

黄河表层沉积物中磷的分布特征及磷的生物可利用性

马 钦, 李北罡, 焦小宝

(内蒙古师范大学化学与环境科学学院, 内蒙古 呼和浩特 010022)

摘 要:采用改进的七步连续提取法分别对黄河中下游流域 5 个不同段位表层沉积物中总磷(TP)、有机磷(OP)及各种无机磷形态进行了分析,研究并探讨了沉积物中磷的分布特征及其对河海可能产生的影响,为预测黄河乃至渤海流域的营养状况、预防及科学管理等提供理论依据。结果表明,所测黄河表层沉积物中 TP 含量范围为 $240.71\sim 576.59\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,以无机磷(IP)为主,占 TP 含量的 $85.73\%\sim 98.48\%$;OP 含量占 TP 的 $1.52\%\sim 14.27\%$ 。受陆地河流和海流注入的影响,所研究沉积物样中 TP、IP 和 OP 含量的最大值均出现在靠近黄河口的渤海浅海区,其次是黄河口。IP 分为 6 种形态磷,即交换态磷(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)和原生碎屑磷(De-P),其中以 De-P 为主,其次是 Ca-P,分别占 TP 的 $52.47\%\sim 73.67\%$ 和 $18.32\%\sim 38.20\%$,Ex-P、Fe-P 和 Al-P 含量均相对较低,Obs-P 含量最低。各形态磷的空间分布均与调查区沉积物粒径有一定相关性,粒径小于 $0.063\ \text{mm}$ 的沉积物样中 TP 和 IP 含量均最高。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,其总量至少占 TP 的 $6.09\%\sim 24.46\%$ 。

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(2009)11-2379-06

Distribution Characteristics and Bioavailability of Phosphorus in Surface Sediments from the Yellow River

MA Qin, LI Bei-gang, JIAO Xiao-bao

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

Abstract: Phosphorus(P) is one of the foundational nourishing elements on which the marine life rely for existence, limiting nutrient in the ecosystem, and its form distribution and bioavailability are affecting the primary productivity of the waters directly. Total P(TP), organic P(OP), and different forms of inorganic P(IP) were analyzed by using the seven-step sequential extraction method in different sediments from the Yellow River. Distribution characteristics of P in different sections and its impact on the natural water column were discussed, aiming to understand the importance of P cycling between the river and sea and the trophic status of the waters. The results indicated that the contents of TP in all samples ranged from 240.71 to $576.59\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ and IP was its dominant portion, occupying $85.73\%\sim 98.48\%$ of TP. OP content was $1.52\%\sim 14.27\%$ of TP. Their maximums all appeared in the shallow sea of the Bohai sea near the Yellow River estuary and the next ones were at the Yellow River estuary. IP included six form phosphorus: 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) and detrital apatite+ other remaining inorganic P(De-P), De-P and Ca-P were found to be the major components of IP whose contents were $52.47\%\sim 73.67\%$ and $18.32\%\sim 38.20\%$ of TP, respectively. Contents of Ex-P, Fe-P, Al-P were all lower and that of Obs-P was the lowest. The spacial distribution of various form P was correlated with the grain size of sediments. Contents of TP and IP were all maximums in sediments of the grain size less than $0.063\ \text{mm}$ from different sections. Ex-P, Al-P, Fe-P, OP and part of Ca-P, acting as the bioavailable P, accounted for $6.09\%\sim 24.46\%$ of TP at least.

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

营养物质的循环是全球生物地球化学循环过程研究的重要内容,而水体沉积物又在生源物质的循环

中扮演着极其重要的角色。作为生源物质的磷在常温常压下一般不会形成气态化合物,所以它的循环相对较简单,主要以沉积型循环为主。在天然水体中磷的来源主要包括外源输入和内源释放,而内源释放则主要来自于水体沉积物。但沉积物中的磷以多种复杂的结合形式存在,其不同存在形态具有不同的生物有效性,因此沉积物中磷的形态分布、含量高低及迁移转

收稿日期:2009-04-27

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:马 钦(1984—),女,内蒙古呼和浩特人,在读硕士,主要从事水环境与沉积物方面的研究。

