

研究报告

黄河中游悬浮物对河流水质影响的初步研究*

郭 怀 成

(北京大学环境中心)

黄河以多泥沙(悬浮物)而著称,其泥沙主要来源于黄土高原上的水土流失,因之可称其为一种面源污染物。多年来,对这种天然污染物的研究,常集中在它对重金属或农药吸附与解吸特性方面,而对其自身性质对河流水质的影响,尚很少涉及。本文在拟建小浪底水库有机污染预测的基础上,针对悬浮物对有机污染可能存在的影响及其与COD、BOD之间的关系以及它对河流氧平衡的影响,做了初步探讨。

一、研究内容和方法

本研究选择黄河中游潼关至三门峡水库坝下间河段。在本段主要设潼关、大禹渡、茅津渡和三门峡坝下等断面进行检测,以探求水体中悬浮物与有机污染物的空间演变状况和规律。

1984年6月至1985年7月间,对本河段进行了三次系统检测。第一次系统检测(1984年6—7月),可代表三门峡水库泄洪汛期,水量和悬浮物含量均较大、水温较高时的水质状况;第二次系统检测(1985年4月),可代表水库蓄水期悬浮物含量和水温均较低时的水质状况;第三次检测(1985年6—7月),可反映汛前期水库泄洪时水量较枯时的水质状况。

在系统检测中,我们选择了 COD_{Cr} (以后简用COD)、BOD₅、DO,同步测定或收

集了水温、悬浮物、泥沙颗粒组成、流量等水文资料。为了进一步探讨悬浮物与耗氧作用和有机污染的关系,还进行了一些室内模拟实验研究。

二、悬浮物与COD的关系

1. 悬浮物、COD的时空变化

从本河段水质系统监测数据可看出,各断面混水的COD值随着悬浮物含量升高而增大,详见表1。在三门峡水库泄洪的汛期,各断面混水的COD值常在100mg/L以上,最高可达400多mg/L。这对目前本段受人为污染影响不大,而水量丰沛的水库水体来说,却是一种特殊现象。但在水库的蓄水期(此期除发电外,一般水库不放水),上游来水蓄于库中,悬浮物沉于库底,在大禹渡与茅津渡断面间形成明显的浊、清水带。随着悬浮物的这一变化,本段水体中COD值也相应由上游向下游锐减。但将各断面混水经过滤后,测定过滤液的COD值,一般均在15mg/L以下,它们与蓄水期茅津渡和三门峡坝下排水的COD值(10mg/L左右)并无明显的差异。由此可见,本段水体中的耗氧有机物质,主要来源于悬浮物。

将3次系统检测数据,分别对各自的悬浮物与COD值作相关分析,得出如下关系

* 孙艺成、张红军参加了部分实验工作。

表 1 黄河中游潼关-三门峡段主要断面水质监测数据*

水文期	断 面	采样时间 (年、月、日)	水温 (°C)	悬浮物 (kg/m ³)	COD (mg/L)		BOD ₅ (mg/L)	DO	
					混水	过滤液		mg/L	%
泄洪汛期	潼关	84.6.29	25.9	12.4	99.6	7.02	1.74	6.97	86.0
	大禹渡	84.6.29	26.0	13.5	130	5.77	3.64	6.91	86.1
	茅津渡	84.6.30	28.5	11.4	140	12.6	4.12	8.39	109
	三门峡	84.6.30	27.9	12.3	154	9.05	3.42	>15	>150
汛前泄洪期	潼关	85.7.10	27.8	2.51	55.6	12.3	0.66	6.30	79.9
	大禹渡	85.7.7	25.0	4.34	58.6	14.0	0.82	6.42	78.3
	茅津渡	85.7.3	27.0	4.58	77.3	15.6	1.60	5.49	68.3
	三门峡	85.7.3	25.9	6.41	96.5	14.5	3.16	6.03	75.0
蓄水期	潼关	85.4.11	14.0	2.90	48.8		1.33	9.87	95.2
	大禹渡	85.4.12	9.8	2.54	45.9		1.77	10.1	87.2
	茅津渡	85.4.13	11.0		10.2		0.85	9.62	86.6
	三门峡	85.4.13	10.8		9.72		1.92	9.97	89.4

