

紊流消能与泥沙制紊分析*

陈晓宏¹, 胡荣轩²

(1. 中山大学地理系, 广东 广州 510275; 2. 武汉大学水利电力学院, 武汉 430072)

摘要: 在一次洪水过程中, 各时点含沙量随水流紊动及摩阻比降而正变, 紊流消能规律占主导; 而对于一个洪水过程整体, 间歇性的泥沙与水流的滑脱影响积累起来, 显示出泥沙制紊作用。在河流多次洪水记录中, 取洪水期平均流量大致相等的几次洪水相比较, 可看出泥沙制紊作用并与试验室水槽内多次稳定流实验结果一致: 洪水期平均含沙量较大的洪水, 其加权平均流速较大, 而加权平均摩阻比降较小。反之亦然。文中用大量实际资料对紊流消能和泥沙制紊进行了论证。

关键词: 紊流消能; 泥沙制紊

中图分类号: P338.45 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2001) 05-0113-05

1 概述

紊动消能与泥沙制紊二者似乎是矛盾的, 但又都是客观存在的。作者共分析了黄河、长江、汉江、渭河共6个河段的200多次洪水记录, 分别计算了摩阻比降 S_f 、流速 V 、含沙量 ρ 、流量 Q 、水面比降 $\frac{\partial H}{\partial X}$ 及各洪水要素的加权平均值 $\bar{S}_f$ 、 $\bar{V}$ 、 $\bar{\rho}$ 、 $\bar{Q}$ 、 $\bar{\frac{\partial H}{\partial X}}$ 等, 以此为基础分析水流的紊流消能及泥沙制紊特性。其中长江、黄河、汉江的洪水过程一般在15~20 d, 取日平均序列以便于列表计算。渭河洪水过程只有4~5 d, 由汛期水文要素摘录表取6 h一个点次的序列进行计算分析。一次洪水过程单点时的摩阻比降 S_f 、流速 V 及含沙量 ρ 关系显示出紊流消能特性; 而一个洪水过程整体各洪水要素的加权平均值 $\bar{S}_f$ 、 $\bar{V}$ 及 $\bar{\rho}$ 的关系则显示出泥沙制紊特性。

2 紊流消能

如表1为黄河涿口站1977年7月洪水记录, 以艾山、利津为上、下比降断面, 用简化能量方程逐时段计算摩阻比降 S_f ^[1], 可以看出: 涨水期, 流速 V 及含沙量 ρ 大, S_f 也大; 落水期 V 、 ρ 小, S_f 也小, S_f 与 V 、 ρ 呈滞时绳套形正相关关系(如图1)。这一关系表明, 流速的增加对应于摩阻比降增加, 动能大部分耗于克服河床阻力及维持泥沙的悬浮与运动, 起到紊流消能作用。

作者共分析200余次洪水都显示了紊流消能特征。

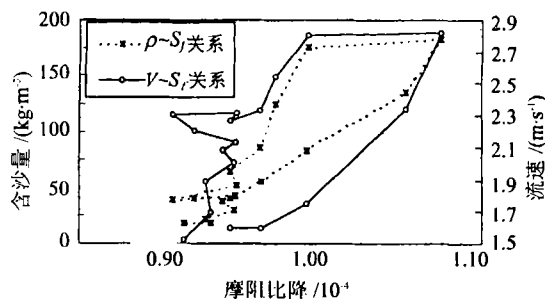


图1 黄河涿口站1977年7月洪水 $V \sim S_f$ 及 $\rho \sim S_f$ 关系线

Fig.1 Relations of resistance slope S_f with velocity V and S_f sediment content respectively.
Flood July, 1977 at Lekou, Yellow River

3 泥沙制紊的机制

关于泥沙制紊, 首先由范诺尼据水槽中试验结果得出, 即当流量 Q 为常数时, 浑水流速大于清水流速(泥沙制止紊动耗能, 使平均流速加大)。我国南京水工试验所的试验结果表明, 阻力系数 f 与含沙量呈负相关关系, 含沙量大则阻力系数小。黄河下游测站的糙率系数 n 也与含沙量呈负相关关系^[2]。但阻力系数 $f = \frac{8g}{V^2} RS_f$, 糙率系数 $n = \frac{1}{V} R^{2/3} S_f^{1/2}$, 当其他条件相同时, ρ

