

# 在三门峡水库影响下黄河有机碳的输送特征

张永领<sup>1</sup>, 董玉龙<sup>2</sup>, 张 东<sup>3</sup>

(1. 河南理工大学应急管理学院, 河南 焦作 454000; 2. 黄河水利委员会 三门峡水文局, 河南 三门峡 472000; 3. 河南理工大学资环学院, 河南 焦作 454000)

**摘要:** 通过在黄河三门峡水文站进行1 a的连续采样分析和调水调沙期间的密集采样分析, 揭示了三门峡水库水沙调控对黄河有机碳输送过程的影响。结果表明, 在水库调水调沙期间, 三门峡站 POC 含量与 TSS 含量同步增加, 而 DOC 含量变化趋势不明显; 在1 a内, DOC 和 POC 含量均有明显的季节变化。三门峡站 POC 年通量为124.8 万 t, 其中调水调沙期间 POC 输送量约占 POC 年通量的38%, 水库敞泄期间(8~9月)的 POC 输送量约占 POC 年通量的60%; 三门峡站 DOC 年通量为7.6 万 t, 其中7~9月 DOC 输送量约占 DOC 年通量的52%。

**关 键 词:** 有机碳; 黄河; 碳通量; 调水调沙

**中图分类号:** X144      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-0690(2015)07-0912-07

河流系统是连接陆地和海洋两大碳库的重要纽带, 是将陆地侵蚀的含碳物质输送到海洋的主要通道, 这种由陆地向海洋的碳运输构成了全球碳循环的一个重要环节<sup>[1]</sup>。早在1974年 E. T. Degens 就开始了河流碳的生物地球化学循环研究。近年来随着全球变暖受到普遍重视<sup>[2-4]</sup>, 碳的循环问题也随之又成为研究的热点<sup>[5,6]</sup>, 而作为全球碳循环重要组成部分的河流碳循环也随之受到关注<sup>[7,8]</sup>。尤其是人类活动对流域地表的干扰程度加剧以及生产、生活中大量废弃物质的随意排放, 使河流碳在通量上和性质上已经发生并且正在发生剧烈变化<sup>[9,10]</sup>。人类活动对流域地表的改变主要体现在土地利用方式的变化上, 如森林草原植被的破坏<sup>[11-13]</sup>、工程设施的修建<sup>[14,15]</sup>、农业耕作方式的改变<sup>[16]</sup>、城市化<sup>[12,17]</sup>等过程, 都记录在河流碳的性质和通量的变化上。人类修筑的大型水库或拦河坝直接改变了自然状态下的河流水文、水力过程, 进而改变了河流悬浮物的“输移-沉积”模式和河流碳的生物地球化学过程<sup>[18,19]</sup>。

黄河是世界上泥沙含量最高的河流, 在过去50 a里黄河径流量和输沙量已经大大降低, 大量泥沙滞留在水库和河道里<sup>[20,21]</sup>。为将沉积在河流系统的泥沙输送到海洋, 从2002年起黄河水利委员会通

过联合调度黄河干流的几个大型水库如小浪底水库、三门峡水库和万家寨水库进行调水调沙, 这个过程必然对黄河有机碳通量及输送过程产生深远的影响。自20世纪80年代以来, 黄河河流碳循环逐渐受到研究者的关注<sup>[22-27]</sup>。目前黄河水沙调控已经深刻改变了有机碳的输送规律, 而我们对大型水库水沙调控影响下的有机碳输送规律仍缺乏全面的认识, 因此亟待深入研究参与黄河“调水调沙”的大型水库对有机碳的输送过程产生的影响, 揭示在大型水库的影响下黄河有机碳的输运特征。

## 1 样品采集分析

随着黄河流域降水量的减少以及工农业用水增加等原因, 黄河水沙输送量明显减小, 淤积日益严重<sup>[20,21,28]</sup>。为了能将淤积在水库和河床的泥沙输送到海洋, 从2002年起通过联合调度黄河中游的万家寨、三门峡和小浪底3座大型骨干水库进行调水调沙, 将沉积在水库里和河床上的泥沙送入大海, 从而减少库区和河床的淤积。

为了研究黄河调水调沙的骨干水库——三门峡水库对有机碳输送的影响, 于2011年11月至2012年10月在三门峡水文站进行每月1次的周期

**收稿日期:** 2014-10-02; **修订日期:** 2015-02-08

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(41001119)资助。

**作者简介:** 张永领(1975-), 男, 山东成武人, 博士, 副教授, 主要从事河流碳循环、灾害应急研究。E-mail: zhyongling@126.com

性采样,并于2012年7月3~8日在三门峡水库调水调沙期间进行每天1~2次的采样。采样地点位于三门峡水文站采样断面中间,用Niskin采水器取水样,采样深度为水面以下1 m。

