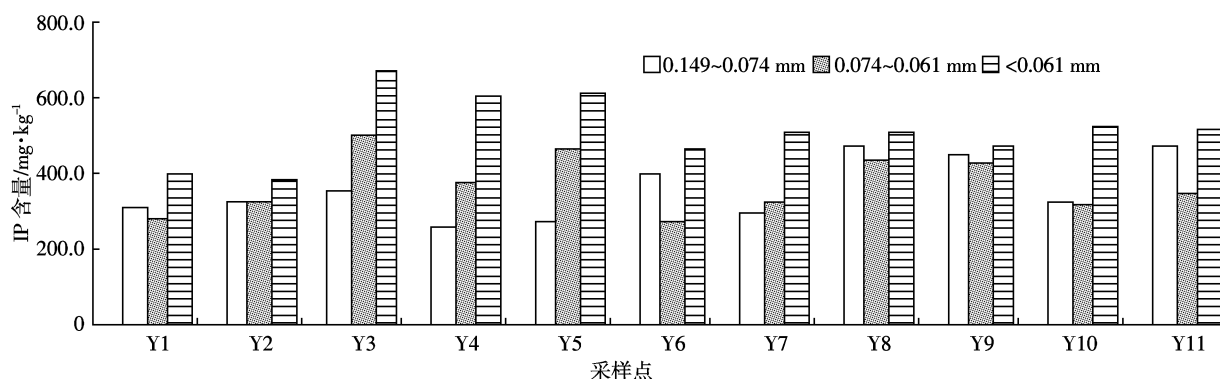


图2 沉积物中IP的含量分布

Figure 2 Distribution of IP content in sediments

3),平均占TP的3.90%,含量相对较低,但因其中部分OP能被微生物矿化降解转化为生物可利用磷而进一步参与水体循环^[19],故OP含量大小会直接影响水体溶解性磷的可利用水平和营养化程度^[20]。根据文献[14]的研究结果,对比整个黄河流域不同段位沉积物中TP、IP和OP的含量范围及分布特征发现,OP含量最大值出现在黄河源头和黄河入海口;TP和IP含量在整个上下游沉积物中的空间分布无显著规律,但它们的平均值很接近,只表现在取样点位不同含量差别较大,这应与采样点所处的地质构造、地理气候环境及人文环境等因素有关。

表1表明,从沉积物提取到的7种形态磷中原生碎屑磷(De-P)含量最高,占TP的52%~77%;自生钙磷(Ca-P)含量次之,占TP的10%~33%,二者组成的钙结合态磷是沉积物中磷的主导形态,其余形态磷含量均较低。不同沉积环境、气候特征及间隙水磷酸根含量形成不同磷酸盐形态分布,我国西部属于干旱半干旱地区,降水少、矿物风化作用强烈,加之磷灰石的广泛分布和石灰性土壤构造及流域的侵蚀作用,均会导致De-P和Ca-P的含量很高,这与侯立军等对长江

口沙洲表层沉积物的研究结果一致^[21]。

De-P被认为是所有形态磷中最稳定的部分,尤其对于碱性环境下的黄河水体,很难从沉积物中释放出来,一般不能被生物利用。而Ca-P则因其沉积物早期成岩过程中形成的不同,是一种活性反应性磷的“汇”^[11],其中的生物磷灰石部分可通过微生物矿化降解被生物利用。

采样点不同,沉积物中De-P和Ca-P的含量分布也不同。在粒径<63 μm的沉积物中,二者含量分布随取样点不同的高低排序分别为:(De-P)贵德>中卫>西固>河口>临河>乌海>包头>乌拉特前旗>石嘴山>兴海>玛多;(Ca-P)贵德>西固>中卫>包头>乌海>河口>石嘴山>临河>乌拉特前旗>玛多>兴海。因两形态的成因不同,故排序有一些差别。

Ex-P、Fe-P、Al-P在所有沉积物中的含量分布均较低,Obs-P的含量分布最低且变化也最小,因其被包裹在沉积物内部,故生物可利用性较低。以上4种形态磷分别占TP的0.68%~3.36%、0.38%~3.68%、3.33%~15.89%和0.03%~0.28%。

