

# 风水两相作用对黄河支流悬移质粒度特征的影响及其意义\*

许炯心

中国科学院地理科学与资源研究所, 陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101

**提要** 以黄河中游 29 条支流、40 个站点的资料为基础, 研究了风水两相作用对黄河支流悬移质粒度特征的影响。研究表明, 悬沙中 $>0.05\text{ mm}$  的粗颗粒组分百分比随年降水量的增大而减小, 随年沙尘暴日数的增大而增大; 悬沙中 $<0.01\text{ mm}$  细颗粒组分的百分比随年降水量的增大而增大, 随年沙尘暴日数的增大而减小; 悬沙中值粒径  $D_{50}$  随年降水量的增大而减小, 随年沙尘暴日数的增大而增大。建立了悬沙中 $>0.05\text{ mm}$  的粗颗粒组分百分比和悬沙中 $<0.01\text{ mm}$  细颗粒组分百分比与年均沙尘暴日数  $t_{ss}$  和年均降水量  $P_m$  之间的回归方程。分析结果表明,  $t_{ss}$  和  $P_m$  的变化对于悬沙中 $>0.05\text{ mm}$  的粗颗粒组分百分比变化的相对贡献率分别为 70.4% 和 29.6%, 对于悬沙中 $<0.01\text{ mm}$  细颗粒组分百分比变化的相对贡献率分别为 91.1% 和 8.9%, 对于  $D_{50}$  变化的相对贡献率分别为 93.1% 和 6.9%。提出以年均降水量  $P_m$  与年均沙尘暴日数  $t_{ss}$  之比作为风水两相作用指标。资料分析表明, 悬沙中 $>0.05\text{ mm}$  的粗颗粒组分百分比( $r_{>0.05\text{ mm}}$ )随风水两相作用指标( $P_m/t_{ss}$ )的增大而减小, 悬沙中 $<0.01\text{ mm}$  的细颗粒组分百分比( $r_{<0.01\text{ mm}}$ )随风水两相作用指标的增大而增大。在不同的河流之间, 随着风水两相作用指标的变化, 粗细颗粒之间表现出不同的搭配关系, 这种搭配关系的变化对高含沙水流的形成有一定的影响, 导致悬移质含沙量出现峰值。

**关键词** 悬移质泥沙粒度 泥沙输移 风水两相作用 黄河

黄河泥沙问题具有丰富的内涵, 包括泥沙的数量的质量两方面。泥沙质量指泥沙的粒度组成、粗泥沙与细泥沙的相对比例、泥沙的矿物组成和泥沙中所包含的化学物质如营养元素与污染物等。对于黄河泥沙的质量问题, 前人已进行了长期的研究, 有大量成果问世, 如提出了对下游河道淤积影响最大的粗泥沙和“害沙”的概念<sup>[1,2]</sup>、查明了黄河中游多沙粗沙区的分布范围<sup>[1,3,4]</sup>、粗泥沙的来源<sup>[1-4]</sup>, 发现了黄河中游支流悬移质粒度与含沙量、流量间的复杂关系<sup>[5]</sup>。在黄河中游高含沙水流的研究中, 也分析了泥沙的粒度组成对高含沙水流的影响, 并提出了有利于高含沙水流形成的“最优”粒度组成

的概念<sup>[6]</sup>。

黄河中游多沙粗沙区, 特别是陕北的诸支流如窟野河、无定河、孤山川等, 位于风力-水力交互作用占优势的风沙-黄土转换带。这一地区也恰恰是输入黄河的泥沙较粗、高含沙水流极为发育的地区。前人的工作大多集中于研究水力作用如暴雨径流等对泥沙特征的影响, 除杨根生<sup>[7]</sup>、许炯心<sup>[8]</sup>等曾对风沙的作用进行过研究外, 风水两相作用对黄河泥沙粒度特征的影响方面的系统研究, 尚有待于进行。对此进行深入分析, 将有助于从多营力地貌过程的崭新视角, 更深刻地认识黄河泥沙粒度组成的形成机理, 为黄河治理提供理论依据。

2004-08-09 收稿, 2005-03-11 收修改稿

\* 国家自然科学基金(批准号: 40271019)、国家自然科学基金委员会和水利部黄河水利委员会联合资助重点项目(批准号: 50239080)资助

E-mail: xjh@igsnrr.ac.cn

三方数据

## 1 研究区概况、资料来源与研究方法

本研究涉及到黄河的29条支流、40个站点，主要位于中游河口镇至龙门区间，包括了所有进行过系统的悬移质泥沙测验的支流(图1)。研究区位于风沙-黄土转换带，即从干旱区荒漠(沙漠)向半干旱区和半湿润区的过渡带。从西北向东南，年降水量由200 mm增加至600 mm，年均大风日数由40 d减少到10 d以下，沙尘暴日数由25 d减少到5 d以下。研究区的地表组成物质除受地质条件控制外，