通讯作者:李北罡 E-mail:libg@imnu.edu.cn

化等会直接控制水体的营养状况和初级生产力,所以对水体沉积物中磷的形态分布及生物可获性具有重要的生态环境意义^[1-2]。基于此,国内外环境工作者对不同的湖泊、海洋、河口、潮滩、海湾等沉积物中的磷形态进行了大量的研究^[3-10],但有关黄河沉积物的研究报道则较少,林荣根等^[11]和李北罡等^[12]分别对黄河河口及中游沉积物中无机磷形态进行了研究,但对黄河中下游不同段位磷的分布及其可利用性未有系统研究。据调查我国海域磷相对贫乏^[13],海洋中的磷主要由河流和大气风尘输入。

黄河是我国的第二大河,也是世界上输沙量最多的河流,其泥沙主要来源于上中游依次流经的乌兰布和沙漠和库布齐沙漠等几大沙漠以及鄂尔多斯高原和世界上最大的黄土高原,每年携带大量细泥沙入海的同时,也将大量营养物质带入海洋,直接影响海洋的水生生态环境和初级生产力。本文对黄河中下游表层沉积物中磷形态的分布特征及生物可利用磷含量及所占比例进行了研究,以深入了解和判断河流、海洋中生源物质磷的迁移、水体的营养状况及对海区水环境潜在的影响,同时为水域环境控制和治理提供一定理论依据和参考。

1 样品采集与研究方法

1.1 样品采集与前处理

所有表层沉积物样于 2006 年 10 月取自沿黄河中下游流域不同段位及近海口,采用全球卫星定位系统(GPS)定位,采样点分别为:潼关(A1):海拔 319.8 m, 34°36.648'N, 110°16.913'E;大禹渡(A2):海拔 318 m, 34°39'21.9"N, 110°45'04.3"E;济南(A3):海拔 23.5 m, 36°43.637'N, 116°59.396'E;黄河口(A4):海拔 0.8 m, 37°45.587'N, 119°00.313'E;渤海浅海(A5):海拔 -2.6 m, 37°43.357'N, 119°13.064'E。所有样品现场封存于塑料袋中,运回后储存于冰箱中冷冻。用时自然晾干分别过 0.149、0.074、0.061 mm 筛,获得不同粒度存于干燥器中备用。

1.2 沉积物样中各形态磷的连续提取与分析

本试验采用文献[14]的方法对各形态磷进行了七步连续提取与分析。试验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 表层沉积物中 TP、IP、OP 含量及其分布

由图 1 表明,在所取不同粒径黄河表层沉积物中

总磷(TP,各形态 P 含量的总和)含量范围为 240.71~576.59 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,平均含量为 412.65 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 。无机磷(IP,除 OP 以外的其他各种形态 P 的总和)含量范围为 233.71~532.41 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ (见图 2),占 TP 含量的 85.73%~98.48%,是沉积物中磷的主要组成部分。有机磷(OP)含量在 6.17~60.65 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 之间(见图 3),占 TP 的 1.52%~14.27%,这部分磷主要来源于陆源输入和食物链等生物过程,通常以核素及磷脂等为主,其含量大小会直接影响初级生产力的溶解性磷的可利用水