Ex-P是沉积物中结合力最弱的一种形态磷,虽

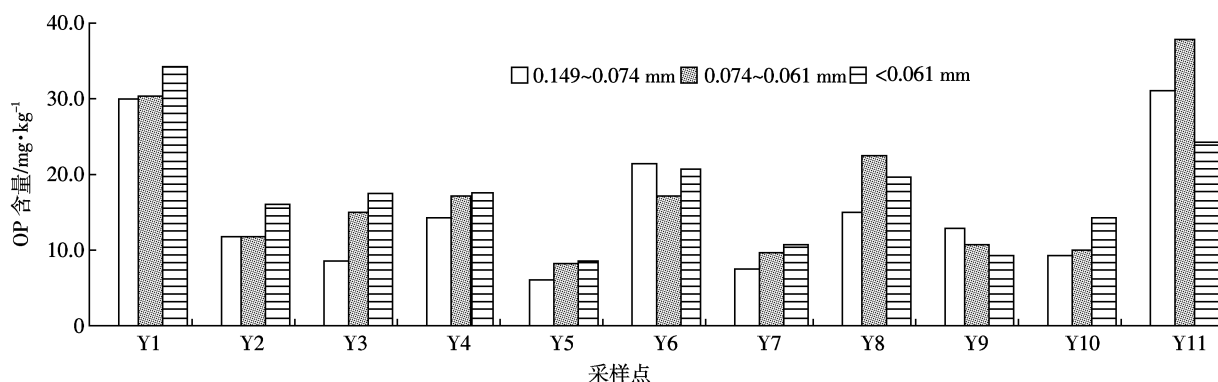


图3 沉积物中OP的含量分布

Figure 3 Distribution of OP content in sediments

表 1 沉积物样中各形态磷的分析结果($w/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $n=6$)及占总磷的比例(R)

Table 1 Analytical results of various form P and the ratio to TP in sediments of the Yellow River

采样点	粒径/mm	Ex-P		Al-P		Fe-P		Obs-P		Ca-P		De-P	
		w	$R/\%$	w	$R/\%$	w	$R/\%$	w	$R/\%$	w	$R/\%$	w	$R/\%$
Y1	0.149~0.074	9.83	2.99	26.97	8.21	10.62	3.23	0.08	0.02	43.60	13.28	208.02	63.36
	0.074~0.061	10.15	3.36	26.33	8.71	11.14	3.68	0.10	0.03	41.56	13.74	183.62	60.71
	<0.061	11.86	2.82	34.77	8.28	9.47	2.26	0.11	0.03	49.27	11.74	281.08	66.97
Y2	0.149~0.074	5.97	1.85	18.77	5.83	4.81	1.49	0.29	0.09	47.53	14.77	233.11	72.42
	0.074~0.061	7.08	2.25	19.56	6.21	4.05	1.28	1.00	0.32	42.51	13.49	240.93	76.46
	<0.061	8.17	2.12	20.74	5.39	3.93	1.02	0.77	0.20	40.30	10.48	295.04	76.75
Y3	0.149~0.074	4.52	1.29	21.41	6.12	4.00	1.14	0.32	0.09	113.85	32.56	197.24	56.40
	0.074~0.061	6.53	1.37	23.19	4.85	3.48	0.73	0.28	0.06	111.11	23.26	338.63	70.88
	<0.061	5.97	0.90	29.42	4.43	3.56	0.54	0.22	0.03	125.55	18.89	482.89	72.66
Y4	0.149~0.074	6.07	2.28	20.08	7.56	2.67	1.00	0.38	0.14	83.54	31.45	139.08	52.36
	0.074~0.061	6.57	1.72	19.67	5.14	2.22	0.58	0.67	0.18	91.96	24.03	245.03	64.03
	<0.061	6.23	1.04	21.66	3.61	2.29	0.38	0.67	0.11	118.58	19.75	434.23	72.31
Y5	0.149~0.074	4.19	1.56	18.67	6.95	3.13	1.16	1.11	0.41	93.92	34.95	141.56	52.68
	0.074~0.061	4.13	1.06	17.56	3.86	2.72	0.60	1.14	0.25	104.23	22.94	316.48	69.66
	<0.061	4.09	0.68	19.97	3.33	2.86	0.48	1.70	0.28	104.96	17.48	458.12	76.32
Y6	0.149~0.074	4.20	1.04	14.74	3.64	5.89	1.45	0.83	0.20	76.27	18.83	282.36	69.74
	0.074~0.061	4.02	1.45	16.07	5.81	6.35	2.30	1.04	0.38	73.38	26.52	158.99	57.47
	<0.061	8.21	1.75	21.07	4.50	5.46	1.17	1.07	0.23	79.52	16.99	332.44	71.04
Y7	0.149~0.074	6.57	2.26	12.35	4.25	6.67	2.30	1.32	0.45	77.28	26.61	178.94	61.62
	0.074~0.061	7.49	2.30	18.85	5.79	7.37	2.26	0.97	0.30	78.82	24.21	202.71	62.27
	<0.061	8.29	1.64	21.09	4.17	5.68	1.12	1.25	0.25	86.17	17.04	372.70	73.71
Y8	0.149~0.074	9.58	2.04	31.14	6.64	2.40	0.51	0.26	0.06	71.06	15.14	340.25	72.52
	0.074~0.061	9.62	2.16	33.46	7.50	2.46	0.55	0.11	0.02	71.03	15.93	307.45	68.94
	<0.061	9.21	1.64	32.05	5.72	2.07	0.37	0.51	0.09	71.45	12.76	375.17	66.98
Y9	0.149~0.074	11.45	2.55	26.97	6.02	2.57	0.57	0.15	0.03	61.04	13.62	333.53	74.40
	0.074~0.061	11.65	2.77	28.63	6.80	2.78	0.66	0.90	0.21	69.20	16.44	297.28	70.63
	<0.061	11.13	2.38	28.06	6.00	2.95	0.63	1.00	0.21	67.15	14.38	347.64	74.42
Y10	0.149~0.074	6.44	1.98	49.54	15.21	5.30	1.63	0.40	0.12	71.00	21.80	183.88	56.45
	0.074~0.061	6.71	2.15	49.60	15.89	5.50	1.76	0.82	0.26	77.97	24.98	161.95	51.88
	<0.061	7.65	1.46	50.84	9.73	5.51	1.05	0.83	0.16	92.81	17.77	350.70	67.15
Y11	0.149~0.074	7.76	1.59	24.72	5.06	8.53	1.75	0.40	0.08	68.93	14.11	348.03	71.27
	0.074~0.061	8.75	2.36	30.06	8.11	10.08	2.72	0.61	0.16	55.97	15.10	228.48	61.64
	<0.061	8.28	1.58	24.97	4.77	8.20	1.57	1.19	0.23	81.84	15.63	375.51	71.73

