

黄河不同粒径悬浮物中 POC 含量及输运特征研究

张龙军¹, 徐雪梅¹, 何会军²

(1. 中国海洋大学海洋环境与生态教育部重点实验室, 青岛 266100; 2. 中国海洋大学化学化工学院, 青岛 266100)

摘要: 悬浮物(TSS)粒径与颗粒有机碳(POC)含量关系的研究, 是河流 POC 形态变化及输送过程和输运通量研究的基础. 本研究在沉降分级法基础上, 结合激光粒度仪粒度测定和多元线性回归分析的数据处理方法, 对 2005-06-29 黄河利津站、2005-09-27 黄河口低盐度区以及 2006 年 11 月兰州、潼关、花园口各站 TSS 样品分析发现: 黄河 TSS 中 POC 与其对应的中值粒径存在良好的负指数关系, POC 的极限值为 0.56%, 普遍低于世界其它河流; 黄河不同区段站位 TSS 性质不同使各样品相同粒径间 POC 存在明显的差异, 黄河口站 > 花园口站 > 兰州站 > 潼关站 > 利津站, 如 < 8 μm 粒级 TSS 中 POC 依次是 0.661%、0.627%、0.550%、0.505%、0.493%; 黄河各粒级 TSS 所承载的 POC 量占样品 POC 总量的比例在不同区段各样品间极其相近, POC 随 TSS 粒径增大显著递减, 80% 以上的 POC 集中在 < 16 μm 的 TSS 中, 而粒径 < 32 μm 的 TSS 承载了 95% 以上的 POC. 可见虽然黄河自西向东横跨 5 000 km 之多, 落差达 4 000 m 以上, 但 POC 的输运规律具有一致性, TSS 粒径是控制 POC 输运特性的主要因素.

关键词: 黄河; 不同粒径悬浮物; 颗粒有机碳

中图分类号: X143 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)02-0342-06

POC Content in Size-Fractioned TSS and Transportation Character in The Yellow River

ZHANG Long-jun¹, XU Xue-mei¹, HE Hui-jun²

(1. Key Laboratory of Marine Environmental Science and Ecology, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

2. Chemistry and Chemical Engineering College, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: Relationship between grain size of total suspended solids (TSS) and particulate organic carbon (POC) content is the base of studying POC transportation and flux in river. Based on sedimentation classification, POC in size-fractioned TSS of The Yellow River was studied by multiple linear regression. The results indicate that: with the median diameter increasing, POC is decreased in a logarithm tendency, the maximum is 0.56% lower than the other rivers; POC is different in the same size-fractioned TSS between characteristic sample stations: the estuary > Huayankou > Lanzhou > Tongguan > Lijin, for example POC is 0.661%, 0.627%, 0.550%, 0.505%, 0.493% in TSS of which the grain size is < 8 μm ; the proportion of POC in size-fractioned TSS has little distinction, POC is decreased remarkably with the increasing of the grain size of TSS, and more than 80% of POC is concentrated in the particles < 16 μm while over 95% of POC is concentrated in particles of size < 32 μm . So the transportation of POC is consistent, the main control of transportation of POC is attributed to the grain size of TSS.

Key words: The Yellow River; size-fractioned total suspended solids; particulate organic carbon (POC)

全球河流每年向海洋输送约 1 Gt(10^{15} g)碳, 其中约 40% 为有机碳^[1]. 而 TSS 是各种有机物参与水体生物地球化学循环和迁移转化过程的重要载体^[2], 许多物理化学过程主要集中在 TSS 与水体的固-液界面之间, TSS 粒度决定着它的总有效面积, 是各种反应的基本控制因素^[2,3]. 同时河流有机碳的组分构成及运移通量与流域侵蚀背景密切相关^[4]. 因此认识河流 TSS 粒径大小与承载的 POC 量的准确关系及其比例变动, 是研究河流 POC 形态变化及输运过程、通量的基础^[5,6]. Keil 等^[7]和 Bergamaschi 等^[8]研究认为: TSS 越细表面积越大, POC 就越高. Adrin 等^[9]对海洋表层沉积物的 POC/²³⁴Th 报道中指出, 1 ~ 100 μm TSS 的 POC 远远大于 100 μm 以上 TSS

的 POC. Laurent 等^[10]指出当 TSS 粒径 > 38 μm 时, 由于各地区沉积物类型不同 POC 随粒径变化的规律不一致; 但当 TSS 粒径 < 38 μm 时, 粒径越小, POC 越高.