与风力作用有密切联系，从西北向东南，依次由风成沙变成沙黄土、典型黄土和粘黄土。在风沙区与沙黄土区之间，还分布着盖沙黄土过渡区，即沙黄土以上覆盖着不连续的、呈斑块状分布的风成沙。作为黄河泥沙特别是粗泥沙主要来源区的多沙粗沙区即位于本区。按1954—1995年间资料的统计，黄河三门峡站大于0.05 mm粗泥沙的来量为每年 $24519 \times 10^4$  t，而来自风沙-黄土过渡区的窟野河、无定河、黄甫川、孤山川4条河的年粗泥沙量即达 $12928 \times 10^4$  t<sup>[2]</sup>，占全河的52.7%。

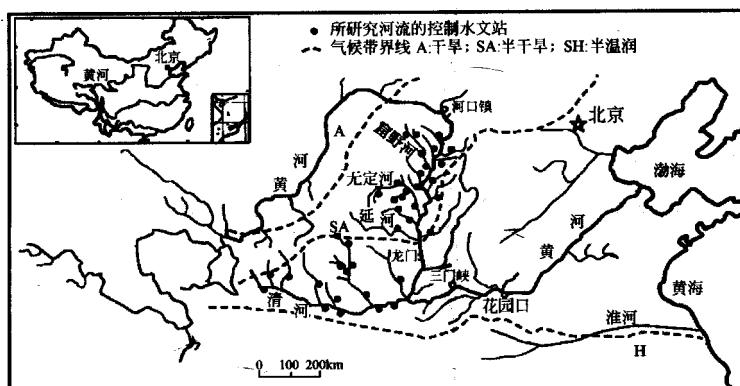


图1 研究区位置图

这一地区存在着特殊的风力、水力两相作用。就同一地点而言，风力作用和水力作用在时间上互相交替，即冬季、春季以风力作用为主，夏季进入雨季和汛期以后，则以水力作用为主。在地域上，由于风力作用从西北向东南减弱，而年降水量从西北向东南增强，故两者的搭配关系表现出一定的地域差异，西北部风力作用在风水两相作用中居于主导地位，而东南部水力作用在风水两相作用中居于主导地位。在宏观上，我们以年平均降水量( $P_m$ )来表征水力作用，而以年平均沙尘暴日数( $t_{ss}$ )和年平均大风日数( $t_w$ )来表示风力作用。风沙的输移不仅取决于风力强度，也取决于地表状况，特别是地表是否具有疏松易蚀的沙物质。只有前者而无后者时，常常不能形成风沙的输移。而频繁发生的沙尘暴，则意味着上述两个条件均存在，故本文中以年均沙尘暴日数来表示风力作用的强度及其后果。

在研究区中，黄河水利委员会和有关各省布

设了密度较大的水文站和雨量站，各县则设有气象站，其中有大风和沙尘暴的观测项目。本文中所使用的年降水和年沙尘暴的资料，均来自上述雨量站和气象站，资料时段为1950—1985年。各流域的多年平均降水量和多年平均沙尘暴日数，是在上述资料的基础上求得的，年降水量采用了按面积加权平均的方法，沙尘暴日数则采用算术平均的方法。本文所涉及到的悬移质泥沙输沙量、输沙模数、含沙量及悬沙粒度资料，均来自流域有关支流水文站，包括中值粒径 $D_{50}$ ，大于0.05 mm百分比( $r_{>0.05\text{ mm}}$ )、小于0.01 mm百分比( $r_{<0.01\text{ mm}}$ )以及多年平均含沙量( $C_{\text{mean}}$ )、多年平均年最大含沙量( $C_{\text{max}}$ )和有观测记录以来的断面平均最大含沙量( $C_{\text{max,s}}$ )。水文资料的时段为1950—1970年。这一时段中，人类水土保持活动尚未大规模开展，故人类活动对河流水沙过程的影响相对较小。

如前所述，在研究区中，从西北向东南，年平

均降水量逐渐增大而年平均沙尘暴日数逐渐减少，故两者之间存在着一定的负相关关系（图2），即年降水量小的地方，沙尘暴发生频率高，反之亦然。为了用一个单一而简便的指标来表示风力水力作用的组合类型，我们引进风水两相作用指标 $R_{ws}$ ，用某一地点年降水量 $P_m$ 与年均沙尘暴日数 $t_{ss}$ 之比 $P_m/t_{ss}$ 来表示。