盛装水样的容器分为两类,一是经过高温(450℃)灼烧的棕色石英玻璃瓶(2 L),在装样品之前先用水样洗涮棕色玻璃瓶3次,装样后滴加适量的饱和 $\text{HgCl}_2$ 溶液;二是用20 L的聚乙烯塑料桶装样,在装样之前,首先用水样洗涮塑料桶3次,装满样品后滴加适量的饱和 $\text{HgCl}_2$ 溶液。对于用棕色玻璃瓶盛装的样品(2 L),用直径为47 mm的Whatman GF/F型玻璃纤维质滤膜(孔径0.7  $\mu\text{m}$ )过滤水样,过滤后将滤液盛装在50 mL的棕色玻璃瓶中用于测试DOC,滤膜在-20℃恒温保存用于测试POC。对于用聚乙烯塑料桶盛装的样品(20 L),用直径150 mm的聚碳酸酯纤维滤膜(孔径0.45  $\mu\text{m}$ )过滤,滤出的颗粒物在50℃下烘干后测定TSS。用美国Tekmar Dohrmann公司生产的Apollo 9000 TOC/TN测定仪测试DOC和POC含量。2011~2012年黄河三门峡水文站水文资料来自黄河水利委员会水文局。

## 2 结果及分析

### 2.1 三门峡水库调水调沙期间的有机碳输送特征

2012年6月18日至7月8日黄河进行调水调沙,为配合这次调水调沙,三门峡水库于2012年7月4~8日进行调水调沙。图1给出了2012年三门峡水库调水调沙期间三门峡站河水流量的变化趋势。在三门峡水库调水调沙期间,三门峡站溶解有机碳(DOC)含量为1.56~2.21 mg/L(图2),其中7月4日8时DOC含量最高,主要是因为7月4日早晨三门峡地区经历了一次强降水过程,降水将地表大量溶解有机碳输送到了河流系统,从而增加了河水DOC含量。

河流总悬浮质(TSS)是POC的载体,TSS含量越多对POC的输送能力就越强。三门峡水库于7月4日加大下泄流量,7月5日8时水库开始大量排沙,到了14~20时三门峡站河流TSS含量持续在200 g/L左右,20时以后,河流TSS含量开始逐渐降低。随着三门峡水文站TSS含量的变化,悬浮颗粒物中有机碳的含量(POC的百分含量)也发生明显变化(图3)。在调水调沙的前期TSS含量小,POC的百分含量较高;随着河流TSS含量的增加,POC的百分含量逐渐降低并趋于稳定,主要是因

为在调水调沙前期河流悬浮颗粒物以细颗粒物质为主,其有机碳含量相对较高<sup>[26]</sup>,随着水库开始排沙,大量颗粒物较粗的泥沙进入水体从而使POC的百分含量降低。

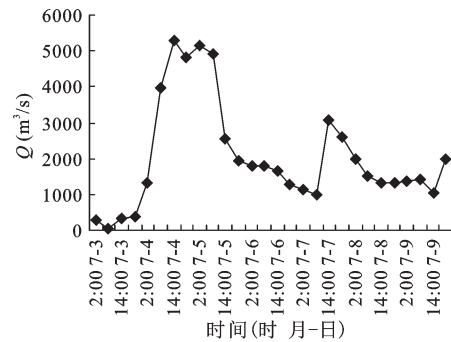


图1 2012年三门峡水库调水调沙期间三门峡站河水流量

Fig.1 Runoff of Sanmenxia Station during the water-sediment regulation of Sanmenxia Reservoir in 2012

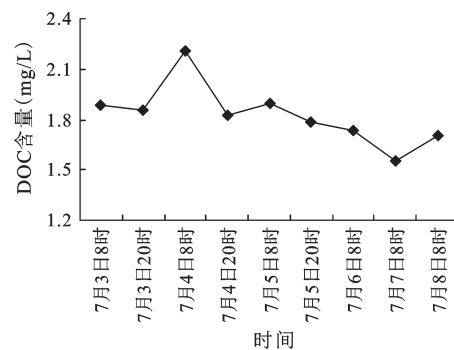


图2 2012年三门峡水库调水调沙期间三门峡站DOC含量

Fig.2 DOC content of Sanmenxia Station during the water-sediment regulation of Sanmenxia Reservoir in 2012