然含量较低,但最易释放而直接被水生生物吸收利用,故对控制磷在液/固界面的吸附与释放及维持水域正常营养平衡起重要作用。因采样点不同,Ex-P 含量分布有一定差别。在粒径<63 μm 的沉积物中,Ex-P 含量最大值出现在黄河源头玛多段,这可能与该段泥沙粒度更细及 OP 含量高有关。

Fe-P 在沉积物中含量分布也较低,但随取样点不同含量差别较大,最大值在黄河源头玛多段。Fe-P 属于不稳定和易溶解的形态磷,其沉积或溶解直接受

水体氧化还原条件及生物作用等因素影响,故是潜在的生物可利用磷。沉积物孔隙水和上浮水中铁和钙的化学活性不同,Ca-P 含量高的土质 Fe-P 含量一定低,本研究结果验证了这一点。

Al-P 在沉积物中的含量分布整体较 Fe-P 含量要高,且样品间存在差异。该形态磷也易进入水体被生物利用,且在一定理化条件下,Fe-P 和 Al-P 可相互转化,二者含量之和可指示水体污染程度,反映出流域周围人类活动对河流的影响。

2.2 各形态磷含量与沉积物粒径的相关性

从表 2 可知,各形态磷含量与沉积物粒径变化的相关性直接与取样点有关,差异较大。总体来说,对 Ex-P、Al-P 和 Obs-P 而言(个别点除外),沉积物粒径越小,含量越高;Fe-P 和 Ca-P 含量与粒径的相关性规律不明显;De-P 和 OP 含量与粒径的相关性因取样点不同而有所差异。

2.3 沉积物中潜在的生物可利用磷(BP)

沉积物中只有直接或潜在的生物可利用磷才能参与 P 的生物地球化学循环。不同研究者因所采用 P 形态提取法不同而确定的 BP 的形态也不尽相同^[21,23]。张路等^[24]以 NaOH-NaCl 混合试剂为提取剂对太湖、巢湖和龙感湖表层沉积物及柱状沉积物中 BP 进行了测定,并发现其含量高低直接与湖区受污染程度有关。魏俊峰等^[25]采用 SEDEX 法对长江悬浮颗粒物中磷形态进行了分析,并以弱吸附态磷、OP、Fe-P 作为 BP,平均约占颗粒态 TP 的 46%,其对水体营养状况的影响不容忽视。