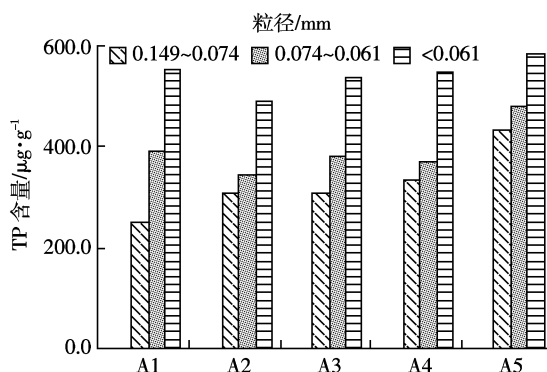


图 1 黄河表层沉积物中 TP 含量分布

Figure 1 TP contents of surficial sediments

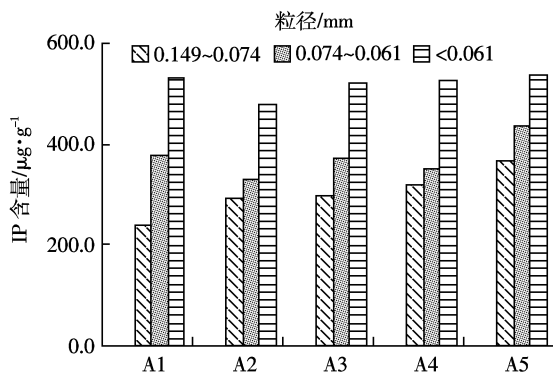


图 2 黄河表层沉积物中 IP 含量分布

Figure 2 IP contents of surficial sediments

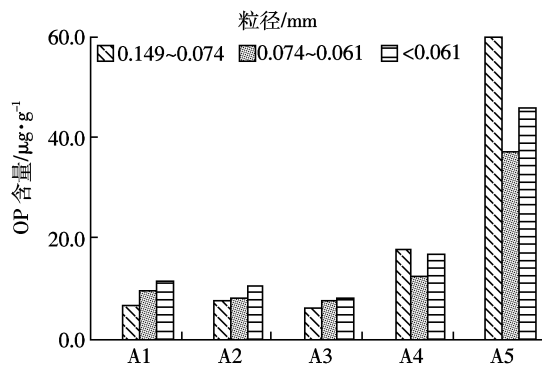


图 3 黄河表层沉积物中 OP 含量分布

Figure 3 OP contents of surficial sediments

平,因其可通过微生物的矿化降解而变为无机溶解磷进入到水体参与生物循环,故 OP 可以用来粗略估计有机质的生成和降解,是一种优于 TP 的可指示富营养化程度的指标^[15]。

在所测样中,TP、IP、OP 含量的最高值均出现在靠近黄河口的渤海浅海区(A5),这可能由于渤海是一个近封闭式的内海,且黄河口潮流具有驻波特性,随着黄河泥沙大量下排,在接近黄河口的渤海浅海段泥沙淤积,渤海湾口窄,内径大,海水交换时间长,自净能力差,海岸带地区也更容易受陆域活动的影响。其余各取样点 TP、IP 含量空间分布无显著差异,OP 含量在黄河口(A4)也较大。对于同一地点不同粒径的沉积物样,其中的 TP、IP 含量总体趋势随粒径的减小而增大,且最大值均出现在粒径<0.063 mm 的细泥沙中。黄河是以悬沙为主的河流,粒径<0.05 mm 的来沙占 82%以上,这也是随河水进入海洋的主要泥沙部分,同时也是对海洋磷的输入贡献最大的部分。OP 含量随粒径的变化在大禹渡(A2)、潼关(A1)和济南段(A3)与 TP 和 IP 的情况相同,而在黄河口及渤海浅海两处的变化相类似。这可能由于河口和近海区的水环境与前面流域的水环境有一定的不同,此处属于海陆相交汇处,河口潮流较弱,泥沙在此处大量淤积所致。

2.2 表层沉积物中各形态磷的含量分布

黄河中下游表层沉积物各形态磷的分析结果及

在不同粒径样中所占 TP 的比例见表 1。

2.2.1 自生钙磷(Ca-P)和原生碎屑磷(De-P)

钙结合态磷是沉积物中分布最广的一种磷形态,一般来说,沉积物中的钙结合态磷主要包括两部分:自生钙磷(Ca-P)和原生碎屑磷(De-P)。Ca-P 主要是反应性磷,是沉积物早期成岩过程中内生过程形成或生物成因的钙结合态磷(包括生物残骸,如鱼骨、藻类壳体等),故是活性磷的“汇”^[16],其中的生物磷灰石可通过微生物的矿化作用溶解进入水体中被生物利用,参与循环。在所研究的黄河中下游沉积物样中,Ca-P 含量范围为 72.92~142.54 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,占 TP 的 18.32%~38.20%,是无机磷的主要赋存形态之一。在济南段(A3)的沉积物样中 Ca-P 含量略高于其余站点,但相差不大。De-P 主要来自于流域内风化侵蚀产物中磷灰石矿物晶屑,通常以悬浮颗粒物形式迁移,主要以土壤侵蚀方式随径流进入河流。在所分析样中,De-P 在所有的无机磷形态中含量最高,其范围为 145.10~399.26 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,占 TP 含量的 52.47%~73.67%,是无机磷的最主要形态,这与长江口沉积物的测定结果相一致^[17]。De-P 含量在不同河段的空间分布不同,尤其在细泥沙中渤海浅海段(A5)和潼关段(A1)较高些,其他站点相差不大。潼关段 De-P 含量高可能主要受黄土高原黄土输入和库区淤积作用的影响,使潼关段河流淤积物颗粒较细,其中所含的碎屑磷较多有关,说明此时土壤侵蚀的贡献率最大。

