

风水两相作用对黄河流域高含沙水流的影响*

许炯心**

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

摘要 运用黄河中游 40 余条支流的资料, 研究了风水两相作用对高含沙水流的影响. 文中以一个简单的“运载工具”模式来描述高含沙水流的形成特性. 固液两相流的液相是一种“运载工具”, 固相则是由这一运载工具所运输的物质. 高含沙水流的形成与特性, 与液相和固相的形成和特性有密切的关系. 以风力为主的区域, 粗颗粒可以充分供应, 而细颗粒供应条件不足. 以水力为主的区域, 细颗粒可以充分供应, 而粗颗粒供应条件不足. 风水两相作用占优势的地区, 粗、细颗粒泥沙都有较充分的供应. 在风力作用为主的区域, 液相和固相都不能充分发育, 其浓度均较低. 在以水力作用为主的区域, 由于径流的稀释作用, 液相组分的浓度较低; 由于粗泥沙供应不充分, 固相组分的浓度也较低. 在风力-水力两相作用占优势的区域, 液相能达到较大的浓度, 粗泥沙的供应也较充分, 故出现了固相组分浓度的高值. 因此, 风水两相作用最有利于高含沙水流的发育, 导致了含沙量高值带的出现. 风水两相作用的引入, 为黄河中游高含沙水流的形成提供了新的解释.

关键词 河流泥沙 高含沙水流 固体-液体两相流 风力-水力两相作用 黄河

高含沙水流是一种特殊的自然现象, 这种水流现象在我国黄土高原表现得十分典型, 并已进行了深入研究. 钱宁等全面地研究了高含沙水流的流变性质、水力学与泥沙运动学特征^[1,2]; 王兴奎等研究了高含沙水流在黄土高原丘陵沟壑中的形成过程^[3]; 许炯心对黄土高原高含沙水流的形成过程和空间分布特征进行了系统的分析, 指出黄土高原半干旱的气候条件、稀疏的植被和疏松易蚀的黄土物质, 是该地区高含沙水流形成的自然地理因素, 并已注意到

特殊的水力、风力交替作用对高含沙水流粒度特性的影响^[4].

黄河中游支流的悬移质含沙量的分布表现一定的规律性. 存在着一个年均悬移质含沙量、平均年最大含沙量和极大含沙量(水文记录中的最大含沙量)的高值带, 该高值呈东北-西南向分布, 位于窟野河、秃尾河、佳芦河、无定河、泾河上游支流马连河、渭河支流散渡河、葫芦河, 十分引人注目. 在这一地域范围内, 年降水量和年沙尘暴日数也表现出有规律的

2003-05-21 收稿, 2003-07-22 收修改稿

* 国家自然科学基金面上项目(批准号: 40271019)、国家自然科学基金及水利部联合资助重点项目(批准号: 50239080)

** E-mail: xujx@igsnr.ac.cn

分布, 年降水、年沙尘暴日数与含沙量特征值的等值线大致平行. 上述含沙量高值带大致位于年降水量等值线 350~550 mm 之间和年降沙尘暴日数 15~5 天之间. 这一范围是典型的水力、风力交互作用的地区. 这一现象启示我们, 高含沙水流的发育与风水两相作用之间可能存在着某种成因联系. 对于黄土高原风水水力交互作用区的侵蚀过程, 前人已进行了一些研究, 并提出了风力-水力两相侵蚀产沙过程的概念^[5]. 本文致力于阐明高含沙水流的发育与风水两相作用之间的联系, 以深化对黄河中游高含沙水流成因机制的认识.

1 研究区概况、研究方法资料来源

1.1 研究区概况

本研究涉及到黄河的 40 余条支流, 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泥沙测验的支流. 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 天减少到 10 天以下, 沙尘暴日数由 25 天减少到 5 天以下. 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、典型黄土和黏黄土. 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.

1.2 资料来源

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^[5]. 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, 故二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(D_{ss})和年平均大风日

数(D_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, 故本文中均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.