黄河是世界上泥沙含量最高的河流, 其陆源 TSS 以及 POC 的输入对渤海乃至整个西北太平洋生态系统都会产生较大影响, 正确认识黄河 POC 的输运特征有着重要意义. Cauwet 等^[11]估算 1985 年黄河 POC 年入海通量(以 C 计)达到 3.75×10^{11} mol. 张龙

收稿日期: 2008-02-03; 修订日期: 2008-05-08

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB412501); 国家自然科学基金项目(40476063)

作者简介: 张龙军(1955 ~), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为海洋和河流碳循环, E-mail: longjunz@ouc.edu.cn

军等^[12] 2007 年报道黄河入海 TSS 中 POC 约为 0.51%,且不同盐度区 POC 含量随 TSS 粒径降低而升高.但对黄河不同粒径 TSS 的 POC 及其输运特征的研究目前尚鲜见报道.本研究采用沉降法将黄河不同区段站位 TSS 样品分级后,测定各粒级 TSS 中 POC 含量和粒度组成,并采用多元线性回归分析法处理所得数据,准确获得了不同粒级 TSS 的 POC,分析了黄河各区段不同粒级 TSS 中 POC 的差异,探讨了 TSS 粒径对 POC 及输运规律的影响.

1 材料与方法

1.1 样品采集、分级与处理

所用样品中,利津站样取于 2005-06-29 黄河利津水文站表层水,黄河口样取于 2005-09-27 黄河口低盐度区表层水,兰州、潼关、花园口站样取于 2006 年 11 月黄河平水期各站表层水.所有样品均在当日采用基于 Stokes 原理的水淘选装置^[13]将水体悬浮物分为 5 个粒级范围:Ⅰ(< 8 μm),Ⅱ(8 ~ 16 μm),Ⅲ(16 ~ 32 μm),Ⅳ(32 ~ 63 μm),Ⅴ(> 63 μm).使用预先在 450℃灼烧并恒重的玻璃纤维滤膜(Whatman 0.7 μm GF/C)过滤,过滤后的滤膜 45℃低温烘干称重.滴加几滴 2 mol/L 盐酸,置于含浓盐酸蒸气的干燥器(其底部放有 2 个盛有浓盐酸的小烧杯)中熏蒸 24 h,以除去样品中的无机碳.然后于 45℃低温烘干,除去过量的盐酸,干燥器中保存,待测.

1.2 样品测定

POC:用日本岛津公司 TOC-VCPN 总有机碳分析仪及 SSM-5000A(固体试样燃烧装置),900℃高温燃烧催化氧化-非分散红外吸收法检测.量程(以 C 计)0.1 ~ 30 mg,偏差 < ± 1%.

粒度:用英国 MALVERN 公司 Mastersizer-2000 激光粒度仪测定.量程为 0.02 ~ 2 000 μm,偏差 < ± 3%.

2 结果与讨论

2.1 样品各粒级 TSS 的粒度组成及其 POC

采用沉降法将 TSS 样品分为Ⅰ(< 8 μm)、Ⅱ(8 ~ 16 μm)、Ⅲ(16 ~ 32 μm)、Ⅳ(32 ~ 63 μm)、Ⅴ(> 63 μm)5 个粒级范围(黄河口样品由于 TSS 含量低且粒径较细,仅得到 3 个粒级),并用激光粒度仪测定各个粒级的实际粒径分布.沉降分级所得 TSS 和未分级的原始样对应的 POC 以及各个粒级的实际粒径分布如表 1 所示.可见各粒级样品中 POC 随中

值粒径的增大依次降低,如潼关站样小颗粒粒级Ⅰ(< 8 μm)的 TSS 中 POC 为 0.481%,Ⅲ(16 ~ 32 μm)粒级的 TSS 中 POC 降至 0.233%,而大颗粒粒级Ⅴ(> 63 μm)的 TSS 中 POC 仅为 0.090%,其它样品也同样存在这种降低的趋势.虽然沉降法分级从中值粒径看分级效果显著,但用激光粒度仪测定各个粒级的实际粒径分布,反映出各粒级 TSS 中仍然存在着不同比例的其它粒径的 TSS.如潼关站样小颗粒粒级Ⅰ(< 8 μm)中 < 8 μm 的 TSS 为 77.0%,效果较好;但其它各粒级中不同粒径 TSS 的交叉现象较为突出,如Ⅱ(8 ~ 16 μm)粒级中 8 ~ 16 μm 的 TSS 仅为 53.6%,而 < 8 μm 的为 28.0%,16 ~ 32 μm 为 17.6%,其它样品也存在类似的现象.这是基于 Stokes 原理沉降分级法常遇到的粒径交错问题.