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

Table 1 Analytical results of various form P($w/\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, $n=6$) and the ratio to TP in sediments of the Yellow River

编号	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	$R/\%$
A1	0.149~0.074	6.00	2.49	5.50	2.28	3.71	1.54	0.48	0.20	72.92	30.29	145.10	60.28
	0.074~0.061	8.38	2.18	7.08	1.84	3.64	0.95	1.11	0.29	88.10	22.93	266.40	69.34
	<0.061	8.69	1.60	8.96	1.65	3.67	0.68	1.55	0.29	108.12	19.95	399.26	73.67
A2	0.149~0.074	5.56	1.86	9.54	3.19	3.29	1.10	0.28	0.09	104.38	34.91	168.18	56.24
	0.074~0.061	5.89	1.75	9.38	2.79	3.09	0.92	0.23	0.07	104.02	30.91	205.52	61.07
	<0.061	7.33	1.52	11.94	2.47	3.94	0.82	0.48	0.10	135.98	28.14	312.92	64.75
A3	0.149~0.074	4.38	1.46	10.08	3.37	6.16	2.06	1.11	0.37	114.26	38.20	156.94	52.47
	0.074~0.061	6.17	1.65	11.54	3.09	5.97	1.60	1.20	0.32	125.02	33.43	216.52	57.91
	<0.061	7.90	1.50	11.74	2.23	5.56	1.05	1.36	0.26	142.54	27.03	350.30	66.42
A4	0.149~0.074	6.63	2.00	13.36	4.02	6.90	2.08	0.74	0.22	111.70	33.63	174.74	52.60
	0.074~0.061	8.42	2.34	13.68	3.80	5.55	1.54	1.25	0.35	113.70	31.60	204.74	56.90
	<0.061	9.42	1.74	16.22	3.00	5.63	1.04	2.14	0.40	134.66	24.89	356.18	65.82
A5	0.149~0.074	10.46	2.46	16.66	3.92	12.58	2.96	0.40	0.09	92.98	21.88	231.30	54.42
	0.074~0.061	10.53	2.25	20.00	4.27	10.53	2.25	1.75	0.37	103.16	22.00	285.42	60.87
	<0.061	16.17	2.80	21.28	3.69	10.23	1.77	1.77	0.31	105.64	18.32	377.32	65.44

渤海浅海段含量较高主要是由于黄河入海口到渤海浅海的河段形成弱潮多沙的陆相河口,胶体的吸附作用可能是De-P含量增加的原因。但De-P不是活性磷,只有在酸性条件下才能被溶解,这对于碱性环境下的河流和海洋沉积物很难实现,因此De-P一般不能再成为生物可利用磷。我国北方的石灰性土壤也决定了黄河水体沉积物中钙结合态磷的含量很高,这与实验结果相符。

2.2.2 可交换态磷(Ex-P)

主要是吸附在沉积物表面的粘土矿物颗粒和氧化物,氢氧化物等结合的磷酸盐,沉积物的理化特征如温度、pH、水动力条件、生物扰动等因素的改变都会影响Ex-P的释放,所以该形态磷最易释放到上层水体,直接被水生生物所利用,最终影响到水体中营养盐的结构特征和含量变化。由分析结果可知,所有被测沉积物样中,Ex-P含量在4.38~16.17 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 之间,占TP的1.46%~2.80%。其含量最大值出现在渤海浅海段(A5,10.46~16.17 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$),其余各点相差不大。这可能与进入渤海浅海区的泥沙粒度更细有关,泥沙粒度越细,对磷的吸附能力就越强。另外可能与生物活动也有关,生产力高的地区,生物碎屑随着颗粒的矿化和有机质的降解,相应的吸附在沉积物上表现出较高的Ex-P。

2.2.3 铁结合态磷(Fe-P)