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, 故二者之间存在着一定的负相关关系(图 1), 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, 我们引进风力-水力两相作用指标 $I_{ww}=P_m/D_{ss}$, 即用某一地点年降水量 P_m 与年均沙尘暴日数 D_{ss} 之比 P_m/D_{ss} 来表示 I_{ww} . 由上述定义可知, 风力-水力两相作用指标值较低, 意味着降水量较小而沙尘暴日数较多, 即以风力作用为主; 风力-水力两相作用指标值较高, 意味着降水量较大而沙尘暴日数较少, 即以水力作用为主; 当风力-水力两相作用指标值为中等时, 意味着降水量中等而沙尘暴日数也为中等, 即以风力-水力作用两相作用占优势.

挟沙水流的含沙量超过某一数值之后, 便会出现某些不同于一般挟沙水流的特性^[1,2]. 但对于这一含沙量的数值, 迄今尚未有公认的标准. 我们以大于 400 kg/m^3 作为高含沙水流的含沙量标准. 为了在不同的河流间进行比较, 采用了年最大悬移质含沙量 C_{\max} 、年均悬移质含沙量 C_{mean} 和有观察资料以来的断面最大含沙量 $C_{\max,s}$ (即极限含沙量)作为指标. 当 C_{\max} 或 $C_{\max,s}$ 超过 400 kg/m^3 时, 即认为已出现过高含沙水流. 此外, 还采用了高含沙水流发生频率(F_h)的概念, 定义为每年出现高含沙水流的日数, 即某一时期中出现日平均含沙量超过 400 kg/m^3 的次数与该时

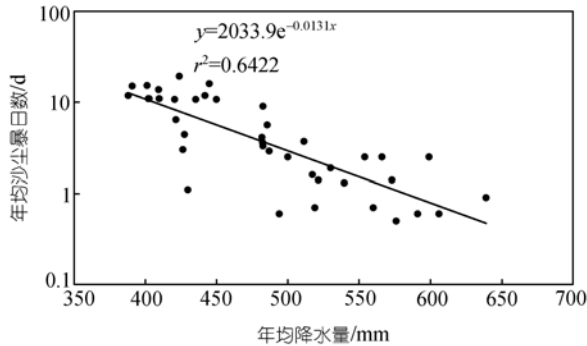


图1 年平均降水量与年平均沙尘暴日数的关系

期的年数之比^[4]。对这一地区资料的统计分析表明,当年均含沙量超过 100 kg/m^3 时, $F_h > 2.0$, 故可以认为当 $C_{\text{mean}} > 100 \text{ kg/m}^3$ 时, 已有高含沙水流发生^[4]。

本文所涉及到的悬移质含沙量及悬沙粒度资料,均来自流域有关支流水文站,包括含沙量特征值如多年平均含沙量(C_{mean})、多年平均年最大含沙量(C_{max})和有观测记录以来的断面平均最大含沙量($C_{\text{max, s}}$),泥沙粒度特征值如中值粒径 D_{50} , 大于 0.05 mm 百分比($r_{>0.05}$)、小于 0.01 mm 百分比($r_{<0.01}$)。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。同时,1970 年以后泥沙颗粒分析的方法也有所改变,故利用 1970 年以后的泥沙粒度资料时,需要进行修正。还应指出,用于本研究的资料,选自同时进行悬移质泥沙及泥沙粒径观测的站点。由于这样的站点在风沙区分布很少,为了弥补这一不足,我们在进行只涉及到含沙量的分析时,还增加了位于风沙区的某些站点。

1.3 研究方法

我们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对黄河支流高含沙水流发育的影响。在大多数情况下,黄土高原的高含沙水流可以视为两相紊流^[1,2]。它是一种固体-液体两相流。细颗粒泥沙(黏土、细粉沙)与水混合后形成的准均质“浆液”表现为两项流的液相,悬浮于液相中并随液相一道向下运动的粗颗粒泥沙表现为两相流的固相。在黄土高原,一般将 $< 0.01 \text{ mm}$ 的细泥沙视为形成上述液相的细泥沙,而将 $> 0.05 \text{ mm}$ 的粗泥沙