2.2 样品各粒级 TSS 中值粒径对 POC 的影响

根据不同站位沉降分级所得 TSS 和未分级的原始样 TSS 的粒度组成及相应 POC 的结果发现,黄河 TSS 中 POC 与其对应的中值粒径存在良好的负指数关系,如图 1 所示: $POC = 0.5594e^{-0.0274d(0.5)} \times 100\%$ ($R^2 = 0.8453$, $n = 28$).

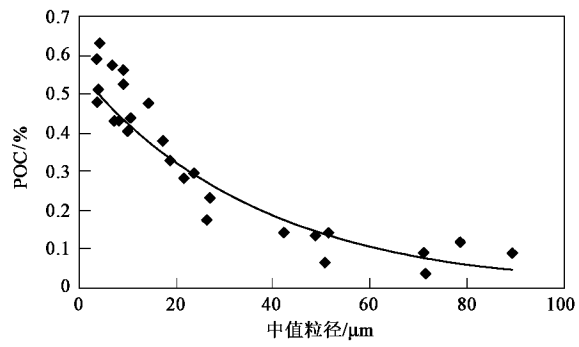


图 1 POC 与中值粒径的关系

Fig.1 Relationship between POC and median diameter

由此可知黄河 TSS 中 POC 的极限值为 0.56%,普遍低于世界其它河流 TSS 中 POC 的量值^[14,15].这种负指数关系是两方面原因综合作用的结果:一方面 TSS 中值粒径越小,颗粒物比表面积越大,吸附的有机碳就越多;另一方面随着中值粒径增大,石英和长石含量升高,对 POC 存在一个稀释作用^[16].这与陶贞等^[17] 2004 年对增江流域 POC 的研究结论:细粒级中 POC 随 TSS 的增加呈指数趋势下降,粗粒级中 POC 随 TSS 的增加呈缓慢线性下降且相关性不显著的情况不同.这可能是由于黄河水体 TSS 主要来源于黄土高原的第四纪沉积物,悬浮泥沙的粒度组成、有机物及各矿物成分的含量与黄土具有极大的相似

表 1 样品各粒级及原始样 TSS 的粒度组成及其 POC
Table 1 POC and size-fractioned proportions in different samples

站位	粒级名称	颗粒粒径					值粒径 $d(0.5)/\mu\text{m}$	POC/%
		$< 8 \mu\text{m}/\%$	$8 \sim 16 \mu\text{m}/\%$	$16 \sim 32 \mu\text{m}/\%$	$32 \sim 63 \mu\text{m}/\%$	$> 63 \mu\text{m}/\%$		
兰州	I	80.1	13.6	5.2	1.1	0.0	3.9	0.512
	II	34.2	48.2	14.6	2.5	0.5	8.3	0.431
	III	18.6	20.7	44.7	15.1	0.9	21.9	0.280
	IV	6.0	9.6	21.4	49.1	13.9	42.3	0.144
	V	4.8	5.5	12.0	23.0	54.7	71.1	0.088
	原始样	47.3	26.1	14.4	9.2	3.1	7.2	0.430
潼关	I	77.0	20.1	2.3	0.7	0.0	3.9	0.481
	II	28.0	53.6	17.6	0.8	0.0	10.0	0.405
	III	14.3	14.5	55.0	13.8	2.4	26.8	0.233
	IV	5.3	11.2	20.3	52.3	11.0	51.7	0.141
	V	4.5	7.0	12.6	23.0	52.9	89.2	0.090
	原始样	15.4	20.8	26.5	29.4	7.9	17.4	0.380
花园口	I	79.0	16.4	2.5	2.1	0.0	3.6	0.589
	II	32.6	56.0	11.2	0.2	0.0	9.2	0.524
	III	12.7	18.4	56.0	12.4	0.5	23.7	0.299
	IV	6.9	0.6	23.4	52.8	16.3	48.8	0.134
	V	5.9	6.0	17.2	20.2	50.8	78.7	0.120
	原始样	28.1	23.0	26.5	19.0	3.4	10.6	0.440
利津	I	87.2	11.8	0.8	0.22	0.0	3.6	0.480
	II	38.8	42.0	18.7	0.51	0.0	9.2	0.401
	III	6.7	13.1	44.8	32.3	3.1	23.7	0.176
	IV	4.4	0.2	9.3	57.0	29.2	50.7	0.066
	V	2.7	1.1	0.8	33.0	62.5	71.5	0.037
	原始样	27.4	17.5	27.1	22.4	5.6	18.6	0.329
黄河口	I	78.2	17.3	3.5	0.7	0.3	4.3	0.632
	II	37.3	44.6	16.8	1.3	0.0	9.0	0.562
	III	24.8	31.4	34.0	9.6	0.2	14.3	0.475
	原始样	55.6	25.5	14.6	4.0	0.3	6.9	0.572