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (49971019)

收稿日期: 2000-12-21; 作者简介: 陈晓宏 (1963-), 男, 教授, 博士生导师。

表 1 黄河冻口 1977 年 7 月洪水 S_f 计算Tab.1 Calculations of S_f (Flood July, 1977 at Lekou, Yellow River)

月.日	艾山水 位 $H_{\text{上}}$ m	冻口水 位 $H_{\text{中}}$ m	利津水 位 $H_{\text{下}}$ m	冻口流 量 Q ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	含沙量 ρ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	水面落 差 F m	水位涨 差 $H_{\text{上}}$ m	$(\frac{\partial H}{\partial X})$ 10^{-4}	平均流 速 V ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	$(\frac{1}{V} \frac{\partial H}{\partial \tau})$ 10^{-4}	$\frac{S_f}{10^{-4}}$	QV	QS_f	$Q \frac{\partial H}{\partial X}$
7.5~7.6	38.05	27.20	11.26	975	15.385	26.795	-0.08	0.9502	1.60	-0.0058	0.9444	1560	920.8	926.4
7.6~7.7	38.15	23	24	995	15.377	905	0.13	0.9541	1.60	0.0094	0.9635	1592	958.7	949.3
7.7~7.8	49	47	27	1210	26.364	27.220	0.36	0.9652	1.60	0.0261	0.9913	1936	1199.5	1167.9
7.8~7.9	39.29	28.15	44	1900	40.553	845	0.99	0.9874	1.75	0.0655	1.0529	3325	2000.5	1876.1
7.9~7.10	40.34	29.38	12.08	3640	55.769	28.265	1.47	1.0023	2.345	0.0725	1.0748	8535.8	3912.3	3648.4
7.10~7.11	81	30.15	13.02	5010	83.034	27.890	0.08	0.9890	2.82	0.0033	0.9923	14128.2	4971.4	4954.9
7.11~7.12	79	16	29	5135	135.248	151	-0.07	0.9754	2.805	-0.0029	0.9725	14403.7	4993.8	5008.7
7.12~7.13	62	15	30	4860	182.716	320	-0.14	0.9688	2.545	-0.0064	0.9624	12368.7	4677.3	4708.4
7.13~7.14	25	29.81	15	4325	175.260	095	-0.34	0.9608	2.33	-0.0169	0.9439	10077.3	4082.4	4155.5
7.14~7.15	39.93	55	12.93	3830	124.282	26.995	-0.18	0.9573	2.265	-0.0092	0.9481	8675	3631.2	3666.5
7.15~7.16	43	18	74	3175	85.354	685	-0.76	0.9463	2.315	-0.0380	0.9083	7350	2883.9	3004.5
7.16~7.17	14	28.49	42	2405	65.073	615	-0.43	0.9438	2.31	-0.0216	0.9222	5555.6	2217.9	2269.8
7.17~7.18	38.94	26	18	2090	51.818	755	-0.03	0.9488	2.205	-0.0016	0.9472	4608.5	1979.6	1983.0
7.18~7.19	82	17	10	1985	39.748	720	-0.15	0.9475	2.135	-0.0081	0.9394	4238	1864.7	1880.8
7.19~7.20	71	10	13	1895	40.026	685	0.01	0.9463	2.18	0.0006	0.9469	3944.6	1719.0	1793.2
7.20~7.21	57	27.97	11.95	1745	43.009	615	-0.26	0.9438	2.01	-0.0150	0.9288	3507.5	1620.8	1646.9
7.21~7.22	38	78	87	1515	38.218	505	-0.12	0.9399	1.89	-0.0074	0.9325	2863.4	1412.7	1423.9
7.22~7.23	18	57	77	1213	29.761	405	-0.31	0.9363	1.695	-0.0212	0.9151	2056	1110	1135.4
7.23~7.24	16	37	66	946	21.882	405	-0.08	0.9363	1.525	-0.0061	0.9320	1442.7	880	885.7
7.24~7.25	13	30	59	884	17.986	440	-0.07	0.9376	1.49	-0.0054	0.9323	1317.2	824.1	828.8
加权平均				2368	89.899			0.9627	2.282		0.9639			