视为构成固相的泥沙。从以上物理图形出发,可以用一个简单的“运载工具”模式来描述高含沙水流。固液两相流的液相是一种“运载工具”,固相则是由这一运载工具所运输的物质。因此,高含沙水流的形成与特性,与液相和固相的形成和特性有密切的关系。要深入理解高含沙水流的形成机理,应当对于其液相和固相的性质及其形成过程进行深入的研究。

液相既然是水与细泥沙的混合物,则其形成必然与流域的降雨产流特性和地表物质中的细颗粒组分有密切的关系。固相物质则与流域地表物质中的粗粒组分和将这种粗颗粒搬运到河道中的动力条件有关。地表物质中的细粒组分,主要来自黄土;而粗粒组分,除基岩风化物中的粗颗粒外,则与风成沙有关,将风成沙搬运到河道中的动力则为风力。已有的研究表明,尽管黄河中游的主要产沙地层为黄土,但对黄土物质和悬移质泥沙(以下简称悬沙)的粒度分布进行分析的结果表明,悬沙要比黄土粗一些^[6,7]。前已指出,研究区的地表组成物质从西北向东南,依次由风成沙变成沙黄土、典型黄土和黏黄土。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。同时,本区还分布着一种抗蚀性极低的软弱基岩即所谓“砒砂岩”。这说明,悬沙中的粗粒部分不完全是黄土所提供的,其中一部风来自较粗的物源如风成沙和基岩风化物中的粗粒部分。在沙黄土分布地区,也有一部分来自沙黄土中的粗粒部分。我们以前的研究表明,位于风沙-黄土转换带的若干支流,如窟野河、秃尾河、佳卢河、无定河等,冬天、春天盛行西北风,将大量粗颗粒的风成沙吹入沟道中,河道中和河漫滩上,并暂时存贮在那里;进入雨季和汛期之后,流水作用居于主导地位^[5],来自黄土覆盖区的暴雨洪水进入沟道、河道,其中含有大量细颗粒泥沙,构成固液两相流的液相,并使前期存贮于沟道和河道中的粗颗粒风成沙作为固相进入水沙两相流,向下游运动。显然,只有在液相和固相都很发育的情况下,高含沙水流才会充分发育。在本文中,我们将对高含沙水流的液相和固相分别进行研究,并将它们的形成与流域自然条件特别是风水两相作用联系起来。

2 地表物质与地貌营力的组合关系

地貌过程取决于地表物质与地貌营力(如水力、风力)的相互作用. 前已述及, 本区的主要营力为水力和风力, 反映风力作用的沙尘暴从西北向东南减弱, 而反映水力作用的年降水量从西北向东南增强, 故两种营力的空间分布具有一定的相关性. 研究区的地表组成物质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、典型黄土和黏黄土. 这样, 本区的地表物质与地表营力之间形成了特定的组合关系, 这种关系对高含沙水流的液相与固相的形成有深远的影响.

以所研究的 40 余个流域的资料为基础, 我们在图 2 中点绘了流域地表黄土中大于 0.05 mm 粗颗粒泥沙百分比与小于 0.005 mm 细颗粒沙百分比与风水两相指标 I_{ww} 的关系. 为了显示风沙的影响, 还将榆林、神木、府谷 3 县风沙中大于 0.05 mm 粗颗粒百分比与 I_{ww} 的关系点进了图中; 风沙中大于 0.05 mm 粗颗粒的百分比很高, 几乎为 100%. 在图的左侧, I_{ww} 值较小, 为风力为主的区域. 这里出现了粗颗粒物质百分比的高值区与细颗粒物质百分比低值区的组合, 即粗颗粒可以充分供应, 而细颗粒供应条件不足. 在图的右侧, I_{ww} 值较大, 为水力为主的区域, 出现了细颗粒物质百分比的高值区与粗颗粒物质百分比低值区的组合, 即细颗粒可以充分供应, 而粗颗粒供应条件不足. 在图的中部, I_{ww} 值为中等, 代表风水两相作用占优势的地区, 地表物质表现为中等的粗颗粒百分比与中等的细颗粒百分比的组合, 即粗、细颗粒泥沙都有较充分的供应. 这种地表物质粒度组成与风水