* 表中数据均为各断面 2 次采样,每次断面取左、中、右三点平均值。

式:

$$\text{泄洪汛期: } C = 29.2 + 5.75S$$

$$R = 0.9117$$

$$\text{汛前泄洪期: } C = 18.7 + 11.9S$$

$$R = 0.8314$$

$$\text{蓄水期: } C = 6.81 + 16.2S$$

$$R = 0.910$$

式中, C 为 COD 值 (mg/L); S 为悬浮物含量 (kg/m³)。从上述方程式的相关系数 R 可知, COD 值与悬浮物之间存在良好的线性相关关系。

综上所述可以看出,本河段原水中的 COD 值,主要是悬浮物中所含的有机质被氧化造成的。因此,水体中 COD 值的大小,直接与悬浮物的含量及其理化性质有关。

2. 悬浮物的粒径组成

悬浮物的粒径大小可能决定其有机质含量。从文献[1]知道,黄河中游潼关至三门峡水库坝下间河段悬浮物粒径组成中,小于 0.05 mm 的占 90% 左右,主要集中在 0.002—0.05mm 之间,即以细粉砂、粗粉砂为主,小于 0.002 mm 的粘粒亦不多,约占 14% 左右。悬浮物的这种粒级分配与黄土比

较很相近。唯在细粉砂粒级中,悬浮物高于黄土母质。由此可见,本河段中悬浮物来源于黄土高原的土壤侵蚀。

3. 悬浮物中的有机质含量

据测定^[2],本河段悬浮物中的有机质含量在 0.6—1.2% 之间,这一含量虽不算高,但单位水体中悬浮物含量大,使混水的耗氧强度增大,致使 COD 值甚高,对本段水体构成有机污染的潜在威胁。

为了进一步了解有机质在不同粒径悬浮物中的分配情况,我们对同一悬浮物的不同粒径组成的水样,进行了 COD 测定,测定结果如表 2。由此实验可知,在相同的悬浮物含量下,粒径小的 COD 值大;粒径大的 COD 值小,这说明有机质主要存在于细颗粒上,而混水的 COD 值,不仅与悬浮物含量有关,还决定于悬浮物粒径的大小。对 3 次系统检测的所有悬浮物含量和 COD 数据进行回归,其结果两者的相关性较差。悬浮物不同粒径含量与 COD 的关系如图 1,它们之间的相关方程如表 3。由图 1、表 3 可知,各粒径的悬浮物含量与 COD 值具有显著的相关性,其相关系数均在 0.95 以上。

表 2 悬浮物不同粒级水样的 COD 值

样 号	粒 级 (mm)	悬浮物 (kg/m ³)	COD (mg/L)	样 号	粒 级 (mm)	悬浮物 (kg/m ³)	COD (mg/L)
I	<0.005	1.0	21.9	II	<0.005	3.0	49.8
		3.0	47.6			6.0	91.5
		6.0	105.6			9.0	145
		9.0	144.3			12.0	185
		12.0	189.7			15.0	243
		15.0	227.3		0.005~0.01	0.5	4.46
	0.005~0.01	1.0	11.9			2.0	17.1
		3.0	22.3			5.0	29.0
		7.0	43.5			10.0	46.9
		10.0	61.4		0.01~0.05	3.0	16.4
	0.01~0.05	3.0	25.7			5.0	33.5
		5.0	33.5			8.0	56.5
		7.0	44.6			10.0	59.5
		10.0	49.8		>0.05	1.62	63.2
	>0.05	10.9	143				

三、悬浮物与 BOD₅ 的关系

前已述及，本段水体中悬浮物含量与 COD 值密切相关。但从检测资料分析，水中悬浮物含量与 BOD₅ 值之间缺乏明显关系（见表 1）。造成这种现象的原因，是与黄河悬浮物中富含碳酸盐和铁氧化物，干扰了 BOD₅ 的测定有关。

为了探讨水中悬浮物是否会增加水体的生化耗氧，我们选用了潼关断面的悬浮物样品，用黄河原水，配制不同悬浮物含量的水样，在封闭、20℃ 恒温条件下，用搅拌（即使悬浮物悬浮于水中）和不搅拌（即使悬浮物沉于瓶底）两种方式培养 5 天，进行 BOD₅ 的室内模拟实验，得出结果如表 4。

表 4 不同悬浮物含量在搅拌和不搅拌中的 BOD₅ 测定值*

BOD ₅ (mg/L)	悬浮物 (kg/m ³)			
	0	10	20	30
条件				
搅拌	0.37	3.45	7.20	7.65
不搅拌	0.29	2.66	4.44	4.89