性,使得 TSS 中 POC 在大粒径和小粒径中表现出一致的规律.因此,径流 TSS 的 POC 与 TSS 粒径和流域的土壤性质有关.

2.3 不同粒级 TSS 中 POC 的多元线性回归处理

由于传统的 Stokes 沉降分级法会带来粒级内的粒径交错现象,这使得直接测定的 POC 值并不能真实反映某一粒级 TSS 中 POC 的准确含量.因此需要运用多元线性回归法对数据进行进一步处理^[18].

多元线性回归分析是研究变量间相关关系的一种统计方法.根据数据分析确定因变量 y 依赖于 p 个自变量 $x_1, x_2, \cdots, x_p$ 而变化,如果它们之间具有某种线性关系,则可归结为 p 元线性回归模型.由于黄河陆源 TSS 的密度具有相似性,各粒级范围 TSS 内 POC 相对稳定,符合多元线性回归处理的条件,因此可以选择各粒级 TSS 的含量作为自变量 x ,分为 5 级可取 5 个自变量,每级样品的 POC 作为因变量 y ,则有:

$$y_k = \beta_1 x_{1k} + \beta_2 x_{2k} + \beta_3 x_{3k} + \beta_4 x_{4k} + \beta_5 x_{5k}$$

$$(k = 1, 2, \cdots, 5)$$

式中 $\beta_1, \beta_2, \cdots, \beta_5$ 为自变量回归系数,在此表示具体粒级 TSS 的 POC. x_{1k} 代表沉降法所得第 k 级 TSS 中 $< 8 \mu\text{m}$ 颗粒的含量; x_{2k} 代表第 k 级 TSS 中 $8 \sim 16 \mu\text{m}$ 颗粒的含量.

将表 1 中数据分别代入上述公式,求解得到不同粒级 TSS 中真实的 POC,如表 2 所示(黄河口样品仅分为 3 级,线形回归处理时将 $> 16 \mu\text{m}$ 的 TSS 及其 POC 合并为一个粒级).

以潼关站样品为例,如图 2 所示,仅以沉降分级法确定的小颗粒粒级 ($< 8 \mu\text{m}$) 对应的 POC 为 0.481%,要小于多元线性回归法处理所得 POC 值 0.505%,而大颗粒粒级 ($> 63 \mu\text{m}$) 沉降分级法对应 POC 为 0.090% 要大于多元线性回归法处理所得 POC 值 0.004%. 其它样品也存在小粒级 ($< 8 \mu\text{m}$ 、 $8 \sim 16 \mu\text{m}$) 的沉降分级法所得的 POC 相对多元线性回归法处理所得 POC 偏低,而大粒级 ($16 \sim 32 \mu\text{m}$ 、 $32 \sim 63 \mu\text{m}$ 、 $> 63 \mu\text{m}$) POC 偏高的现象.

表 2 线性回归处理所得各样品不同粒级 TSS 的 POC/%

Table 2 POC in different size-fractioned TSS after linear regression/%

站位	< 8 μm	8 ~ 16 μm	16 ~ 32 μm	32 ~ 63 μm	> 63 μm
兰州	0.550	0.450	0.167	0.064	0.004
潼关	0.505	0.438	0.161	0.061	0.004
花园口	0.627	0.530	0.201	0.076	0.003
利津	0.493	0.430	0.157	0.050	0.004
黄河口	0.661	0.590	0.287 ¹⁾		

1)为 > 16 μm 的悬浮颗粒物中 POC

不难理解,这是由于沉降法分级后小粒级范围中含有大粒径 TSS,大粒级范围中含有小粒径 TSS,而小粒径 TSS 中 POC 高于大粒径 TSS 中 POC 所致.而且粒级越大,POC 的误差越大,如表 3 所示.这不仅影响到正确研究河流 POC 的形态变化及输送规律,而且对估算不同粒级TSS中POC的输运通量也