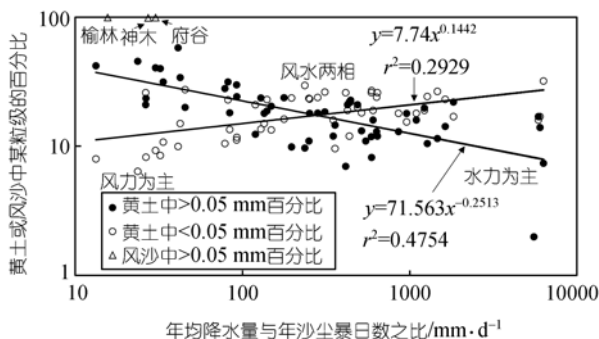


图 2 流域地表黄土中大于 0.05 mm 百分比与小于 0.005 mm 百分比与风水两相指标 I_{ww} 的关系

营力的空间搭配关系, 与高含沙水流液相、固相的发育有密切关系.

3 风力-水力两相作用对高含沙水流液相与固相的影响

3.1 年内变化的比较

我们以位于风沙黄土过渡带的无定河与位于典型黄土带、不受风沙影响的渭河的资料为例, 对于高含沙水流液相与固相的形成进行比较.

图 3 以无定河赵石窑站和渭河南河川站 1977 年各测次的资料为基础, 点绘了液相组分浓度(即小于 0.01 mm 细颗粒的含沙量)和固相组分浓度(即大于 0.05 mm 粗颗粒的含沙量)与总含沙量的关系. 可以看到, 液相与固相浓度随总含沙量的变化方式是不同的. 随着总含沙量的增大, 液相组分浓度趋向于某一极限后便不再增大. 然而, 固相组分的浓度却随总含沙量的增大而不断增大. 因此, 总含沙量所能达到的量级, 取决于粗泥沙的供应条件和水流对粗颗粒的输运能力. 位于风沙-黄土转换带的无定河与位于典型黄土区(无风沙)的渭河, 其固相浓度有很大差别. 随着总含沙量的增大, 无定河的固相浓度可以增大到 1100 kg/m^3 以上, 而渭河的固相浓度只能增大到 300 kg/m^3 左右. 这显然是由于无定河可以得到来自风成沙的大量粗颗粒泥沙的供应, 而渭河却得不到这种供应. 因此, 无定河固液两相流的固相可以充分发育, 因而其含沙量可以很高, 而渭河固液两相流的固相则十分有限, 因而其含沙量也远比前者为低.

3.2 不同自然条件下多年平均状况的比较

为了在宏观上揭示固液两相流的液相与固相的发育与风水两相作用的关系, 我们以 40 余条河流的多年平均液相与固相组分浓度的资料为基础进行了分析. 这里, 多年平均液相与固相组分浓度是按多年平均悬移质含沙量分别乘以悬沙中 $<0.01 \text{ mm}$ 和 $>0.05 \text{ mm}$ 百分比而得到. 图 4 中分别点绘了液相组分浓度与年均降水量和年均沙尘暴日数的关系, 图 5 中则分别点绘了固相组分浓度与年均降水量和年均沙尘暴日数的关系. 尽管图中的点子相当分散, 但可以看到某种趋势. 各图中都出现了一个峰值, 峰值处所对应