在以下各节中，我们将以上述各项指标和资料为基础，运用相关分析方法，揭示风力水力两相作用与黄河支流悬沙粒度特性之间的内在联系。

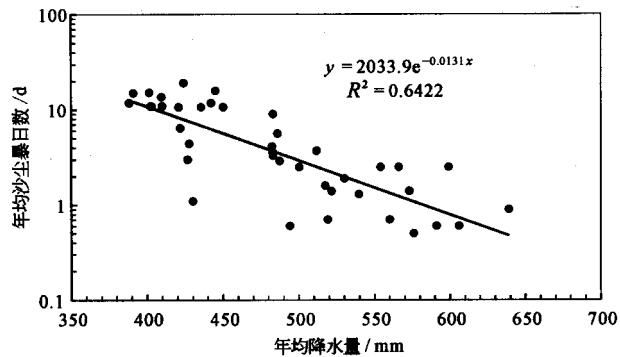


图2 年平均降水量与年平均沙尘暴日数的关系  
按各流域多年平均值点绘，流域控制站点位置见图1

## 2 悬沙粒度特征与年均降水量、年沙尘暴日数的关系

### 2.1 相关关系

研究区的资料共涉及到29条河流、40个站点，包括了黄河上中游所有有悬沙粒度观测资料的河流。图3中分别点绘了悬沙 $r_{>0.05\text{ mm}}$ 、 $r_{<0.01\text{ mm}}$ 和悬沙 $D_{50}$ 与年降水量、年沙尘暴日数之间的关系。图中并给出了回归方程、回归直线和相关系数的平方 $R^2$ 。对相关系数进行了检验，结果表明，显著性概率 $<0.01$ ，相关关系是高度显著的。

从图3(a)中可以看到，悬沙中 $r_{>0.05\text{ mm}}$ 随年降水量的增大而减小，随年沙尘暴日数的增大而增大。图3(b)中可以看到，悬沙中 $r_{<0.01\text{ mm}}$ 随年降水量的增大而增大，随年沙尘暴日数的增大而减小。图3(c)则显示，在整体上说，悬沙 $D_{50}$ 随年降水量的增大而减小，随年沙尘暴日数的增大而增大。

万方数据

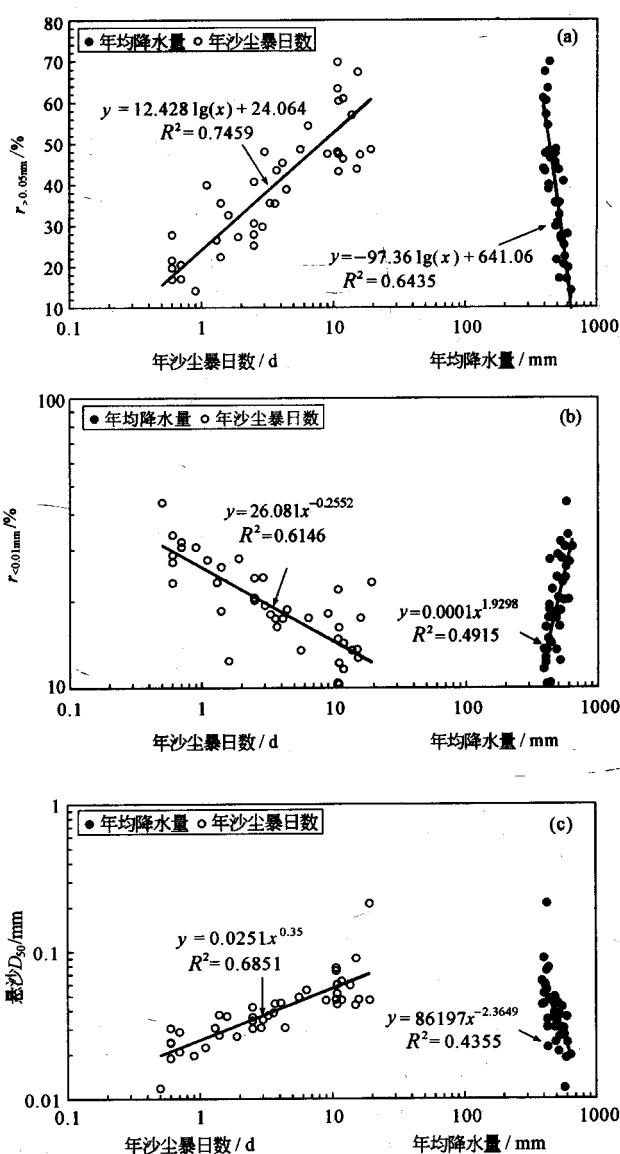


图3 悬沙粒度特征与年均降水量、年沙尘暴日数之间的关系(悬沙粒度系1950—1970年平均值)