结合相关文献,本文以沉积物中 Ex-P、Al-P、Fe-P、OP 及 Ca-P 中的生物磷灰石作为 BP,其结果见图 4(BP 为前 4 种形态磷之和)。在所研究沉积物样中,BP 含量在 32.14~89.22 mg·kg⁻¹ 之间,占 TP 的 5.91%~30.17%,平均至少约占 TP 的 14.21%(因其中可利用的 Ca-P 部分无法准确获知而未估算)。BP 含量随取样点和粒径而异。若根据黄河每年进入渤海的平均输沙量为 10 亿 t 计,估算出泥沙入海后为海洋可提供的 BP 的量达 3.21~8.92 万 t。文献[14]研究获得黄河中下游及渤海浅海等几个不同段位沉积物中 BP 量占 TP 的 4.96%~18.61%。以上结果均比孟春霞^[22]2004 年研究的黄河口及其邻近海域的 BP 含量占 TP 的 4% 要高,这可能与近年来沿河流域不同程度污染有关,使得黄河及渤海海域环境受时空变化影响较大。

前期研究表明^[26],即使黄河水体局部遭受磷污染(一定浓度范围内),沉积物对 P 仍具有一定的承载净化能力,因此验证了上述 BP 含量的变化,加之黄河是敞开水系,故目前发生富营养化现象的可能性较

表 2 黄河上游表层沉积物中各形态磷与粒径的相关系数

Table 2 The correlation coefficient between various form P and grain sizes in sediments of the Yellow River							
采样点	Ex-P	Al-P	Fe-P	Obs-P	Ca-P	De-P	OP
Y1	0.864 0	0.688 3	0.449 5	0.138 3	0.502 6	0.518 9	0.815 8
Y2	1.000 0	0.987 5	0.853 1	0.449 9	0.951 8	0.843 1	0.784 7
Y3	0.485 6	0.906 2	0.615 1	0.993 0	0.582 0	1.000 0	0.942 6
Y4	0.107 2	0.564 2	0.615 0	0.750 8	0.917 4	0.974 2	0.824 0
Y5	0.987 5	0.291 6	0.416 0	0.783 3	0.799 5	0.996 3	0.895 6
Y6	0.716 3	0.899 8	0.236 4	0.840 4	0.249 1	0.078 7	0.014 6
Y7	0.998 6	0.926 8	0.344 6	0.035 4	0.875 5	0.840 5	0.973 3
Y8	0.677 2	0.150 9	0.629 0	0.377 1	0.684 9	0.265 8	0.395 7
Y9	0.379 0	0.419 5	0.995 9	0.835 2	0.517 7	0.073 8	0.976 6
Y10	0.904 4	0.780 2	0.798 4	0.775 2	0.958 4	0.652 9	0.823 3
Y11	0.273 0	0.001 8	0.026 9	0.930 9	0.248 8	0.030 9	0.238 5

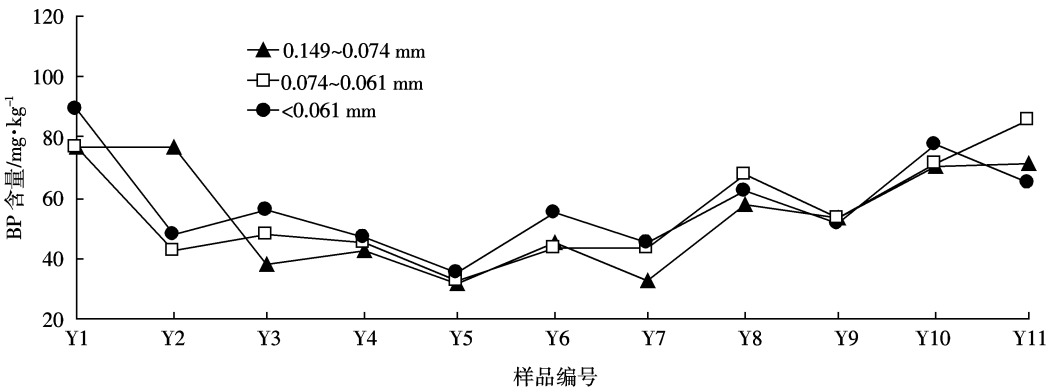


图 4 不同粒径沉积物样中 BP 含量分布

Figure 4 Contents of bioavailable P in sediments with different grain sizes

小。作为内源磷来源的沉积物对水体所起的更重要作用应是实现和完成 BP 部分对 P 在整个生态系统的循环和维持黄河及近海海域正常的营养平衡,尤其对于以黄河径流量和输沙量为主的、磷相对贫乏的渤海及邻近海域来说,大量黄河水沙的注入,对维持海域浮游植物的正常生长繁殖、较高初级生产力和海气二氧化碳通量等具有显著作用和影响。