表 3 沉降法与线性回归处理所得 POC 的差异

Table 3 POC of samples before and after linear regression

站位	颗粒粒径 $/\mu\text{m}$	沉降分级测定 POC/%	线性回归处理所得 POC/%	POC 绝对误差/%	相对误差/%
兰州	< 8	0.512	0.550	- 0.038	6.9
	8 ~ 16	0.431	0.450	- 0.019	4.2
	16 ~ 32	0.280	0.167	0.113	6.8×10^1
	32 ~ 63	0.144	0.064	0.080	1.3×10^2
	> 63	0.088	0.004	0.084	2.1×10^3
潼关	< 8	0.481	0.505	- 0.024	4.8
	8 ~ 16	0.405	0.438	- 0.033	7.5
	16 ~ 32	0.233	0.161	0.072	4.5×10^1
	32 ~ 63	0.141	0.061	0.080	1.3×10^2
	> 63	0.090	0.004	0.086	2.2×10^3
花园口	< 8	0.589	0.627	- 0.038	6.1
	8 ~ 16	0.524	0.530	- 0.006	1.1
	16 ~ 32	0.299	0.201	0.098	4.9×10^1
	32 ~ 63	0.134	0.076	0.058	7.6×10^1
	> 63	0.120	0.003	0.117	3.9×10^3
利津	< 8	0.480	0.493	- 0.013	2.6
	8 ~ 16	0.401	0.430	- 0.029	6.7
	16 ~ 32	0.176	0.157	0.019	1.2×10^1
	32 ~ 63	0.066	0.050	0.016	3.2×10^1
	> 63	0.037	0.004	0.033	8.3×10^2
黄河口	< 8	0.632	0.661	- 0.029	4.4
	8 ~ 16	0.562	0.590	- 0.028	4.8

2.4 黄河各区段站位不同粒级 TSS 中 POC 的差异
采用多元线性回归法处理后,黄河各区段不同站位各粒级 TSS 中 POC 变化如图 3 所示.

整体而言,各粒级 TSS 中 POC 随粒径的增加呈显著递减趋势,< 8 μm 、8 ~ 16 μm 颗粒中 POC 相对较高,其它粒级 TSS 中 POC 很低.此外值得注意的

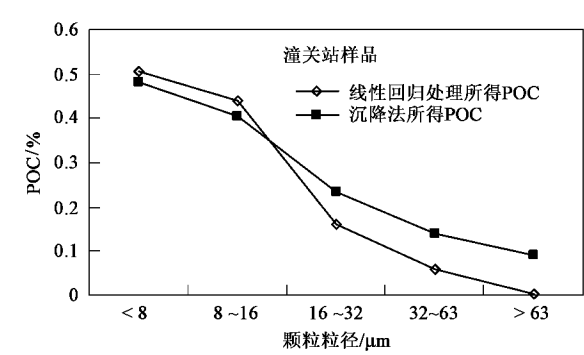


图 2 潼关站样品沉降法及线性回归处理所得 POC
Fig.2 POC of Tongguan samples before and after linear regression

会造成较大误差.因此应用多元线性回归处理方法能够将分散在不同样品组内的同一粒级范围 TSS 的 POC 进行归一化处理,使所得到的各粒级 POC 结果更加可靠.

是黄河不同区段各样品相同粒级 TSS 中 POC 也不尽相同,如黄河口样品各粒级 TSS 中 POC 最高,利津站各粒级 TSS 中 POC 最低,这种差异应该是来自于黄河不同区段 TSS 性质的差别.黄河口样取于 2005-09-27,盐度为 1.6 的水域;在淡、咸水混合过程中大颗粒 TSS 剧烈沉降,中值粒径降至最低(6.9