(a)  $r_{>0.05\text{ mm}}$ 与年均降水量、年沙尘暴日数之间的关系；

(b)  $r_{<0.01\text{ mm}}$ 与年均降水量、年沙尘暴日数之间的关系；

(c) 悬沙 $D_{50}$ 与年均降水量、年沙尘暴日数之间的关系

### 2.2 机理解释

在所研究地区即黄河风沙-黄土转换带，存在着一种特殊的风力-水力两相作用，由此导致了风力-水力两相侵蚀产沙过程<sup>[8]</sup>，即在时间上交替发生的风力侵蚀和水力侵蚀以及与这种侵蚀过程相联系的泥沙输移过程。本区冬季、春季盛行以西北风为主

导风向的偏北风，大风使地表疏松物质受到强烈侵蚀，并将侵蚀产物吹扬到空中，形成沙尘暴。大风侵蚀和搬运的近地面风沙受沟道、河道、河谷的拦截，一部分可以堆积在沟道中、坡面上、河道中、河漫滩上。由于冬春为枯水季节，沟道和较小的支流干涸无水，河道中的流量亦很小，故绝大部分风沙堆积在上述部位，形成粗颗粒泥沙的“存贮”。从6、7月份进入汛期以后，暴雨径流进入沟道和河道，可以使前期存贮在那里的风成沙受到侵蚀而“释放”，向下游搬运，成为悬移质泥沙的一部分。由于大部分径流来自黄土坡面，含有一定的细粒黄土物质，形成了高含沙水流的“液相”，其容重高于清水，可以更有效地使粗颗粒泥沙悬浮于其中而向下搬运。

很显然，上述“接力式”的侵蚀搬运机制可以为图3中的变化图形提供解释。风力作用较强的地区，沙尘暴发生的频率较高，在冬季和春季有较多的粗颗粒泥沙进入沟道、河道，并在随后而来的汛期洪水中被搬运，成为悬沙中的一部分。这使得悬沙中 $r_{>0.05\text{ mm}}$ 较高。由于沙尘暴是一种与干旱气候相联系的天气现象，其频率与年降水量呈负相关（图1）。在年降水量较大的地区，沙尘暴发生频率低，因而进入沟道、河道中的粗颗粒风成沙也较少，故悬沙中粗颗粒粒径组分的百分比较低。因此，便形成了悬沙中 $r_{>0.05\text{ mm}}$ 与沙尘暴日数的正相关和与年降水量的负相关。

就一般情形而言，所研究地区黄河支流悬沙中的细颗粒成分绝大部分来自黄土，是黄土地区的暴雨和暴雨径流对黄土物质进行侵蚀的产物。在沙尘暴频发的地区，年降水量较小，且流域中风成沙的覆盖面积较大而黄土覆盖面积相对较小，因而细颗粒泥沙的供应条件和侵蚀动力都受到一定的限制。在年降水量大的地区，暴雨和径流使黄土物质受到侵蚀，河流可以得到大量细颗粒泥沙的供应。由此形成了悬沙中 $r_{<0.01\text{ mm}}$ 与年降水量的正相关和与年沙尘暴日数的负相关。

同时，图3中相关图形的形成，还与研究区地表物质的地域分异和由此形成的泥沙供应条件分异有关。如前所述，从西北到东南，地表物质的主导类型依次为风成沙、沙盖黄土、沙黄土、典型黄土和粘黄土，按上述顺序，其粒度组成依次变细。按

同一方向，年降水增多，沙尘暴日数减少。因此，研究区的黄土物质的中值粒径表现出随年降水的增大而减小、随沙尘暴日数的增多而增大的趋势（图4）。这样，在年降水量大而沙尘暴频率小的流域，河流泥沙的来源主要为粒度较细的典型黄土和粘黄土，故悬沙粒度较细；而在年降水相对较小而沙尘暴频率较高的流域，河流泥沙的来源主要为粒度较粗的沙黄土，故粒度较粗。