3 结论

采用七步连续提取法较好地分离获得了黄河上游从源头到上中游分界点 11 个表层沉积物中的 7 种形态磷,并探明了其含量分布特征,其中 De-P 和 Ca-P 是沉积物中磷的主要赋存形态,二者共约占 TP 的 87%以上;Ex-P、Fe-P、Al-P 和 OP 含量均较低,Obs-P 含量最低,以上 5 种形态磷合计不高于 TP 的 13%。磷含量与取样点的位置及沉积物粒径有关。估算表明黄河上游沉积物中 BP 平均至少约占 TP 的 14%以上。

参考文献:

- [1] Gikuma-Njuru P, Hecky R E, Guildford S J. Surficial sediment phosphorus fractions along a biogeochemical gradient in Nyanza (Winam) Gulf, northeastern Lake Victoria and their possible role in phosphorus recycling and internal loading[J]. *Biogeochemistry*, 2010, 97:247-261.
- [2] SUN Shu-juan, HUANG Sui-liang, SUN Xue-ming, et al. Phosphorus fractions and its release in the sediments of Haihe River, China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, 21:291-295.
- [3] LIU Zhen-ying, JIN Zhao-hui, LI Ya-wei, et al. Sediment phosphorus fractions and profile distribution at different vegetation growth zones in a macrophyte dominated shallow Wuliangsuhai Lake, China[J]. *Environ Geol*, 2007, 52:997-1005.
- [4] Kian Siong, Takashi Asaeda, Takeshi Fujino, et al. Difference characteristics of phosphorus in Chara and two submerged angiosperm species: Implications for phosphorus nutrient cycling in an aquatic ecosystem[J]. *Wetlands Ecology and Management*, 2006, 14:505-510.
- [5] HE Hui-jun, CHEN Hong-tao, YAO Qing-zhen, et al. Behavior of different phosphorus species in suspended particulate matter in the Changjiang estuary [J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2009, 27(4):859-868.
- [6] 金相灿, 卢少勇, 王开明. 巢湖城区洗耳池沉积物磷及其生物有效磷的分布研究[J]. *农业环境科学学报*, 2007, 26(3):847-851.
- [7] JIN Xiang-can, LU Shao-yong, WANG Kai-ming, et al. Distribution of sedimentary phosphorus and bio-available phosphorus in sediments of Lake Xierchi, Chaohu City[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(3):847-851.
- [8] Golterman H L. Fractionation of sediment phosphate with chelating compounds: A simplification, and comparison with other methods [J]. *Hydrobiologia*, 1996, 335:87-95.
- [9] De Groot C J, Golterman H L. Sequential fractionation of sediment phosphate[J]. *Hydrobiologia*, 1990, 192:143-148.
- [10] Ruban V, López-Sánchez J F, Pardo P, et al. Harmonized protocol and certified reference material for the determination of extractable contents of phosphorus in freshwater sediments: A synthesis of recent works[J]. *Fresenius J Anal Chem*, 2001, 370:224-228.
- [11] Ruttenberg K C. Development of a sequential extraction method for different forms of phosphorus in marine sediments[J]. *Limnology and Oceanography*, 1992, 37(7):1460-1482.
- [12] 李悦, 乌大年, 薛永先. 沉积物中不同形态磷提取方法的改进及其环境地球化学意义[J]. *海洋环境科学*, 1998, 17(1):15-20.
- [13] LI Yue, WU Da-nian, XUE Yong-xian. A development sequential extraction method for different forms of phosphorus in the sediments and its environmental geochemical significance[J]. *Marine Environmental Science*, 1998, 17(1):15-20.
- [14] 朱广伟, 秦伯强. 沉积物中磷形态的化学连续提取法应用研究[J]. *农业环境科学学报*, 2003, 22(3):349-352.
- [15] ZHU Guang-wei, QIN Bo-qiang. Chemical sequential extraction of phosphorus in lake sediments[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2003, 22(3):349-352.
- [16] 马钦, 李北罡, 焦小宝. 黄河表层沉积物中磷的分布特征及磷的生物可利用性[J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(11):2379-2384.
- [17] MA Qin, LI Bei-gang, JIAO Xiao-bao. Distribution characteristics and bioavailability of phosphorus in surface sediments from the Yellow River[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(11):2379-2384.
- [18] 张继民, 刘霜, 张琦, 等. 黄河口附近海域营养盐特征及富营养化程度评价[J]. *海洋通报*, 2008, 27(5):66-71.
- [19] ZHANG Ji-min, LIU Shuang, ZHANG Qi, et al. Nutrient distribution and eutrophication assessment for the adjacent waters of the Yellow River Estuary[J]. *Marine Science Bulletin*, 2008, 27(5):67-72.
- [20] 李北罡, 郭博书. 黄河中游表层沉积物中无机磷的化学形态研究[J]. *农业环境科学学报*, 2006, 25(6):1607-1610.
- [21] LI Bei-gang, GUO Bo-shu. Chemical forms of inorganic phosphorus in sediments in the middle of the Yellow River[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(6):1607-1610.
- [22] 李北罡, 高娜, 马钦. 黄河上中游水体沉积物对磷酸盐的吸附/释放行为[J]. *生态与农村环境学报*, 2010, 26(4):356-360.
- [23] LI Bei-gang, GAO Na, MA Qin. Adsorption and release behaviors of phosphate on sediments in the upper and middle reaches of yellow River[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2010, 26(4):356-360.
- [24] 李北罡, 郭博书. 库布齐沙漠恩格贝沙样中磷的化学赋存形态[J]. *中国沙漠*, 2008, 28(1):73-76.
- [25] LI Bei-gang, GUO Bo-shu. Various forms of phosphorus in Engebei sands of Hobq Desert[J]. *Journal of Desert Research*, 2008, 28(1):73-76.
- [26] Sundby B, C Gobeil, N Silverberg, et al. The phosphorus cycle in coastal marine sediments[J]. *Limnol Oceanogr*, 1992, 37:1129-1145.