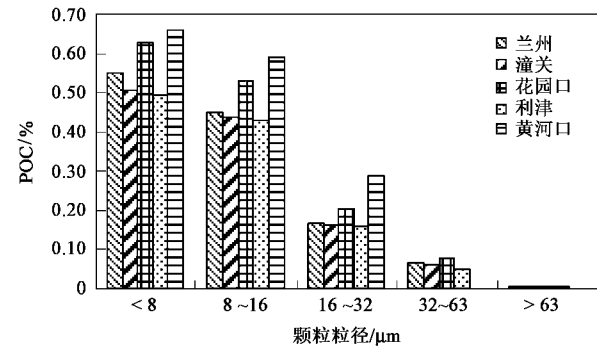


图 3 POC 与颗粒粒径的关系

Fig.3 Relationship between POC values and particle size

μm), 伴随 TSS 的沉降水体透光率增大浮游植物对 POC 的贡献增大, 使黄河口 TSS 中 POC 成为全程各站中的最高值. 黄河利津站样取于 2005-06-29, 此时正值黄河第 4 次调水调沙人工异重流的塑造期, 流量和泥沙含量都大幅增加, 而 TSS 主要来源于沉降泥沙的再悬浮, 由于沉降泥沙粒径偏大有机质含量本身较低, 且利津站位于黄河末端, 其 TSS 中有机质经过了比较充分的降解, 因此利津站 TSS 中 POC 偏低. 潼关站上游是陇东、陕北、晋西黄土丘陵沟壑区, 黄土有机质含量较低在 0.20% ~ 0.60% 之间, 平均值仅为 0.39%^[19], 且该地区干旱少雨, 有机质的积累和淋溶作用弱, 强烈的机械侵蚀使水体 TSS 含量高且粒径偏大, POC 较低. 花园口是黄河地上悬河的起点, 经过三门峡小浪底水库的截水沉沙作用使花园口 TSS 粒径要小于潼关站; 且在河南西部有一定面积的娄土分布, 娄土是优良的农业土壤有机质含量在 1% 左右^[20], 在机械侵蚀作用下由伊洛河、沁河等河流输入黄河, 使花园口 TSS 中 POC 相对较高; 此外小浪底至花园口区间的伊洛河、新蟒河和沁蟒河 3 条较大支流流域内, 分布着众多造纸、化工等重污染企业, 水体污染严重可能也是造成花园口站 POC 较高的一个原因. 兰州位于黄河上游有灰钙土广泛分布的甘肃境内, 灰钙土有机质含量通常在 0.7% ~ 1.5%, 使兰州站 POC 要高于潼关站; 但是兰州上游是气候寒冷干旱的黄土高原, 相对于处于温暖湿润地带的花园口站其 POC 略低. 可见黄河不同区段 TSS 性质的不同, 是其相同粒级间 POC 存在明显差异的主要原因.

2.5 黄河各区段不同粒级 TSS 所承载的 POC 比例

对于不同粒径 TSS 所承载 POC 的定量关系研究较少, Laurent 等^[10]曾对阿拉斯加河流及海湾, 秘鲁、瑞典海湾的表层沉积物 POC 进行研究并指出,

颗粒物中大部分 POC 主要集中在 < 38 μm 的细颗粒物中. 对黄河不同粒级 TSS 所承载的 POC 进行对比分析发现, 虽然黄河不同区段 TSS 相同粒级间 POC 存在明显的差异, 但总体而言 TSS 中 POC 主要集中在 < 16 μm 粒径的 TSS 上, 如表 4 所示, 粒径 < 16 μm 的 TSS 承载了 80% 以上的 POC, 而粒径 < 32 μm 的 TSS 承载了 95% 以上的 POC; 此外值得注意的是黄河 TSS 中各粒级颗粒物所承载的 POC 占样品 POC 总量的比例在不同区段各样品间非常近似地一致, 包括黄河口盐度为 1.6 的样品. 可见, 虽然黄河自西向东横跨 5 000 km 之多, 落差达 4 000 m 以上, 但 POC 的输运规律具有一致性, TSS 粒径是控制黄河水体 POC 输运特性的主要因素.

表 4 黄河不同粒级 TSS 所承载的 POC 比例/%

Table 4 Proportion of POC in size-fractioned total suspended solids/%					
站位	< 8 μm	8 ~ 16 μm	16 ~ 32 μm	32 ~ 63 μm	> 63 μm
兰州	44.5	36.5	13.5	5.2	0.3
潼关	43.2	37.5	13.8	5.2	0.3
花园口	43.6	36.9	14.0	5.3	0.2
利津	43.5	37.9	13.8	4.4	0.4
黄河口	43.0	38.3	18.7		

3 结论

(1) 黄河 TSS 中 POC 与其对应的中值粒径存在良好的负指数关系, $POC = 0.5594e^{-0.0274d(0.5)} \times 100\%$, POC 的极限值为 0.56%, 普遍低于世界其它河流. 径流 TSS 的 POC 与 TSS 粒径和流域的土壤性质有关.