* 采用培养后静止沉淀的办法，除去悬浮物对 BOD₅ 测定的干扰。

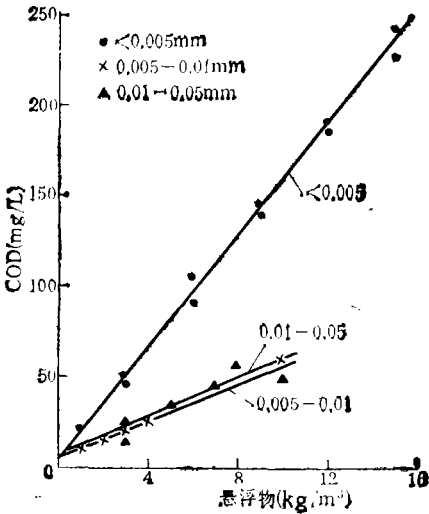


图 1 悬浮物不同粒径含量与 COD 的关系

表 3 悬浮物不同粒级含量 (S) 与 COD (C) 的相关关系

粒 级	回归方程	相关系数
<0.005	$C = 5.11 + 15.32S$	0.9976
0.005~0.01	$C = 5.77 + 4.925S$	0.9733
0.01~0.05	$C = 5.89 + 5.280S$	0.9522

从模拟实验的结果可以看出,在搅拌或不搅拌的条件下,BOD₅值均随悬浮物含量的增加而增大.由此证明,随着水中悬浮物的增加,将加大水中的生化耗氧作用,从而增加有机污染强度.其次,加搅拌处理的实验样品,其各级悬浮物的 BOD₅值,均大于不搅拌的样品(见表4).这可以说明,悬浮于水中的悬浮物,可使水体的耗氧作用加大,以致加重水体的有机污染强度.造成这种现象的原因,主要是悬浮物悬浮于水中,使得水-悬浮物界面大,扩大了微生物降解有机物的活动范围所致^[3].而不搅拌的样品,随着瓶中悬浮物的沉积,瓶底泥沙加厚,底部泥沙中形成了缺氧层,从而降低了微生物的耗氧作用,使 BOD₅值降低,有机污染强度减轻.

四、悬浮物对氧平衡的影响

通过以上对悬浮物与 COD、BOD₅关系的分析,可知在本河段中,随着悬浮物含量的升高,不仅增大了混水的 COD 浓度,增强了水中的耗氧作用,而且最终还影响到河流的氧平衡.

1. DO 时空分布特点

对本河段的系统检测表明,溶解氧在时空分布上具有明显的差异.在泄洪汛期,DO 变化较大,在受水库泄洪影响较小的潼关和大禹渡断面,DO 饱和含量一般在 80—90% 之间,而在受水库泄洪影响很大的茅津渡和三门峡坝下断面,DO 均过饱和,特别是三门峡坝下受水库泄洪影响,曝气作用十分强烈,使 DO 饱和含量高达 150% 以上.此时,由于水库泄洪的再曝气作用,远大于悬浮物对氧平衡的影响,因而看不出悬浮物所起的作用.

在水库蓄水期和汛前泄洪期,本河段各断面 DO 的饱和含量分别在 85—95% 和 80% 以下.因在这两个时期,各断面均未受到水库强烈泄洪的影响,而不出现 DO 过饱和现象.由表 1 可知,在汛前泄洪期,各断面

悬浮物含量虽不高,仅在 2.51—6.41 kg/m³ 之间,但 DO 饱和含量却小于 80%,其值明显地低于蓄水期 DO 的水平.这足以显示本河段悬浮物在河流氧平衡中所起的重要作用.

2. 氧平衡影响的主要因素分析

从河流氧平衡的影响机理上,水温、流量、流速、水深、离子强度、耗氧有机物和悬浮物含量等,都是氧平衡的影响因素.

水温是影响河流溶解氧浓度和有机物分解速度的关键因素.水温的高低常决定着水中 DO 含量和有机物耗氧速度.据黄河龙门站 1936—1965 年的统计资料,多年平均水温为 12.4℃,最高水温出现在 7 月,为 25.2℃,在 6—9 月,月平均水温在 19.5—25.2℃ 间.此期正是黄河汛期,流量、悬浮物含量都大.高水温和悬浮物含量大相配合,加强和增大了悬浮物中有机质的生物降解,使水中耗氧作用增强.故水温是本段氧平衡的重要影响因素.

悬浮物对河流氧平衡的影响,主要表现在两个方面:一是可削弱河流复氧(再曝气)作用强度;一是悬浮物中有机物的耗氧作用.前者是物理过程,后者是生物氧化过程,但两者的结果,都是使河流溶解氧含量减少.据研究,天然河流的再曝气速率,是随着悬浮物浓度的增加而减小,其归因于悬浮物颗粒对湍流流场的动力影响^[4].对富含悬浮物的黄河来说,这种对再曝气强度的削弱作用,更是不容忽视的.另一方面,悬浮物的耗氧作用与其含量和性质有关.实际上,如果在本段河流水温变化不大时,氧平衡就决定于悬浮物在上述作用下,与大气复氧作用的强度对比.