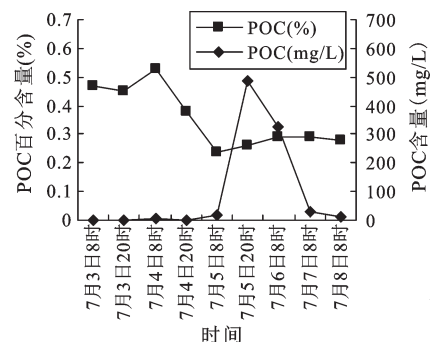


图3 2012年三门峡水库调水调沙期间三门峡站POC的百分含量和POC含量

Fig.3 The POC content and its percent to the total organic carbon in Sanmenxia Station during the water-sediment regulation of Sanmenxia Reservoir in 2012

在三门峡水库调水调沙期间三门峡站 POC 含量为 0.92~507.68 mg/L (图 3)。在调水调沙前期的排水阶段, POC 含量为 0.92~5.85 mg/L; 在后期的排沙阶段, 随着河流 TSS 含量急剧增加, POC 含量也随之急剧增加, 最高达到 507.68 mg/L。对 TSS 和 POC 含量进行相关分析表明, 两者表现出显著的正相关关系 ( $P < 0.05$ )。

## 2.2 三门峡站有机碳含量的季节变化

1) DOC 含量的季节变化。2011 年 11 月至 2012 年 10 月三门峡站 DOC 含量介于 1.73~2.75 mg/L 之间, 平均为 2.10 mg/L, 并有明显的季节变化 (图 4)。冬季的 1~2 月和夏季的 8~9 月 DOC 含量较高, 其它月份 DOC 含量较低。黄河三门峡站 DOC 含量季节性变化与黄河径流量的变化、三门峡水库运行模式等因素有关。11 月以后黄河内蒙古河段开始结冰, 上游来水量逐渐减少, 这时黄河中游地区汇入河流系统的大量的生产和生活污水<sup>[29]</sup>因为上游来水量少得不到有效稀释, 可能是造成了 1~2 月 DOC 含量偏高的主要原因。3~6 月黄河流域降水量偏小, 三门峡水库以蓄水下泄为主, 且下泄流量比较小, 这个时段 DOC 含量变化不大。8~9 月三门峡水库处于敞泄状态, 上游来水经过三门峡水库后直接流向下流。由于黄河流域 8~9 月气温高且降水相对丰沛, 有利于植被的生长以及降水对地表有机质的侵蚀输出, 所以 8~9 月 DOC 含量明显高于春秋季节。

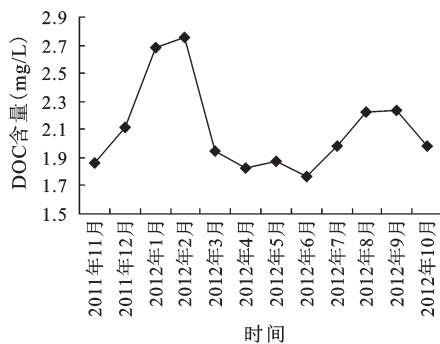


图4 2011年11月至2012年10月三门峡站 DOC 含量

Fig.4 DOC content in Sanmenxia Station from November 2011 to October 2012

2) POC 含量的季节变化。为客观反映三门峡站 POC 含量的季节变化特征, 综合考虑 2012 年 7 月 4~8 日三门峡水库调水调沙期间的 POC 数据。2011 年 11 月至 2012 年 10 月三门峡站 POC 的

百分含量在 0.35%~1.32% 之间 (图 5), 并且有明显的季节性波动。2011 年 12 月至 2012 年 2 月因黄河上游部分河段封冻, 上游的来水量减少对排入黄河的污水的稀释作用减弱, 导致 POC 的百分含量较高。3 月和 7~10 月 POC 的百分含量较低, 主要是因为这几个月河流泥沙含量较高导致了 POC 的百分含量偏低。

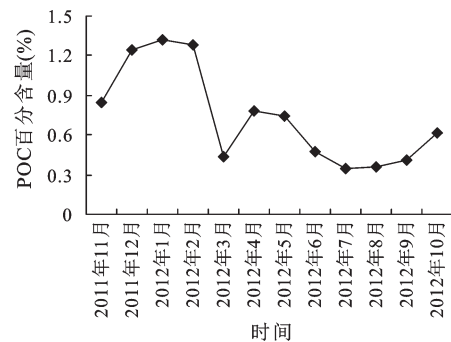


图5 黄河三门峡站的 POC 的百分含量

Fig.5 POC percent of Sanmenxia Station in the Huanghe River

三门峡站汛期的 POC 的百分含量与黄河花园口站 POC 的百分含量<sup>[26]</sup>和黄河利津站 POC 的百分含量<sup>[27]</sup>相一致, 这也表明黄河中下游的河流 TSS 主要来自黄土高原的黄土母质。