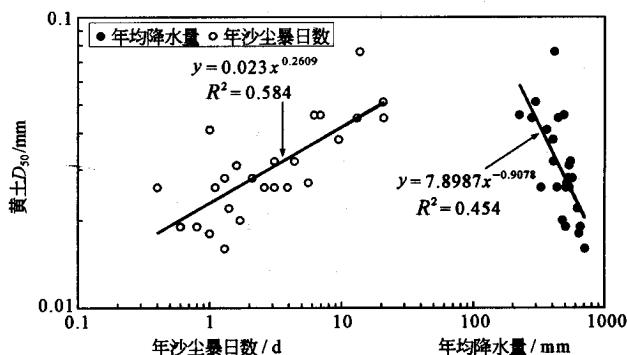


图4 黄土物质的中值粒径与年均降水量和年均沙尘暴日数的关系

### 2.3 多元回归分析

为了定量评价以沙尘暴日数表达的风力作用和以年降水量表达的水力作用对悬沙粒度特性影响的相对大小，我们采用了多元回归的方法。所依据的资料来自黄河的29条支流、40个站点，系多年平均值。表1中列出了悬沙中 $>0.05\text{ mm}$ 百分比 $r_{>0.05\text{ mm}}$ ，悬沙中 $<0.01\text{ mm}$ 百分比 $r_{<0.01\text{ mm}}$ ，悬沙中值粒径 $D_{50}$ 与年降水量 $P_m$ ，年沙尘暴日数 $t_{ss}$ 之间的相关系数矩阵。分别建立了 $r_{>0.05\text{ mm}}$ ， $r_{<0.01\text{ mm}}$ ， $D_{50}$ 与 $t_{ss}$ 和 $P_m$ 之间的二元回归方程式。由于各变量的绝对大小不同，不能从 $t_{ss}$ 和 $P_m$ 的回归系数的大小来直接判断它们对 $r_{>0.05\text{ mm}}$ ， $r_{<0.01\text{ mm}}$ 和 $D_{50}$ 变化的相对贡献率，我们对各变量进行了标准化处理，将它们的数值均换算至0和1之间，然后重新进行了回归方程中回归系数的计算，并设定常数项为0。所得到的方程和复相关系数 $R$ 、 $F$ 值、显著性概率 $p$ 以及剩余标准差见表2。从 $F$ 值与显著性概率 $p$ 可以看到，各方程的回归效果是高度显著的。

表 1  $r_{>0.05\text{ mm}}$ ,  $r_{<0.01\text{ mm}}$ ,  $D_{50}$  与  $P_m$ ,  $t_{ss}$  之间的相关系数矩阵

$\lg r_{>0.05\text{ mm}}$	$\lg r_{<0.01\text{ mm}}$	$\lg t_{ss}$	$\lg P_m$
$\lg r_{>0.05\text{ mm}}$	1.00	-0.87	0.87
$\lg r_{<0.01\text{ mm}}$	-0.87	1.00	-0.84
$\lg D_{50}$	0.87	-0.84	1.00
$\lg P_m$	-0.80	0.70	-0.81
			1.00

表 2 回归分析结果<sup>a)</sup>

名称	样本数	复相关系数 $R$	显著性概率 $p$	F 值	剩余标准差	$t_{ss}$ 贡献率 /%	$P_m$ 贡献率 /%
$r_{>0.05\text{ mm}}$ 与 $t_{ss}$ , $P_m$ 关系(a)	40	0.883	$6.63 \times 10^{-13}$	65.732	0.2426	70.4	29.6
$r_{<0.01\text{ mm}}$ 与 $t_{ss}$ , $P_m$ 关系(b)	40	0.837	$1.96 \times 10^{-10}$	43.437	0.2156	90.1	8.9
$D_{50}$ 与 $t_{ss}$ , $P_m$ 关系(c)	40	0.847	$6.74 \times 10^{-11}$	41.11	0.2727	93.1	6.9

a) 回归方程和数据标准化后的方程分别为: (a)  $r_{>0.05\text{ mm}} = 11027t_{ss}^{0.2912}P_m^{-0.9875}$  和  $r_{>0.05\text{ mm}} = t_{ss}^{0.6480}P_m^{-0.2733}$ ; (b)  $r_{<0.01\text{ mm}} = 7.244t_{ss}^{-0.2655}P_m^{0.2079}$  和  $r_{<0.01\text{ mm}} = t_{ss}^{-0.7753}P_m^{0.07554}$ ; (c)  $D_{50} = 0.005475t_{ss}^{0.4011}P_m^{0.2366}$  和  $D_{50} = t_{ss}^{0.8997}P_m^{0.06602}$

根据以上所得到的回归分析结果, 可以区分年降水及沙尘暴对悬沙粒度特征变化的相对贡献率。从表 1 可以看到,  $r_{>0.05\text{ mm}}$ ,  $r_{<0.01\text{ mm}}$  和  $D_{50}$  与  $t_{ss}$  的相关系数均高于与  $P_m$  的相关系数, 说明悬沙粒度特征值与沙尘暴关系的密切程度要高于它们与年降水关系的密切程度。

标准化后回归方程中各变量的回归系数大小可用来反映各个影响因子变量对因变量变化的贡献率的大小。从表 2 中可以看到, 对于  $r_{>0.05\text{ mm}}$  而言,  $t_{ss}$  的回归系数为 0.653,  $P_m$  的回归系数为 0.275, 两者贡献之比为 0.653: 0.270。若令总贡献率为 100%, 则可以计算出, 沙尘暴日数  $t_{ss}$  和年降水  $P_m$  对  $r_{>0.05\text{ mm}}$  的贡献率分别为 70.4% 和 29.6%。同理可求得对于  $r_{<0.01\text{ mm}}$  而言,  $t_{ss}$  和  $P_m$  的相对贡献率分别为 91.1% 和 8.9%; 对于  $D_{50}$  而言,  $t_{ss}$  和  $P_m$  的相对贡献率分别为 93.1% 和 6.9%。