3. 氧平衡机制模式

通过对本河段氧平衡影响的机理分析,为了定量描述水体中 DO 的变化规律,我们选择潼关断面(因该断面受水库泄洪影响很小)所有系统检测数据(表 5),建立该断面氧

平衡影响的机制模式, $y = 13.19 - 0.0462x_1 - 0.2036x_2 - 0.00394x_3$, 其中, y 为溶解氧 (mg/L); x_1, x_2, x_3 分别为悬浮物 (kg/m³), 水温(°C)和 COD 值 (mg/L).

表 5 黄河中游潼关断面水质检测数据

序 号	悬浮物 (kg/m ³)	水温 (°C)	COD (mg/L)	DO (mg/L)
1	10.1	25.2	94.3	7.03
2	14.4	25.6	100	7.03
3	11.5	26.8	103.0	6.92
4	13.9	25.7	105.7	6.90
5	12.7	28.2	126.5	6.58
6	14.6	27.3	105.7	6.52
7	10.3	26.3	105.3	6.72
8	14.0	26.7	106.4	6.58
9	2.54	14.0	47.0	9.92
10	3.28	14.3	50.6	10.1
11	2.73	27.8	49.2	7.23
12	3.50	27.8	39.4	7.28
13	4.83	27.3	51.5	7.12
14	3.40	27.5	43.0	7.30
15	11.1	26.2	94.3	7.03
16	12.9	25.5	99.6	6.88
17	14.0	26.6	100.0	6.80
18	2.89	14.2	58.3	10.0
19	3.47	27.8	47.0	7.11
20	5.50	28.2	55.7	7.30

表 6 DO 模型计算值与实测值比较

序 号	DO 实测值 (mg/L)	DO 计算值 (mg/L)	相对误差 (%)
15	7.03	6.97	0.83
16	6.88	7.00	1.90
17	6.80	6.73	0.98
18	10.0	9.94	0.64
19	7.11	7.18	1.0
20	7.30	6.97	4.5
平均相对误差			1.6

该回归方程的复相关系数 $R = 0.9932$, 表明 DO 与悬浮物、水温和 COD 之间具有很好的相关关系。为检验模型的精度, 用 6 组数据(表 5 中 15—20)代入模型, 再将计算值与实测值进行比较(表 6)。由表 6 可知, 6 组数据的相对误差在 0.64—4.5% 之间, 平

均为 1.6%。这说明, 用悬浮物、水温和 COD 可以较好地刻划潼关断面 DO 的变化规律。

五、初步结论

1. 黄河中游潼关—三门峡段水中悬浮物与 COD 值呈正相关。悬浮物中有机质主要存在粒径 $< 0.005\text{mm}$ 的粘粒上, 表明有机质在悬浮物中的含量, 将随着 $< 0.005\text{mm}$ 粘粒的增加而增多。

2. 本河段水体中悬浮物的耗氧作用, 将随其含量的增高而增强。可以推断, 在本河段出现悬浮物较高含量 ($> 10^2 \text{kg/m}^3$) 时, 将对河流氧平衡构成潜在威胁。

3. 目前对黄河水体的 BOD₅ 测定, 其值不能反映水中生化耗氧的实际状况。因在 BOD₅ 的培养中, 悬浮物皆很快沉于瓶底, 由此得出的 BOD₅ 值, 与悬浮于水中的悬浮物的实际耗氧量相比, 两者相差很大。故建议对黄河富含悬浮物河段的水样监测, 应在 BOD₅ 的培养和测定方法上加以改进。

4. 悬浮物对河流水质的危害, 最终主要反映在它对氧平衡的影响上。通过对氧平衡影响机制的分析, 选用多变量线性模型结构, 可以较好地刻划富含悬浮物的水体中溶解氧的变化规律。

致谢: 关伯仁教授、徐云麟副教授对本文给以指导和审阅, 在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] 刘东生等著, 黄河中游黄土, 182 页, 科学出版社, 1965 年。
- [2] 金相灿, 中国环境科学, 3(4), 10(1983)。
- [3] Gunnison, D., Chen, R. L. and Brannon, J. M., *Water Research*, 17(11), 1609(1983)。
- [4] Alonso, C. V. McHenry, J. R. and Hong, J. C. S., *Water Research*, 9(8), 695(1975)。