2011 年 11 月至 2012 年 10 月三门峡站 POC 含量介于 0.32~118.27 mg/L 之间 (表 1), 平均为 19.57 mg/L。三门峡站 POC 含量有明显的季节性变化, 枯水期 POC 含量较低, 汛期 POC 含量较高, 其中 7 月 POC 含量最高, 为 118.27 mg/L, 主要是因为 7 月初三门峡水库通过调水调沙向下游输送大量的悬浮颗粒物, 大大增加了河流 POC 含量; 8~9 月水库处于敞泄状态, TSS 含量比较高的河水通过三门峡水库直接流向下流, 所以 8~9 月三门峡站 POC 含量也较高。

对 POC 含量和流量进行相关分析表明两者相关性不强 ( $p > 0.05$ ), 其原因可能与黄河水沙异源有关, 同时也与水库调水调沙有关。图 6 给出了三门峡水文站 POC 含量和 TSS 之间的关系, 从图可知, POC 含量随着 TSS 含量的增加而同步增加, 对 POC 含量和 TSS 含量进行相关分析,  $p < 0.01$ , 表明两者具有非常显著的正相关关系。

Ran 等对黄河利津站的 POC 含量进行研究表明<sup>[27]</sup>, 在调水调沙期间利津站平均 POC 含量明显低于三门峡站调水调沙期间的平均 POC 含量; 在



表1 黄河三门峡站的POC含量

Table 1 POC content of Sanmenxia Station in Yellow River

采样时间(月)	2011年		2012年									
	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
POC(mg/L)	0.42	0.38	0.55	0.69	1.85	0.36	0.32	0.48	118.27	55.63	50.86	4.98

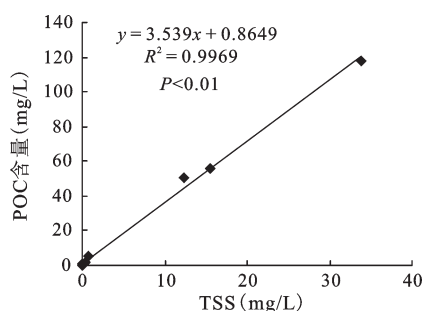


图6 三门峡站POC含量和TSS之间的关系

Fig.6 Relationship between POC and TSS in Sanmenxia Hydrological Station

枯水期的1~5月,利津站POC含量明显高于三门峡站同期的POC含量;而在汛期的8~9月利津站POC含量又明显低于三门峡站同期的POC含量。三门峡站和利津站POC的差异与三门峡水库的影响有关,在枯水期三门峡水库大量拦截泥沙而下泄TSS含量比较低的清水,所以在枯水期三门峡站POC含量较低;利津站位于黄河入海口处,枯水期从小浪底水库排出的TSS含量比较低的河水在向利津站流动的过程中,通过冲刷作用使大量河流沉积物进入水体,从而增加了利津站的POC含量。在黄河调水调沙期间,大量泥沙在短时间内被排出水库,使三门峡站POC含量较高;而利津站POC含量较低是因为在调水调沙期间大量泥沙沉积在河底而降低了利津站的POC含量。8~9月三门峡水库处于敞泄状态,高含TSS的河水通过三门峡水库向下流动的过程中部分沉积在河道中或者被下游的小浪底水库截留,这就导致了8~9月利津站POC含量明显低于三门峡站。

### 2.3 三门峡站河流有机碳的输送通量

对于DOC通量的计算采用分别计算每个月的DOC通量,然后再计算全年DOC通量方法:

$$F_{\text{DOC}} = \sum_{i=1}^{12} C_{\text{DOC}_i} Q_i \quad (1)$$

式中,  $F_{\text{DOC}}$  表示DOC年通量,  $C_{\text{DOC}_i}$  表示第*i*月的DOC含量,  $Q_i$  表示第*i*月的河水流量。

TSS是POC的载体,TSS输送量决定了POC

通量,因此在估算河流POC通量时通常根据POC与TSS之间的关系建立POC通量计算公式<sup>[30]</sup>。三门峡站POC和TSS之间有如下关系:

$$C_{\text{POC}} = 3.3599 C_{\text{TSS}} + 1.0377, R^2 = 0.9797, n = 21 \quad (2)$$