直接受水体的氧化还原条件、酸碱性、生物作用及物源等因素的影响。Fe-P受水体中 Fe^{3+} 或 Fe^{2+} 的可溶性浓度的控制,但前者与磷酸盐结合不溶,而后者可溶,故能被生物所利用。当水体氧化还原条件改变时二者会发生相互转化,Fe-P既可沉降于沉积物中,也可释放到水体中,因此水环境中铁的氧化还原特征即会影响磷的生物地球化学特征。在所分析样中,Fe-P含量范围在3.09~12.58 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,占TP的0.68%~2.96%,含量较低,这与沿河流域的地质结构和钙结合态磷含量高有关。Fe-P含量从黄河中下游至河口及渤海浅海有增大趋势,尤其渤海浅海段(A5)Fe-P含量明显高于其他站点。

2.2.4 铝结合态磷(Al-P)

在所测样品中的含量范围为5.50~21.28 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,占TP的1.65%~4.27%,含量很低。所测样品的Al-P含量分布变化总体趋势与Fe-P一致,最大值也出现在渤海浅海段(A5)。研究表明,在一定的物理化学条件下,Fe-P、Al-P在水体中可相互转化,且二者含量之和可作为水体污染指标之一^[18]。实验结果表明,在

黄河中下游至渤海浅海区,由于沿河流域工农业生产和生活污染物的输入,使得河水携带泥沙最终入海时Fe-P和Al-P都有明显的富集,这种分布趋势反映了人类活动影响造成了陆源性输入量的增加。

2.2.5 闭蓄态磷(Obs-P)

这是紧密包裹在 Fe_2O_3 胶膜内部的还原溶性磷酸铁和磷酸铝,故该部分磷很难释放和被生物利用。黄河沉积物中Obs-P含量为0.23~2.14 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,仅占TP的0.07%~0.40%,在所有形态磷中含量最低。Obs-P含量沿河至渤海浅海总的分布趋势逐渐增加,但各站点变化幅度不大。

2.3 不同粒级沉积物中各形态磷的含量分布

各形态磷含量随粒径变化的相关性见表2。从表中分析可知,De-P含量与沉积物粒径变化有很好的正相关,Ca-P、Ex-P、Al-P及Obs-P含量与样品粒径具有一定正相关,但取样点不同,相关度高低差异较大。Fe-P与OP含量随样品粒径变化的相关性直接与取样点有关,差异很大,比如OP含量在黄河潼关(A1)、大禹渡(A2)和济南段(A3)与粒径变化呈较好的正相关,而在黄河口(A4)和渤海浅海段(A5)则无明显的相关性,这可能与人为污染物的陆源输入在两处的聚集导致OP含量较其他地方明显增大有关。另外随颗粒物粒径的变化,各形态磷之间也表现出不同的相关性,其中De-P含量与Ex-P、Al-P含量间呈现一定的正相关,按A1到A5顺序:De-P与Ex-P的相关系数分别为0.815 2、0.994 4、0.949 0、0.743 7、0.872 8;De-P与Al-P的相关系数分别为0.999 4、0.908 7、0.651 9、0.997 2、0.848 2。

表 2 黄河中下游表层沉积物中各形态磷与粒径的相关性
Table 2 The relativities between various form P and grain sizes in sediments of the Yellow River

编号	Ex-P	Al-P	Fe-P	Obs-P	Ca-P	De-P	OP
A1	0.835 2	0.997 5	-0.324 3	0.989 6	0.993 7	0.999 3	0.998 2
A2	0.884 1	0.700 2	0.534 8	0.571 4	0.741 5	0.927 6	0.893 7
A3	0.999 9	0.838 9	-0.957 1	0.974 5	0.981 3	0.953 2	0.935 8
A4	0.974	0.832 7	-0.702 9	0.976	0.814 8	0.870 1	-0.044 2
A5	0.759 2	0.937 8	-0.844	0.760 9	0.890 2	0.978 2	-0.400 5

另外土壤侵蚀泥沙俱下时会夹带各种形态的磷,但TP随De-P含量的增大而增大,呈极显著的正相关(按A1到A5顺序:相关系数分别为1.000 0、0.996 7、0.999 5、0.998 9、0.991 3),而其他形态的磷均无此密切的伴生关系。