与 f 或 n 的负相关,无异于 ρ 与 V 的正相关关系。而 ρ 与 V 的正相关关系不管是在表 1 的洪水过程中还是在水槽试验结果中,都无例外。应该用摩阻比降与含沙量相关,含沙量大则摩阻比降小才能说明泥沙制紊。关于泥沙制紊的机制,目前尚无确切的理论描述。以下从理论和实测数据方面对此进行分析。

3.1 勃朗特和冯·卡尔曼的掺长理论^[3]

$$\text{拽力(drag)} = \bar{\tau}(\mu + \eta) \frac{dV}{dy} = \rho_w L^2 \left(\frac{dV}{dy} \right)^2,$$

式中, L 为掺长, ρ_w 为水的密度(ρ_w 与含沙量 ρ 不同,此式的 ρ_w 近于 1.0), $\frac{dV}{dy}$ 为流速沿水深的变化率, μ 为分子滞性系数, η 为涡体滞性系数($\eta \gg \mu$)。由此式可看出:掺长 L 大则拽力大,而 $\bar{\tau}$ 大则含沙量大。故掺长的大小反映含沙量的大小。

3.2 沙滞后于水

水是泥沙的载体,但二者并不完全同步,而是有时发生滑脱现象,故沙滞后于水。泥沙滑脱滞后对水流起到明显的干扰、阻碍及拖后作用,使掺长变小,拽力 $\bar{\tau}$ 也相应减小,涡体紊动也随之减弱了。这就是泥沙制紊的机制。

取长江寸滩—宜昌 14 次大洪水的水峰、沙峰传播时间对照(取大洪水是为了降低区间来水、来沙的影响,重庆至宜昌河段长 658 km,洪峰传播时间较长,可降低实测水峰、沙峰发生时间不准确的影响),都是沙峰传播时间比水峰传播时间长,即沙滞后于水。表 2 为黄河艾山—利津的水、沙峰传播时间对照。由于黄河洪水涨落不定,一天涨落数次,水、沙峰及发生时间不易准确确定,故表 2 中都是用的日平均值。这 24 次洪水中,有 16 次是沙峰传播时间长些。不过由于最大日平均值与最大 24 h 平均值有时不一致,故有 8 次洪水的水、沙峰传播时间相同。总之实际情况是沙滞后于水,泥沙对水流起了阻碍作用或制紊作用。表 2 中水、沙传播时间 T_Q 、 T_P 以 1 d 为单位。

4 泥沙制紊实例

范诺尼的试验结果是在水槽中稳定流的条件得出的。前已指出,非稳定流的时均值可以组成一个稳定系列。作者对长江、黄河、汉江、渭河共六个河段,200 余次洪水作了类似于表 1 的计算及每次洪水的洪水期 $\bar{Q}$ 、 $\bar{\rho}$ 、 $\bar{V}$ 、 $\bar{S}_f$ 的加权平均值,以讨 ρ 与 $\bar{S}_f$ 及 $\bar{V}$ 与 $\bar{S}_f$ 的关系。

4.1 长江万县站

以忠县、奉节为上、下比降断面,共分析了 39 次洪水,把其中 $\bar{Q}$ (洪水期平均流量) 在 20 000 ~ 30 000 m^3/s 之间这一级别的点子绘成 $\bar{\rho} \sim \bar{S}_f$ 关系线及 $\bar{\rho} \sim \bar{V}$ 关系线(如图 2,图中点旁数字为洪号). 可以看出: $\bar{\rho} \sim \bar{S}_f$ 为负相关, $\bar{\rho}$ 大则 $\bar{S}_f$ 小(泥沙降低摩阻或制紊);大则大,与范诺尼试验结果一致. 证实了泥沙制紊特性.

4.2 渭河华县站

把渭河华县站实测平均流量 $\bar{Q}$ 相近的二次洪水的加权平均值 $\bar{\rho}$ 、 $\bar{V}$ 、 $\bar{S}_f$ 进行两两对比如表 3.

44 次洪水中,符合 $\bar{\rho}$ 大则 $\bar{V}$ 大者 23 次,符合 $\bar{\rho}$ 大则 $\bar{S}_f$ 小者 20 次. 此外对黄河冻口高村及长江新厂各次洪水的统计结果,均与华县相似,均可看出泥沙制紊作用.