由此可知, 沙尘暴日数变化对悬沙粒度特征变化的影响要高于年降水变化的影响。这是由于, 从不同的时间尺度上看, 沙尘暴对悬沙粒度的形成均有影响。从现代过程的意义上说, 在风沙-黄土转换带, 沙尘暴和风力作用向河道提供了粗粒泥沙来源。悬沙中大于 0.05 mm 的粗泥沙组分, 除一部分来自黄土外, 其余部分与风沙作用有密切关系。如果以悬沙中  $r > 0.05\text{ mm}$  百分比减去黄土中  $r > 0.05\text{ mm}$  百分比来表示黄土以外的粗沙来源, 则相关分析的结果显示, 这部分来源与沙尘暴日数有较密切的关系(图 5)。图 5 中点子虽较分散, 但对相关系

数进行检验的结果表明, 显著性概率仍小于 0.05。

从历史过程来说, 黄土高原地表的黄土物质是一种风尘沉积, 与风力作用有密切关系, 可以认为是历史时期中沙尘暴作用的结果。沙尘暴强度大、频率高的地点, 地表物质粗, 反之亦然。由于黄土高原现今气候带的格局由来已久, 现代气候格局与古代不乏相似之处, 故在宏观地域的空间尺度上, 可以与现代沙尘暴风尘沉积的地域分异相联系, 从而通过对地表物质组成区域分异的控制, 来影响各支流泥沙的来量及其粒度特征。

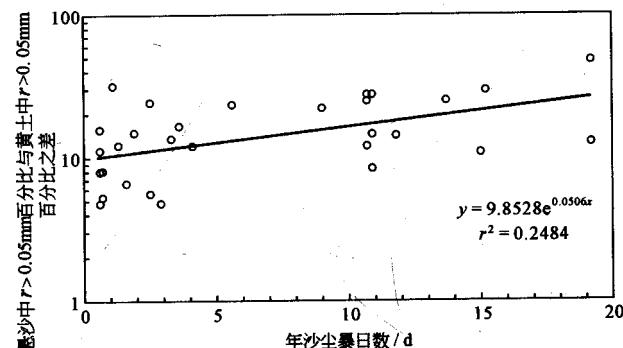


图 5 悬沙中  $r > 0.05\text{ mm}$  百分比与黄土中  $r > 0.05\text{ mm}$  百分比之差与沙尘暴日数的关系

由于沙尘暴对悬沙的粒度特别是  $r > 0.05\text{ mm}$  百分比有较大的影响, 通过对沙尘暴的治理将有可能减少入黄粗泥沙的数量。

### 3 风水两相作用对粗细泥沙组分搭配的影响

黄土高原河流高含沙水流十分发育。高含沙水

流是一种固体-液体两相流，液相中细粒泥沙含量较高，固相则是悬浮在液相中的粗颗粒泥沙。许炯心发现，存在着一种最优的粗颗粒泥沙和细颗粒泥沙的搭配关系，使得高含沙水流的含沙量达到最大<sup>[6]</sup>。因此，研究这一地区挟沙水流中粗细泥沙组分的搭配关系及其与风水两相作用的关系，有助于更好地理解黄土高原地区河流泥沙的形成与输移，是黄河治理中需要深化的问题。

以所研究河流的资料为基础，我们在图6中分别点绘了悬沙中大于0.05 mm百分比 $r_{>0.05\text{mm}}$ 、小于0.01 mm百分比 $r_{<0.01\text{mm}}$ 与风水两相作用指标即年降水量与年沙尘暴日数之比 $P_m/t_{ss}$ 的关系。可以看到， $r_{>0.05\text{mm}}$ 随 $P_m/t_{ss}$ 的增大而减小， $r_{<0.01\text{mm}}$ 随 $P_m/t_{ss}$ 的增大而增大。图中分别给出了回归方程，回归直线和相关系数的平方。对相关系数进行检验后表明，两者的显著性概率皆小于0.001。从图中可以看到，随着风水两相作用指标的变化， $r_{>0.05\text{mm}}$ 和 $r_{<0.01\text{mm}}$ 之间表现出不同的搭配关系，这种搭配关系对高含沙水流的形成有一定的影响。