(2) 黄河不同区段站位 TSS 性质的不同使得各样品相同粒级 TSS 中 POC 不同, 黄河口站 > 花园口站 > 兰州站 > 潼关站 > 利津站, 如 < 8 μm 粒级 TSS 中的 POC 依次是 0.661%、0.627%、0.550%、0.505%、0.493%.

(3) 黄河 POC 的输运规律具有一致性: TSS 粒径是控制 POC 输运特性的主要因素; 不同区段站位各粒级 TSS 所承载的 POC 占样品 POC 总量的比例具有良好的一致性; 80% 以上的 POC 集中在 < 16 μm 的 TSS 中, 而粒径 < 32 μm 的 TSS 承载了 95% 以上的 POC.

参考文献:

[1] Hope D, Billet M F, Cresser M S. A review of the export of carbon in river water: fluxes and processes[J]. Environmental Pollution, 1994, 84: 301-324.

- [2] 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.
- [3] Mayer L M. Surface area control of organic carbon accumulation in continental shelf sediments[J]. Geochim Cosmochim Acta, 1994, **58**(4): 1271-1284.
- [4] 高全洲, 沈承德, 孙彦敏, 等. 西江流域的有机碳侵蚀通量[J]. 沉积学报, 2000, **18**(4): 639-645.
- [5] 彭安国, 黄弈普, 陈敏. 厦门湾水体中不同粒径颗粒物、Chl-a 和²³⁴Th 随潮汐的变化及其海洋学意义[J]. 台湾海峡, 2004, **24**(5): 403-409.
- [6] Gibbs R J, Tshudy D M, Konwar L. Coagulation and transport of sediments in the Gironde Estuary[J]. Sedimentology, 1989, **36**: 987-999.
- [7] Keil R G, Mayer L M, Quay P D. Loss of organic matter from riverine particles in deltas[J]. Geochim Cosmochim Acta, 1997, **61**(7): 1507-1511.
- [8] Bergamaschi B A, Tsamakis E, Keil R G. The effect of grain size and surface area on organic matter, lignin and carbohydrate concentration, and molecular compositions in Peru margin sediments[J]. Geochim Cosmochim Acta, 1997, **61**(6): 1247-1260.
- [9] Adrin B B, Moran S B, Jackson G A. A coupled adsorption-aggregation model of the POC/²³⁴Th ration of marine particles[J]. Deep-Sea Research, 2000, **47**: 103-120.
- [10] Laurent C, Örjan G, Per A, *et al.* Fractionation of surface sediment fines based on a coupled sieve-SPLITT (split flow thin cell) method[J]. Water Research, 2005, **39**: 1935-1945.
- [11] Cauwet G, Mackenzie F T. Carbon inputs and distribution in estuaries of turbid river: the Yang Tze and Yellow Rivers (China) [J]. Marine Chemistry, 1993, **43**: 235-246.
- [12] 张龙军, 张向上, 王晓亮. 黄河口有机碳的时空输运特征及其影响因素的分析[J]. 水科学进展, 2007, **18**(5): 674-682.
- [13] 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.
- [14] Abril G, Nogueira M, Etcheber H, *et al.* Behaviour of Organic Carbon in Nine Contrasting European Estuaries [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2002, **54**: 241-262.
- [15] Thomas S B, Laura A W, Mike S, *et al.* Temporal variability in terrestrially-derived sources of particulate organic carbon in the lower Mississippi River and its upper tributaries [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2007, **71**: 4425-4437.
- [16] 吕保义, 张勇, 邹强. 黄河泥沙中污染物浓度的分析[J]. 内蒙古水利, 2005, **4**: 11-12.
- [17] 陶贞, 高全洲, 姚冠荣, 等. 增江流域河流颗粒有机碳的来源、含量变化及输出通量[J]. 环境科学学报, 2004, **24**(5): 789-795.
- [18] 张龙军, 刘立芳, 张向上. 应用多元线性回归法测定黄河口不同粒径悬浮物中的有机碳含量[J]. 分析化学, 2008, **36**(5): 567-571.
- [19] 文启忠. 中国黄土地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1988. 28.
- [20] 易秀, 李侠. 西北地区土壤资源特征及其开发利用与保护[J]. 地球科学与环境学报, 2004, **26**(4): 85-89.