2.4 沉积物中潜在的生物可利用磷(BP)

研究沉积物中的磷形态及其含量的一个重要目

表 3 沉积物样中潜在生物可利用磷的分析结果($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)Table 3 The contents of BP in sediments of the Yellow River($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)

编号	粒径/mm	Ex-P	Al-P	Fe-P	OP	BP
A1	0.149~0.074	6.00	5.50	3.71	7.00	22.21
	0.074~0.061	8.38	7.08	3.64	9.51	28.61
	<0.061	8.69	8.96	3.67	11.68	33.00
A2	0.149~0.074	5.56	9.54	3.29	7.81	26.20
	0.074~0.061	5.89	9.38	3.09	8.39	26.75
	<0.061	7.33	11.94	3.94	10.69	33.90
A3	0.149~0.074	4.38	10.08	6.16	6.17	26.79
	0.074~0.061	6.17	11.54	5.97	7.50	31.18
	<0.061	7.90	11.74	5.56	8.00	33.20
A4	0.149~0.074	6.63	13.36	6.90	18.12	45.01
	0.074~0.061	8.42	13.68	5.55	12.46	40.11
	<0.061	9.42	16.22	5.63	16.87	48.14
A5	0.149~0.074	10.46	16.66	12.58	60.65	103.97
	0.074~0.061	10.53	20.00	10.53	37.49	84.55
	<0.061	16.17	21.28	10.23	45.80	131.86

的是测定其中潜在的生物可利用磷(BP)的量。通过讨论及结合文献确定本研究沉积物中潜在的 BP 应包括 Ex-P、Al-P、Fe-P、OP 及 Ca-P 中的生物磷灰石,它们在合适的条件下可与水体进行磷交换,被生物利用,参与生物地球化学循环,具体结果见表 3。所研究样中 BP 含量在 22.21~131.86 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 之间,约占 TP 的 6.09%~24.46%,其中渤海浅海段(A5)总量最高;Ca-P 占 TP 的 18.32%~38.20%。因此,所测沉积物样中 BP 占 TP 的比值要高于 6.09%~24.46%。黄河每年向海洋输送约 10 亿 t 泥沙^[9],黄河多年平均径流量占流入渤海总径流量的 78%,并且根据调查磷酸盐已成为黄河口附近海域浮游植物生长的限制因子^[13]。因此,黄河携带大量泥沙注入渤海时,就对磷相对贫乏的海洋输入了大量的活性磷酸盐等基础营养物质,这对维持渤海水域的营养状况、浮游植物的多样性及较高生产力等具有重要作用和影响。

3 结论

黄河中下游表层沉积物中 TP、IP 和 OP 含量最高值均出现在靠近黄河口的渤海浅海区,这是由于随河进入海区的大量泥沙主要为细泥沙所致,另外人为污染物的陆源输入也是原因之一。

在沉积物的 7 种磷形态中 De-P 和 Ca-P 是沉积物中磷的主要赋存形态,在所研究流域的含量分布因直接受流域周围地质地貌结构及泥沙的冲泻性质影

响而各不相同。各形态磷的含量及分布直接与沉积物粒径具有一定相关性,同一地方不同形态磷随粒径的变化不同,同一形态磷在不同沉积物中含量与粒径的相关性也各不相同,其中 De-P 与 TP 有极显著的正相关,即它们有极其密切的伴生关系,因此 De-P 是 TP 的最大贡献者。

根据各形态磷在 TP 中所占比例及其生物可利用性,估算出黄河中下游表层沉积物中 BP 至少占 TP 的 6.09%~24.46%,又根据每年黄河向渤海的输沙量可进一步估算出进入海洋中参与水生生态系统循环的泥沙中潜在的 BP 的量,这对缺磷的海洋来说是一个重要的营养物质的来源。

参考文献:

- [1] 付永清,周易勇. 沉积物磷形态的分级分离及其生态学意义[J]. 湖泊科学, 1999, 11(4):376-381.
FU Yong-qing, ZHOU Yi-yong. Species and fractionation of phosphorus in sediments and their ecological significance[J]. *Journal of Lake Science*, 1999, 11(4):376-381.
- [2] 苏玉萍,郑达贤,林婉珍,等. 福建省富营养化水库沉积物磷形态及对水体的贡献[J]. 湖泊科学, 2005, 17(4):311-316.
SU Yu-ping, ZHENG Da-xian, LIN Wan-zhen, et al. Phosphorus forms in sediment and the release potential of phosphorus to water in eutrophic Shanzi Reservoir, Fujian Province[J]. *Journal of Lake Science*, 2005, 17(4):311-316.
- [3] Andrieux-Loyer F, Aminot. Phosphorus forms related to sediment grain size and geochemical characteristics in French coastal areas[J]. *Estuar Coast Shelf Sci*, 2001, 52:617-629.
- [4] 戴纪琴,宋金明,李学刚. 胶州湾不同形态磷的沉积记录及生物可利用性研究[J]. 环境科学, 2007, 28(5):929-936.
DAI Ji-cui, SONG Jin-ming, LI Xue-gang. Sediment record of phosphorus and the primary study of its bioavailability in Jiaozhou Bay sediments[J]. *Environmental Science*, 2007, 28(5):929-936.
- [5] 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.
- [6] 王琦,姜霞,金相灿,等. 太湖不同营养水平湖区沉积物磷形态与生物可利用磷的分布及相互关系[J]. 湖泊科学, 2006, 18(2):120-126.
WANG Qi, JIANG Xia, JIN Xiang-can, et al. Distribution of phosphorus fractions and bio-available phosphorus forms and their relationship in the sediments from different regions of Lake Taihu[J]. *Journal of Lake Science*, 2006, 18(2):120-126.
- [7] 李宝,范成新,丁士明,等. 滇池福保湾沉积物磷的形态及其与间隙水磷的关系[J]. 湖泊科学, 2008, 20(1):27-32.
LI Bao, FAN Cheng-xin, DING Shi-ming, et al. Phosphorus species in Sediments and their relationships with soluble phosphorus concentra-

- tions in interstitial waters of Fubao Bay in Lake Dianchi[J]. *Journal of Lake Science*, 2008, 20(1):27-32.
- [8] 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.
- JIN Xiang-can, LU Shao-yong, WANG Kai-ming. 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.
- [9] 高 丽, 杨 浩, 周健民, 等. 滇池沉积物磷的释放以及不同形态磷的贡献[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(4):731-734.
- GAO Li, YANG Hao, ZHOU Jian-min, et al. Release of phosphorus from sediment sand contributions of different P forms in Dianchi Lake[J]. *Journal of Agro-environment Science*, 2004, 23(4):731-734.
- [10] 张 志, 周瑞请, 郭博书. 乌兰布和沙漠与黄河沉积物磷的形态分析[J]. 内蒙古石油化工, 2007, 33(1):1-4, 14.
- ZHANG Zhi, ZHOU Rui-qing, GUO Bo-shu. The analysis of the phosphorus forms in sand of the Wulanbuhe desert and sediments of the Yellow River[J]. *Inner Mongolia Petrochemical Industry*. 2007, 33(1):1-4, 14.
- [11] 林荣根, 吴景阳. 黄河口沉积物中无机磷酸盐的存在形态 [J]. 海洋与湖沼, 1992, 23(4):387-395.
- LIN Rong-gen, WU Jing-yang. Forms of inorganic phosphorus in the sediments near the Huang River estuary[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1992, 23(4):387-395.
- [12] 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.
- 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.
- [13] 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.
- 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.
- [14] 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.
- 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.
- [15] Vaalgamaa S. The effect of urbanisation on Laajalahti Bay, Helsinki City, as reflected by sediment geochemistry[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2004, 48:650-662.
- [16] Ruttenberg K C. Development of a sequential extraction method for different forms of phosphorus in marine sediments[J]. *Limnol Oceanogr*, 1992, 37:1460-1482.
- [17] 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.
- [18] H ISASH I J. Fractionation of phosphorus and releasable fraction in Sediment Mud of Osaka Bay[J]. *Bulletin of the Japanese Society of Scientific Fisheries*, 1983, 49(3):447-454.
- [19] 赵文林. 黄河泥沙[M]. 郑州:黄河水利出版社, 1996.
- ZHAO Wen-lin. Yellow river sands[M]. Zhengzhou: Yellow River Water Conservancy Press, 1996.