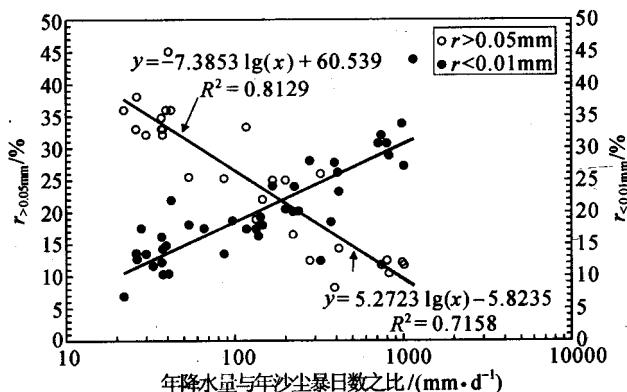


图6 悬沙中 $r_{>0.05}$ 百分比、 $r_{<0.01}$ 百分比与风水两相作用指标即年降水量与年沙尘暴日数之比的关系

我们用悬沙中大于0.05 mm百分比与小于0.01 mm百分比之比 $r_{>0.05\text{mm}}/r_{<0.01\text{mm}}$ 来表示粗细泥沙的搭配关系，称为粗细颗粒搭配指标，并在图7中点绘了多年平均悬移质含沙量 $C_{mean}$ 、多年平均年最大含沙量 $C_{max}$ 与 $r_{>0.05\text{mm}}/r_{<0.01\text{mm}}$ 之间的关系。可以看到，随着 $r_{>0.05\text{mm}}/r_{<0.01\text{mm}}$ 的增大， $C_{mean}$ 和 $C_{max}$ 也增大，到达峰值。此后，随着 $r_{>0.05\text{mm}}/r_{<0.01\text{mm}}$

继续增大， $C_{mean}$ 和 $C_{max}$ 则有所减小。这从另一种角度反映出，存在着一种最优的粗细泥沙的搭配关系，使得悬移质泥沙的含沙量达到最大。图7(a)中和图7(b)中峰值处的 $r_{>0.05\text{mm}}/r_{<0.01\text{mm}}$ 略有不同，大致均在2.0—3.0之间。

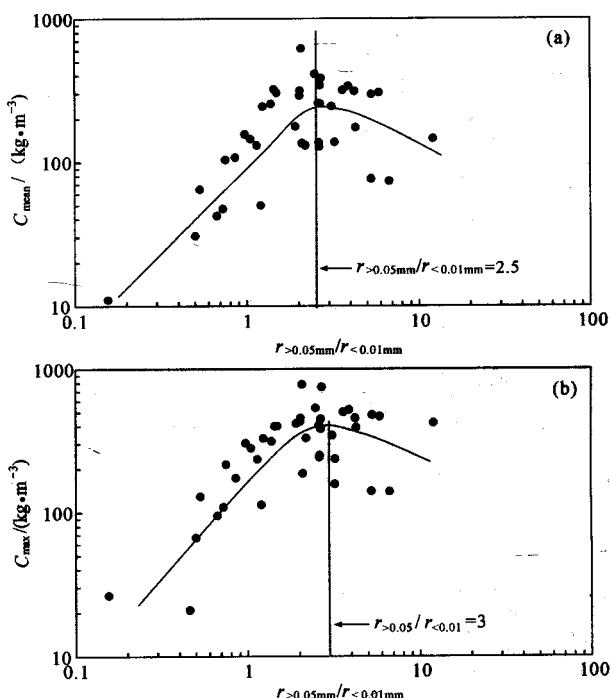


图7 多年平均悬移质含沙量 $C_{mean}$ ，多年平均年最大含沙量 $C_{max}$ 与 $r_{>0.05\text{mm}}/r_{<0.01\text{mm}}$ 之间的关系  
(a)  $C_{mean}$ 与 $r_{>0.05\text{mm}}/r_{<0.01\text{mm}}$ 的关系；  
(b)  $C_{max}$ 与 $r_{>0.05\text{mm}}/r_{<0.01\text{mm}}$ 之间的关系

为了确定在风力-水力作用的何种搭配关系之下，可以出现上述粗细泥沙的最优搭配关系，我们在图8中点绘了粗细泥沙搭配指标 $r_{>0.05\text{mm}}/r_{<0.01\text{mm}}$ 与水力风力作用搭配指标 $P_m/t_{ss}$ 之间的关系。两者之间表现出十分显著的负相关，说明年降水量较小而沙尘暴日数较多的流域， $r_{>0.05\text{mm}}/r_{<0.01\text{mm}}$ 的数值较大，即悬沙中粗颗粒较多而细颗粒相对较少。图8中给出了回归方程： $r_{>0.05\text{mm}}/r_{<0.01\text{mm}} = 39.736(P_m/t_{ss})^{-0.6175}$ ，相关系数的平方 $R^2 = 0.7885$ 。由此式可以求得，当 $r_{>0.05\text{mm}}/r_{<0.01\text{mm}}$ 分别为2.0和3.0时， $P_m/t_{ss}$ 分别为65.63和126.55。此时，有利于出现粗细颗粒在悬沙中的最优搭配，从而导致 $C_{mean}$ 和 $C_{max}$ 的峰值。