- [20] Vaalgamaa S. The effect of urbanisation on Laajalahti Bay, Helsinki City, as reflected by sediment geochemistry[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2004, 48:650-662.
- [21] 侯立军, 陆健健, 刘敏, 等. 长江口沙洲表层沉积物磷的赋存形态及生物有效性[J]. 环境科学学报, 2006, 6(3):488-494.
HOU Li-jun, LU Jian-jian, LIU Min, et al. Species and bioavailability of phosphorus in surface sediments from the shoals in the Yangtze estuary[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, 6(3):488-494.
- [22] 孟春霞. 2004年夏季黄河口及邻近海域各形态磷的研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2005.
Meng Chun-xia. Study of the speciation of phosphorus in the estuary of the Yellow River and its adjacent waters[D]. Qingdao: Chinese Marine University, 2005.
- [23] 吕昌伟, 何江, 孙惠民, 等. 乌梁素海沉积物中磷的形态分布特征[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(3):878-885.
LÜ Chang-wei, HE Jiang, SUN Hui-min, et al. Phosphorus speciation and distribution character in sediment of Wuliangsu Lake [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(3):878-885.
- [24] 张路, 范成新, 朱广伟, 等. 长江中下游湖泊沉积物生物可利用磷分布特征[J]. 湖泊科学, 2006, 18(1):36-42.
ZHANG Lu, FAN Cheng-xin, ZHU Guang-wei, et al. Distribution of bioavailable phosphorus (BAP) in lake sediments of the middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2006, 18(1):36-42.
- [25] 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):107-112.
WEI Jun-feng, CHEN Hong-tao, LIU Peng-xia, et al. Phosphorus forms in suspended particulate matter of the Yangtze River [J]. *Advances in Water Science*, 2010, 21(1):107-112.
- [26] 李北罡, 刘培怡, 马钦. 黄河上游沉积物对磷酸盐的吸附动力学研究[J]. 生态环境学报, 2010, 19(11):2693-2697.
LI Bei-gang, LIU Pei-yi, MA Qin. Adsorption kinetics of phosphate onto sediments from the Upper Reaches of the Yellow River[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(11):2693-2697.