式中,  $C_{\text{POC}}$  表示POC含量,  $C_{\text{TSS}}$  表示TSS含量。

三门峡站POC年通量采用下列公式计算:

$$F_{\text{POC}} = \sum_{i=1}^{12} F_{\text{POC}_i} \quad (3)$$

式中,  $F_{\text{POC}}$  表示POC年通量,  $F_{\text{POC}_i}$  表示第*i*月的POC通量。对于每个月的POC通量( $F_{\text{POC}_i}$ )采用下面的公式计算:

$$F_{\text{POC}_i} = \sum_{j=1}^n (3.3599 C_{\text{TSS}_{ij}} + 1.0377) \times Q_{ij} \quad (4)$$

式中  $F_{\text{POC}_i}$  表示第*i*月的POC通量,  $C_{\text{TSS}_{ij}}$  表示第*i*月第*j*日的TSS含量;  $Q_{ij}$  表示第*i*月第*j*日的河水流量。由于在枯水期三门峡水库以下泄TSS含量比较低的清水为主,三门峡站几乎没有泥沙含量资料,因此在计算POC通量时用该月通过采样实测所得到的TSS含量数据替代每日TSS含量。

根据上述公式分别计算出了三门峡站DOC和POC通量,计算结果列于表2。

表2 三门峡水文站DOC和POC通量(t)

Table 2 DOC and POC flux in Sanmenxia Hydrological Station (t)

时间(年-月)	$F_{\text{DOC}}$	$F_{\text{POC}}$	$F_{\text{DOC}}/F_{\text{POC}}$
2011-11	4437.96	1002.64	4.43
2011-12	4960.81	889.55	5.58
2012-1	3384.84	544.87	6.21
2012-2	4108.45	731.74	5.61
2012-3	4765.78	4518.99	1.05
2012-4	3032.12	433.33	6.99
2012-5	1948.51	333.41	5.84
2012-6	3382.72	923.17	3.66
2012-7	7999.32	478046.19	0.02
2012-8	14307.19	358894.89	0.04
2012-9	16983.56	385803.65	0.04
2012-10	6310.26	15872.73	0.40
全 年	75621.52	1247995.16	0.062

2011年11月至2012年10月三门峡站DOC通量为7.56万t,其中9月DOC通量最多,占全年DOC通量的22.46%;其次是8月,DOC通量占全年DOC通量的18.92%;而在三门峡水库调水调沙的7月,DOC通量仅占全年DOC通量的10.58%。

2011年11月至2012年10月三门峡站POC通量为124.8万t,其中7月最多,占全年POC通量的38.30%,9月和8月次之,POC通量分别占全年POC通量的30.91%和28.76%;7~9月完成了全年POC输送量的97.98%。

在黄河开始进行调水调沙之后(2002年以后),Ran等<sup>[27]</sup>、Zhang等<sup>[26]</sup>和Wang等<sup>[31]</sup>估算黄河DOC年入海通量分别为6、3.2和3.2万t,明显低于三门峡水文站的7.65万t;估算的POC年入海通量分别为41、39和38.9万t,也明显低于三门峡水文站的124.8万t。三门峡站DOC和POC通量明显高于入海通量的主要原因可能是,一方面水沙从三门峡站向下输送的过程中大量泥沙出现了沉积,另一方面是由于黄河下游的工业用水和农业灌溉用水造成了黄河入海流量减小,所以使POC和DOC的输送量减小。

在黄河进行调水调沙之前(在2002年之前),Gan等<sup>[32]</sup>、Cauwet等<sup>[23]</sup>、Zhang等<sup>[22]</sup>分别估算黄河全年DOC通量分别为54、6和20万t;POC年通量分别为35、450和610万t,这和本研究结果以及Ran等<sup>[27]</sup>、Zhang等<sup>[26]</sup>和Wang等<sup>[31]</sup>估算的DOC和POC通量有较大差异,这可能与流量、泥沙含量以及采样时间、采样地点等因素有关。

三门峡站DOC和POC的通量之比有明显的季节性变化,2011年11月至2012年6月, $F_{\text{DOC}}/F_{\text{POC}}$ 大于1(表2),说明三门峡站有机碳的输送以DOC为主。在枯水期三门峡水库拦蓄上游来的泥沙,下泄TSS含量非常低的清水,所以在枯水期三门峡站有机碳的输送以DOC为主,其中在1和4月DOC的输送量是POC的6倍以上。

2012年7~10月DOC和POC的通量之比小于1(表2),说明这4个月三门峡站有机碳的输送以POC为主,其中7月 $F_{\text{DOC}}/F_{\text{POC}}$ 的值最小,仅为0.02;8月和9月次之, $F_{\text{DOC}}/F_{\text{POC}}$ 的值均为0.04,主要是因为7月三门峡水库通过调水调沙将大量泥沙排出水库,8~9月三门峡水库处于敞泄状态,从黄河中游来的泥沙通过三门峡水库直接流向下流,所以这一时段POC的输送占绝对优势。从全年来看,三