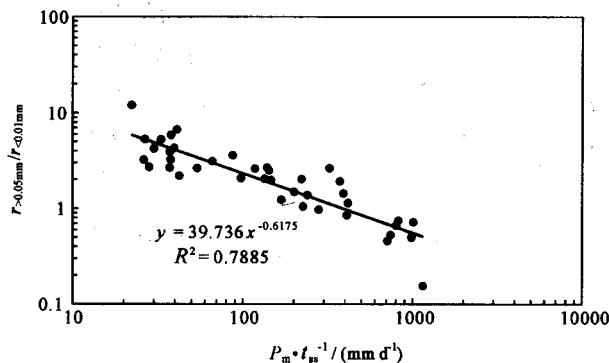


图8 粗细泥沙搭配指标  $r_{>0.05 \text{ mm}} / r_{<0.01 \text{ mm}}$  与水力风力作用搭配指标  $P_m \cdot t_{ss}^{-1}$  之间的关系

#### 4 结论

(1) 悬沙中大于 0.05 mm 的粗颗粒组分百分比随年降水量的增大而减小, 随年沙尘暴日数的增大而增大。悬沙中小于 0.01 mm 细颗粒组分的百分比随年降水量的增大而增大, 随年沙尘暴日数的增大而减小。在整体上说, 悬沙中值粒径  $D_{50}$  随年降水量的增大而减小, 随年沙尘暴日数的增大而增大。

(2) 建立了悬沙中大于 0.05 mm 的粗颗粒组分百分比和悬沙中小于 0.01 mm 细颗粒组分的百分比与年均沙尘暴日数和年均降水量之间的回归方程。分析结果表明,  $t_{ss}$  和  $P_m$  的变化对于悬沙中大于 0.05 mm 的粗颗粒组分百分比变化的相对贡献率分别为 70.4% 和 29.6%, 对于悬沙中小于 0.01 mm 细颗粒组分的百分比变化的贡献率分别为 91.1% 和 8.9%, 对于  $D_{50}$  变化的相对贡献率分别为 93.1% 和 6.9%。这表明, 沙尘暴日数变化对悬沙粒度特征变化的影响要高于年降水变化的影响。

(3) 悬沙中大于 0.05 mm 的粗颗粒组分百分比

( $r_{>0.05 \text{ mm}}$ ) 随风水两相作用指标 ( $P_m / t_{ss}$ ) 的增大而减小, 悬沙中小于 0.01 mm 的细颗粒组分百分比 ( $r_{<0.01 \text{ mm}}$ ) 随风水两相作用指标的增大而增大。随着风水两相作用指标的变化, 粗细颗粒之间表现出不同的搭配关系, 这种搭配关系对高含沙水流的形成有一定的影响。

(4) 存在着一种最优的粗细泥沙的搭配关系, 使得悬移质泥沙的含沙量达到最大。峰值处的  $r_{>0.05 \text{ mm}} / r_{<0.01 \text{ mm}}$  略有不同, 大致均在 2.0—3.0 之间。当  $r_{>0.05 \text{ mm}} / r_{<0.01 \text{ mm}}$  分别为 2.0 和 2.5 时,  $P_m / D_{ss}$  分别为 65.63 和 126.55。此时, 有利于出现粗细颗粒在悬沙中的最优搭配, 从而导致悬移质含沙量出现峰值。

#### 参 考 文 献

- 1 钱宁, 王可钦, 阎林德, 等. 黄河中游粗泥沙来源区对黄河下游冲淤的影响. 第一次河流泥沙国际学术讨论会论文集. 北京: 光华出版社, 1980, 53—62
- 2 徐建华, 牛玉国. 水利水保工程对黄河中游多沙粗沙区径流泥沙影响研究. 郑州: 黄河水利出版社, 2000, 1—296
- 3 唐克丽(主编). 黄土高原地区土壤侵蚀区域特征及其治理途径. 北京: 中国科学技术出版社, 1990, 118—152
- 4 景可, 陈永宗, 李风新. 黄河泥沙与环境. 北京: 科学出版社, 1993, 107—131
- 5 许炯心. 黄河中游支流悬移质粒度与含沙量、流量间的复杂关系. 地理研究, 2003, 22(10): 39—48
- 6 Xu J X. The optimal grainsize composition of suspended sediment of hyperconcentrated flows in the middle Yellow River. International Journal of Sediment Research, 1997, 12(3): 170—176
- 7 杨根生(主编). 黄土高原北部地区土地沙漠化综合治理. 北京: 科学出版社, 1991, 1—242
- 8 许炯心. 黄河中游多沙粗沙区的风水两相侵蚀产沙过程. 中国科学, D辑, 2000, 30(5): 540—548