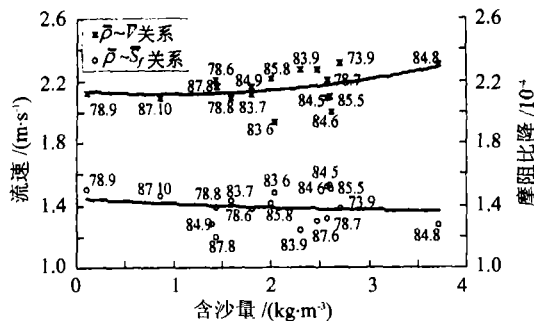


图 2 长江万县历次洪水平均值 $\bar{\rho} \sim \bar{S}_f$ 及 $\bar{\rho} \sim \bar{V}$ 关系

Fig.2 Relations of mean sediment contents $\bar{\rho}$ with mean resistance slope $\bar{S}_f$ and mean velocity respectively $\bar{V}$ in floods at Wanxian, the Yangtze River

表 2 黄河艾山—利津水、沙传播时间对照

Tab.2 Comparison of time of travel for water and sediments from Aishan to Lijin, the Yellow River

洪号	艾山站峰值及日期				利津站峰值及日期				传播时间/d	
	年.月	$Q_{m上}$	月.日	$\rho_{m上}$	月.日	$Q_{m上}$	月.日	$\rho_{m上}$	月.日	T_Q T_P
1966.8	4361	8.21	120	8.22	4210	8.21	103	8.24	0	2
1966.9	3560	9.8	81.5	9.8	3450	9.9	75.6	9.9	1	1
1966.9	4830	9.21	56.6	9.20	4710	9.21	54.9	9.23	0	3
1970.8	3940	8.8	92.9	8.8	3790	8.10	79.7	8.10	2	2
1970.8	3000	8.14	138	8.14	2930	8.15	112	8.15	1	1
1970.9	5510	9.3	125	9.5	5610	9.4	106	9.7	1	2
1970.9	4250	10.1	81.3	9.30	4100	10.2	67.6	10.1	1	1
1973.9	3680	9.4	207	9.5	3460	9.5	205	9.7	1	2
1975.8	3900	8.3	84.1	8.3	3590	8.4	73.9	8.5	1	2
1977.7	5380	7.12	199	7.12	5010	7.13	181	7.14	1	2
1977.8	4200	8.10	190	8.10	3920	8.11	181	8.12	1	2
1977.8	2250	8.25	74	8.26	2370	8.26	69.6	8.27	1	1
1978.7	2980	7.18	89.4	7.20	2750	7.19	79.4	7.23	1	3
1978.7	2650	7.9	57.0	7.9	2440	7.10	54.1	7.11	1	2
1978.7	3100	7.27	115	7.28	3020	7.28	104	7.29	1	1
1978.8	3040	8.12	99.7	8.12	2640	8.13	87.1	8.13	1	1
1978.9	2360	9.5	88.1	9.5	2350	9.7	82.7	9.9	2	4
1983.8	5570	8.5	37.7	8.4	5220	8.6	37.0	8.6	1	2
1984.8	5780	8.8	61.9	8.9	5480	8.9	62.2	8.11	1	2
1984.9	3820	9.1	47.6	9.2	3550	9.2	44.6	9.4	1	2
1984.9	5200	9.13	53.5	9.11	5000	9.13	45.4	9.13	0	2
1988.7	2740	7.13	60.4	7.11	2710	7.14	50.1	7.13	1	2
1988.7	2830	7.25	75.9	7.24	2670	7.26	69.4	7.25	1	1
1988.8	5690	8.19	124	8.16	5220	8.20	122	8.17	1	1

表3 渭河华县站历次洪水的 $\bar{Q}$ 、 $\bar{V}$ 、 $\bar{S}_f$ 及河床冲淤对照Tab.3 Comparison of $\bar{Q}$ (mean discharge), $\bar{V}$, $\bar{S}_f$ and erosion and deposition of the river bed for floods at Huaxian, Wei River