门峡站POC输送量远远超过DOC输送量, $F_{\text{DOC}}/F_{\text{POC}}$ 为0.062,表明黄河三门峡站河流有机碳的输送以POC为主。Cauwet等<sup>[23]</sup>、Zhang等<sup>[22]</sup>、Ran等<sup>[27]</sup>、Zhang等<sup>[26]</sup>和Wang等<sup>[31]</sup>分别得出的黄河DOC和POC的输送通量比例为0.013、0.032、0.146、0.082和0.082,和本研究结果比较接近。

## 2.4 三门峡水库对黄河有机碳输送的影响

目前黄河中上游地区建有大、中、小型水库3000多座,这些水库不仅大大改变了黄河水沙输送规律<sup>[20,21,28]</sup>,而且也改变了河流有机碳的输运过程,使POC的输送主要集中在黄河调水调沙期间完成<sup>[26]</sup>。

三门峡水库是黄河上第一个大型水利枢纽工程,控制着黄河89%的水量和近100%的泥沙。目前三门峡水库独特的运行方式即通过枯水期的蓄水拦沙、汛期的调水调沙和敞泄的运行方式对黄河有机碳的输送产生了深刻的影响。① 在枯水季节三门峡水库主要进行蓄水拦沙,大大改变了有机碳的输送结构,使 $F_{\text{DOC}}/F_{\text{POC}}$ 大于1,即在水库的影响下POC被拦截而以DOC输送为主。② 在调水调沙阶段三门峡水库又将拦蓄在水库里的大量泥沙排出水库,使 $F_{\text{DOC}}/F_{\text{POC}}$ 远小于1,即水库通过调水调沙在短时间内又将拦蓄在水库中的大量POC输送到下游。③ 在汛期的8~9月,随着黄河中游的汾河和渭河等黄河主要泥沙来源的支流进入汛期,三门峡水库处于敞泄状态,这时三门峡站有机碳的输送基本未受三门峡水库的影响。

Parks等对美国亚利桑那州“Verde河流-水库”系统进行研究表明<sup>[15]</sup>,约72%的POC被水库截留;Kim等研究也表明<sup>[33]</sup>,河水进入水库后因沉降作用使得超过70%的POC滞留在水库。长江三峡工程是当今世界上最大的水利枢纽工程,自从三峡水库运行以来,POC输送量大幅减小<sup>[34-36]</sup>。另外对三峡水库下游大同站的POC通量研究表明,三峡水库运行后大同站没有出现POC集中输送的现象,如2011年7月大同站POC通量最多,也仅占全年POC通量的19.4%<sup>[34]</sup>。

黄河三门峡水库对河流有机碳输送的影响与其它河流上的水库明显不同,它不仅在枯水期拦蓄了大量POC,而且还在汛期通过调水调沙的方式将拦蓄在水库中的大量POC输送到下游,此外8~9月水库处于敞泄状态,将上游输送过来的有机碳直接输送到下游。

### 3 结 论

1) 在三门峡水库调水调沙期间,三门峡站POC含量随着TSS含量的急剧增加而同步增加,两者呈现出非常显著的相关性;DOC含量却没有明显的变化趋势。在1个水文年内,POC含量有明显季节性变化,7~9月POC含量高其它月份POC含量偏低;DOC含量也有明显季节性变化,1~2月和8~9月DOC含量高,其它月份DOC含量低。

2) 三门峡站DOC年通量为7.56万t,其中9月最多,其次是8月,分别占全年DOC通量的22.46%和18.92%;三门峡站POC年通量为124.8万t,其中7~9月完成了全年POC输送量的97.98%。

3) 在汛期的7~9月三门峡站有机碳的输送以POC为主,在枯水期三门峡站有机碳的输送以DOC为主;从全年来看三门峡站有机碳的输送以POC为主,POC输送量约为DOC的16.5倍。

4) 三门峡水库对流黄河有机碳输送的影响明显不同于其它河流上的水库,它在枯水期大量拦蓄POC,有机碳输送以DOC为主;7月初三门峡水库又通过调水调沙将拦蓄在水库中的POC大量输送到下游,这时POC输送量远大于DOC;8~9月三门峡水库处于敞泄状态,将上游输送过来的有机碳直接输送到下游。