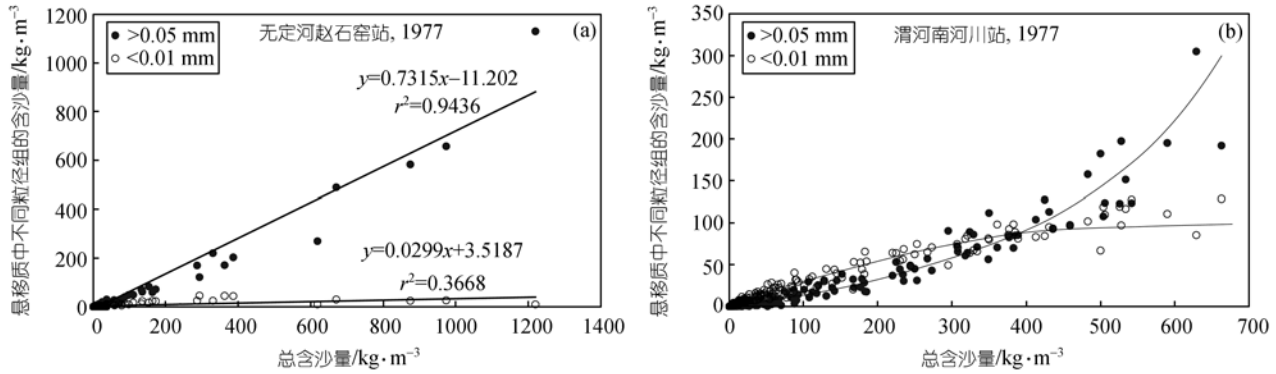


图 3 液相组分浓度(即小于 0.01 mm 细颗粒的含沙量)和固相组分浓度(即大于 0.01 mm 粗颗粒的含沙量)与总含沙量的关系

(a) 无定河赵石窑站; (b) 渭河南河川站

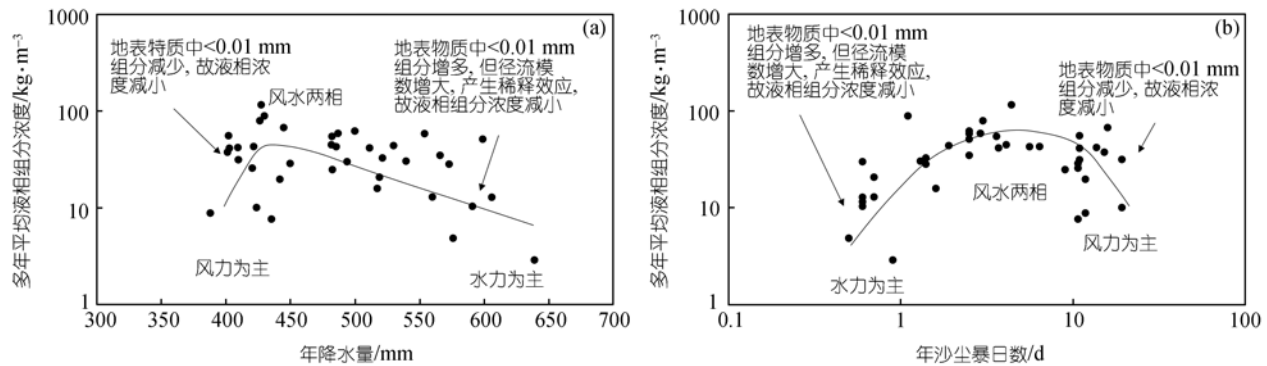


图 4 液相组分浓度与年均降水量和年均沙尘暴日数的关系

的是中等的年均降水量与中等的沙尘暴日数的组合, 这种组合代表了风力-水力两相作用占优势. 从图 4(a)和(b)中可以看到, 在沙尘暴的高值端和年降水的低值端, 即风力作用为主的区域, 因地表物质为风成沙或沙黄土, 其中小于 0.01 mm 的细颗粒组分减少, 故液相不能充分发育, 其浓度较低. 另一方面, 在年降水的高值端和沙尘暴的低值端, 即水力作用为主的区域, 地表物质为黏黄土或典型黄土, 小于 0.01 mm 的细泥沙的供应条件比较充分. 然而, 由于降水量大, 径流丰沛, 对挟沙水流起到稀释的作用, 因而液相组分浓度也较低. 只有在风力-水力两相作用占优势、中等的年均降水量与中等的沙尘暴日数相组合的区域即曲线中段, 最有利于液相的发育, 才出现了液相浓度的高值.