洪号 年.月	$\bar{Q}$	$\bar{\rho}$	$\bar{V}$	$\bar{S}_f$	冲淤	洪号 年.月	$\bar{Q}$	$\bar{\rho}$	$\bar{V}$	$\bar{S}_f$	冲淤
1977.8	64.5	110.8	0.746	1.9406	淤	1978.9	701	44.12	1.702	2.0619	淤
1981.6	41.1	377.0	0.785	2.3450	冲	1970.8	708	211.7	1.358	1.9789	冲
1973.7	201	411.5	1.239	2.0599	淤	1981.7	684	64.66	1.513	2.0694	淤
1977.8	205	560.1	1.469	1.9240	冲	1983.9	524	56.80	1.043	2.3364	淤
1974.7	199	471.4	1.237	2.2085	冲	1987.6	538	14.18	1.459	2.1840	淤
1981.4	193	4.026	0.804	2.2811	淤	1984.8	435	46.25	1.016	2.2924	冲
1977.9	153	90.84	0.968	1.9850	淤	1978.7	759	65.63	1.687	1.8418	淤
1977.7	174	161.4	0.926	2.5401	冲	1970.8	708	211.7	1.358	1.9789	冲
1985.7	146	84.26	0.722	2.3888	淤	1970.9	1051	31.24	1.223	2.1322	淤
1975.7	406	277.6	0.940	2.3388	冲	1974.9	810	29.23	1.294	2.1004	淤
1979.9	417	21.49	1.323	1.9343	淤	1970.7	820	319.5	1.612	1.9237	冲
1979.7	395	331.5	1.472	2.0051	冲	1973.10	599	22.93	1.347	2.5180	冲
1982.7	408	106.7	1.240	2.2990	冲	1985.10	703	14.30	1.232	2.3064	淤
1978.9	417	21.49	1.323	1.9343	淤	1986.7	878	39.56	1.750	2.1940	淤
1984.8	435	467.5	1.016	2.2924	冲	1984.7	901	121.7	1.210	2.3116	冲
1973.9	544	39.22	1.144	2.6623	淤	1970.9	1051	31.24	1.223	2.1332	淤
1975.7	509	16.41	1.025	2.4299	冲	1977.7	941	372.0	1.391	2.4182	冲
1980.9	577	16.11	1.384	2.2619	淤	1984.7	1155	25.58	1.102	2.2669	淤
1980.8	504	124.4	1.780	2.2674	淤	1973.8	1209	342.3	1.357	2.1242	冲
1984.8	435	467.5	1.016	2.2924	冲	1983.9	1775	19.34	1.451	2.2630	淤
1983.6	503	19.06	1.025	2.3647	淤	1983.10	1575	12.60	1.263	2.2443	淤
1975.7	406	277.6	0.940	2.3388	冲	1984.9	1365	31.25	1.471	2.2798	冲

5 含沙量与河床冲淤的关系

作者分析了各河段 200 余次洪水,得出含沙量与河床冲淤成正比关系.如表 3 渭河华县站凡 $\bar{Q}$ 相近的洪水, $\bar{\rho}$ 大者河床冲刷, $\bar{\rho}$ 小者河床淤积,很少例外.这一现象并不是渭河(高含沙水流)所独有,黄河涿口、高村也是如此.长江荆江河段的新厂站,其上、下游均有分流,且受洞庭湖洪水顶托,故 $\bar{\rho}$ 大则 $\bar{V}$ 大, $\bar{\rho}$ 大则 $\bar{S}_f$ 小的规律不明显;但大则冲,小则淤,也很少例外.对此可作如下解释:当悬移质粒径与床沙质粒径相近时,悬移质对河床的磨蚀作用大,(两个糙度相同的层面之间的摩擦力最大).其次按泥沙制紊原理, $\bar{\rho}$ 大则 $\bar{V}$ 大, $\bar{V}$ 大则河床冲刷,故含沙量大则河床冲刷.

6 结 论

(1)上述计算中上、下比降断面间的距离用的是固定值,高水位时,水流取直线,水位落差值偏小;低水位时,水流蜿蜒曲折,水位落差偏大.所以

大洪水的水面比降 $\frac{\partial H}{\partial X}$ 偏小,小洪水的 $\frac{\partial H}{\partial X}$ 偏大. $\bar{S}_f$ 也是这样.所以对比洪水期的加权平均值, $\bar{\rho}$, $\bar{V}$ 及 $\bar{S}_f$ 时,应该对比 $\bar{Q}$ 大致相近的洪水.表 3 中的 $\bar{V} \sim \bar{\rho}$ 关系较好(正相关很少例外),而 $\bar{S}_f$ 与 $\bar{\rho}$ 的关系差一些(负相关者仅仅过半),正是由于 $\frac{\partial H}{\partial X}$ 及 $\bar{S}_f$ 的观测值不够精确所致.此外洪水过程线的形状(尖瘦或平坦)也有影响.