### 参考文献:

- [1] Meybeck M,Vörösmarty C.Global transfer of carbon by rivers[J].Global Change Newsletter,1999,37:18-19.
- [2] 张 翀,李 晶,任志远.基于Hopfield神经网络的中国近40年气候要素时空变化分析[J].地理科学,2011,31(2):211~216.
- [3] 常跟应,黄夫朋,李 曼.中国公众对全球气候变化认知与支持减缓气候变化政策研究——基于全球调查数据和与美国比较视角[J].地理科学,2012,32(2):1481~1487.
- [4] 王炳赞,范广洲,董一平,等.川渝地区气候与物候的变化特征分析[J].地理科学,2011,31(6):674~681.
- [5] 于 洋,陈 才.中国二氧化碳净排放的时空特性分析[J].地理科学,2013,33(10):1173~1179.
- [6] 王立平,张海波,刘 云.基于EBA模型的中国碳排放稳健性影响因素研究[J].地理科学,2014,34(1):47~53.
- [7] 魏秀国,李宁利,沈承德,等.西江水体有机碳含量变化及悬浮物碳同位素的意义[J].地理科学,2011,31(2):166~171.
- [8] 张永领,杨小林,张 东.小浪底水库影响下的黄河花园口站和小浪底站 $pCO_2$ 特征及扩散通量[J].环境科学,2015,36(1):40~48.
- [9] Daniel M H B,Montebelo A A,Bernardes M C,et al.Effects of urban sewage on dissolved oxygen,dissolved inorganic and organic carbon,and electrical conductivity of small streams along a

- gradient of urbanization in the Piracicaba river basin[J].Water, Air,and Soil Pollution,2002,136:189-206.
- [10] Tipping E,Marker A F,Butterwick C.Organic carbon in the Humber River[J].The Science of total environment,1997,195:345-355.
- [11] Moore T R.Dynamics of dissolved organic carbon in forested and disturbed catchments,Westland,Newland, ii Larry River[J]. Water Resource Research,1989,25:1331-1340.
- [12] Meyer J L,Tate C M.The effects of watershed disturbance on dissolved organic carbon dynamics of a stream[J].Ecology,1983,64:33-44.
- [13] Tate C M,Meyer J L.The influence of hydrologic condition and successional state on dissolved organic carbon export from forested watershed[J].Ecology,1983,64(1):25-32.
- [14] Kao S J,Liu K K.Particulate organic carbon export from a subtropical mountainous river (Lanyang Hsi) in Taiwan[J].Limnol. Oceanogr.,1996,41(8):1749-1757.
- [15] Parks S J,Baker L A.Sources and transport of organic carbon in an Arizona river-reservoir system[J].Wat.Res.,1997,31(7):1751-1759.
- [16] Royer T V,David M B.Export of dissolved organic carbon from agricultural stream in Illinois,USA[J].Aquatic Science,2005,67(4):465-471.
- [17] Westerhoff P,Anning D.Concentrations and characteristics of organic carbon in surface water in Arizona:influence of urbanization[J].Journal of Hydrology,2000,236:202-222.
- [18] Bomchul K,Kwangsoon C,Chulwoo K,et al.Effects of the summer monsoon on the distribution and loading of organic in a deep reservoir,Lake Soyang,Korea[J].Water Res.,2000,34(14):3495-3504.
- [19] Ittekkot V,Humborg C,Schäfer P.Hydrological alterations and marine biogeochemistry:a silicate issue?[J].BioScience,2000,50:776-782.
- [20] Wang H J,Yang Z S,Saito Y,et al.Stepwise decreases of the Huanghe (Yellow River) sediment load (1950-2005):Impacts of climate change and human activities,Global Planet[J].Change,2007,57:331-354.
- [21] Dai S B,Yang S L,Li M.The sharp decrease in suspended sediment supply from China's rivers to the sea:anthropogenic and natural causes[J].Hydrolog.Sci. J.,2009,54:135-146.
- [22] Zhang S,Gan W B,Ittekkot V.Organic matter in large turbid rivers:the Huanghe and its estuary[J]. Mar.Chem.,1992,38:53-68.
- [23] Cauwet G,Mackenzie F T.Carbon inputs and distribution in estuaries of turbid river:the Yangtze and Yellow Rivers(China)[J]. Marine Chemistry,1993,43:235-246.
- [24] 邱 爽,刘志媛,肖纯超,等.黄河利津站碳输运年内变化及入海通量估算[J].海洋环境科学,2013,32(4):486~490.
- [25] 刘冬梅,张龙军.黄河干流有机碳的时空分布特征[J].中国海洋大学学报,2010,40(12):105~110.
- [26] Zhang L J,Cai W J,Liu D M,et al.Impact of human activities on organic carbon transport in the Yellow River[J].Biogeosciences,