(2)在一次洪水过程中,各时点含沙量 ρ_t 随 S_f 而正变,紊流消能规律占主导,然则何以看不出泥沙制紊作用?这是因为泥沙与水流的滑脱现象是间歇性的,如果每一瞬间连续滑脱,则水流不成其为泥沙的载体了.只有在整个洪水过程中,间歇的滑脱影响积累起来,才能显示出泥沙制紊作用.所以表 3 的统计值 $\bar{Q}$, $\bar{V}$, $\bar{\rho}$ 及 $\bar{S}_f$ 都用整个洪水期的加权平均值.

(3)掺长是一种抽象的尺度,可以是水平方向的,也可以是垂直方向的.水平方向的可以用

ΔV_i 或 $\frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial \tau}$ 代表, 垂直方向的可以用 ΔH_i (水位涨差) 或 $\frac{1}{V} \frac{\partial H}{\partial \tau}$ 代替. 所以表 1 及所有洪水过程中: $\rho \sim \Delta H$ 及 $\rho \sim \Delta V$ 都是正相关绳套曲线. 说明 ΔH 、 ΔH 都是紊流消能的主要指标.

(4) 在一次洪水过程中, ρ 与 V 为正相关, 各次洪水过程的加权平均值 $\bar{\rho}$ 与 V 也是正相关. $\bar{V}$ 大则河床冲刷, $\bar{V}$ 小则淤积, 都很少例外. 所以范诺尼的试验也可以说明洪水过程中的紊流消能作用及含沙量与河床冲淤的关系.

(5) 水面比降 $\frac{\partial H}{\partial X}$ 及 $\bar{S}_f$ 受水位变化时上下比降断面间距离变化的影响, 而一个测站的水位涨率 $\frac{\partial H}{\partial \tau}$ 及 $\frac{1}{V} \frac{\partial H}{\partial \tau}$ 不受其他影响. 故在所分析的 200

多次洪水中, $\rho \sim \Delta H$ 都是很好的正相关绳套曲线. 所以含沙量与水位的关系最密切, 以至于可以用水位过程预报含沙量过程^[4].

参考文献:

- [1] 胡荣轩. 河道非平稳流的内摩阻损失[J]. 水文, 1998 (4): 6-12.
- [2] 武汉水利电力学院. 河流泥沙工程学(上册)[M]. 北京: 水利出版社, 1982. 137-138.
- [3] HENDERSON F M. Open channel flow[M]. New York: The Macmillan Book Co. 1966. 243-244.
- [4] 胡荣轩. 由洪水水位过程预报含沙量过程[J]. 泥沙研究, 1987(4): 80-86.

Analysis on Energy Dissipation by Turbulence and Turbulence Prevention by Sediments

CHEN Xiao-hong¹, HU Rong-xuan²

(1. Department of Geography, Zhongshan University, Guangzhou 510275, China;

2. Institute of Hydraulic & Electric Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: The flood process is analyzed in totality and in time steps respectively. It was found that at each time step the hydrological elements of a flood process, such as sediment contents, turbulent velocity and resistance slope, vary in direct proportion with each other, which shows that energy dissipation by turbulence is dominant. While for the whole flood process the turbulence prevention by sediments appears to be a controlling factor due to the accumulative effect of intermittent slipping of sediments from flow. Comparing those flood processes with similar discharges in the long-term flood records, the phenomenon of sediments preventing turbulence is also found. The features is found to be in accordance with the results of steady flow in laboratory flume, i. e., for the flood with larger sediment contents in flood season, its weighted mean velocity is also larger but its weighted mean resistant slope is smaller. In this paper, both features of energy dissipation by turbulence and turbulence prevention by sediments are demonstrated by measured data in Yangtze River and Yellow River.

Keywords: energy dissipation by turbulence; turbulence prevention by sediments