- 2013, **10**:2513-2524.
- [27] Ran L, Lu X X, Huiguo Sun, et al. Spatial and seasonal variability of organic carbon transport in the Yellow River, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2013, **498**:76-88.
- [28] Wang H, Bi N, Saito Y. Recent changes in sediment delivery by the Huanghe (Yellow River) to the sea: Causes and environmental implications in its estuary[J]. *J. Hydrol.*, 2010, **391**:302-313.
- [29] 蒋廉洁. 黄河流域水污染分析及水环境保护措施[J]. *水资源保护*, 2006, **22**(1):64-67.
- [30] Ludwig W, Probst J L. Predicting the oceanic input of organic carbon by continental erosion[J]. *Global biogeochemical cycle*, 1996, **10**(1):23-41.
- [31] Wang X, Ma H, Li R, et al. Seasonal fluxes and source variation of organic carbon transported by two major Chinese Rivers: The Yellow River and Changjiang (Yangtze) River[J]. *Global Biogeochem. Cycles*, 2012, **26** (2):GB2025.
- [32] Gan W B, Chen H M, Hart Y F. Carbon transport by the Yangtze (at Nanjing) and Huanghe (at Jinan) Rivers, People's Republic of China[M]//Degens E T, S K Soliman H (Eds.). *Transport of Carbon and Minerals in Major World Rivers, Part 2*. Mitt. Geol. Paläontol. Inst. Univ. Hamburg, SCOPE/UNEP Sonderbd., 1983:459-470.
- [33] Kim B, Choi K, Kim C, et al. Distribution and loading of organic carbon in a deep reservoir, Lake Soyang, Korea[J]. *Wat Res*, 2000, **34**(14):3495-3504.
- [34] 王 敏, 张龙军, 桂祖胜. 长江干流有机碳的时空输运特征及三峡工程对其影响[J]. *中国海洋大学学报*, 2011, **41**(1/2): 117~124.
- [35] 许 斐, 杨守业, 展 望, 等. 三峡水库建设对长江下游颗粒有机碳通量及碳同位素组成的影响[J]. *地球化学*, 2011, **40**(2):199~208.
- [36] 林 晶, 吴 莹, 张 经, 等. 长江有机碳通量的季节变化及三峡工程对其影响[J]. *中国环境科学*, 2007, **27**(2):246~249.

## Impacts of the Sanmenxia Reservoir on Organic Carbon Transport Characteristics of the Huanghe River

ZHANG Yong-ling<sup>1</sup>, DONG Yu-long<sup>2</sup>, ZHANG Dong<sup>3</sup>

(1. *Emergency Management School of Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000, China*; 2. *Sanmenxia Hydrological Bureau, YRCC, Sanmenxia, Henan 472000, China*; 3. *Resource and environment school of Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000, China*)

**Abstract:** The Sanmenxia Reservoir, controlling 89% of the water and nearly 100% of the sediment, is an important hydro-junction in the middle reaches of the Huanghe River. By sampling within a complete hydrologic year at the Sanmenxia Station and intensive investigation during water-sediment regulation period, combining with the hydrological data over the same period, impacts of the Sanmenxia Reservoir on organic carbon transport processes was revealed by the operation mode. Water storage, sediment interception (water and sediment regulation), and open discharge were well studied. Results indicated that the particulate organic carbon (POC) rise simultaneously with the sharp increasing of total suspended particle (TSS) contents, whereas the dissolved organic carbon (DOC) content showed no significant change during the water-sediment regulation of the Sanmenxia Reservoir. Over the whole year, DOC content implied significant seasonal change, which was higher in January-February and July-September, lower in other months; POC content showed higher from July-September but lower in the other months. At the Sanmenxia Station, annual POC flux was 1.248 million t, of which POC transport in July accounted for about 38% of the total, and POC during August-September occupied 60% of the total. Annual DOC flux was 76,000 t, the part during July-September was 52% of the annual total. Under the influence of the reservoir, organic carbon transport was dominated by POC during the flood season, while mainly controlled by DOC during the dry season. On the whole year, the organic carbon transport was firstly affected by POC, which was about 16.5 times of DOC. Influence of Sanmenxia Reservoir on organic carbon transport in the Huanghe River was significantly different from other reservoirs, by not only intercepting POC in the dry season, but also discharging a large number of intercepted POC during the flood season. Moreover, organic carbon could transports directly from the upstream to the downstream during discharge period from August to September

**Key words:** organic carbon; Huanghe River; carbon fluxes; water-sediment regulation