从图 5(a)和(b)中可以看到, 在沙尘暴的高值端

和年降水的低值端, 即风力作用为主的区域, 地表物质为风成沙和少量沙黄土, 大于 0.05 mm 的粗泥沙可以充分供应, 但因地表物质中缺少细泥沙供应, 作为运载工具的液相不发育, 不能有效地搬运被风力吹送到河道和沟道中的粗颗粒泥沙, 因而固相不能充分发育, 固相组分的浓度较低. 对于沙漠地区的河流, 地表物质中 <0.005 mm 或 <0.01 mm 的细粒物质极少, 含量在 1% 以下, 很难形成具有较大容重的“浆液”, 即难以形成真正意义上的液相. 由于不能形成液相, 即使粗颗粒物质能充分供应, 也不能形成较大浓度的固相. 另一方面, 在年降水的高值端和沙尘暴的低值端, 即水力作用为主的区域, 由于地表无风成沙或沙黄土, 也无较强风力作用, 得不到形成固相的粗颗粒物质供应条件, 故固相不能充分发育. 同样地, 只有在风力-水力两相作用占优势、中等的年均降水量

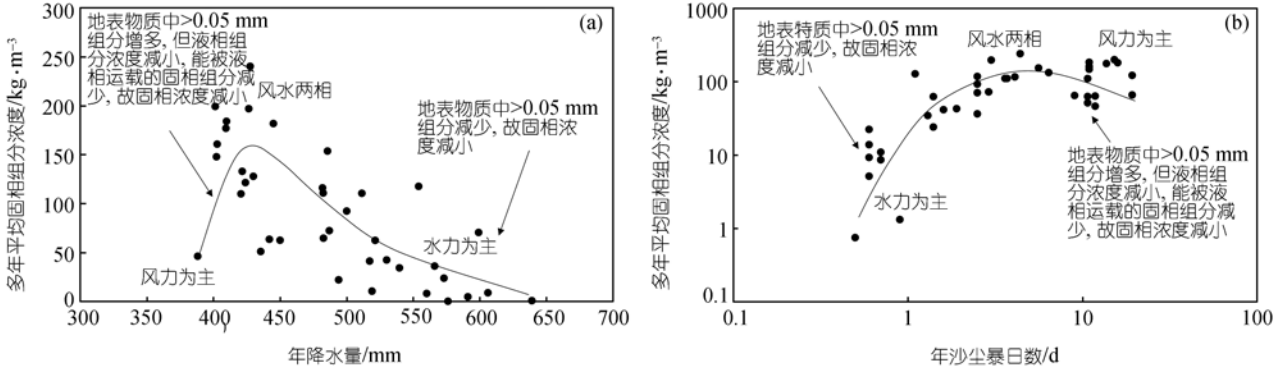


图 5 固相组分浓度与年均降水量和年均沙尘暴日数的关系

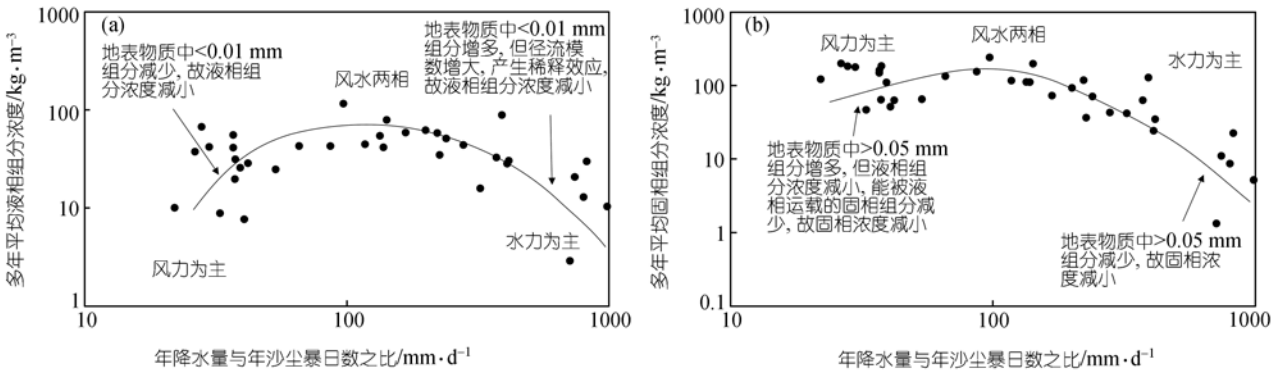


图 6 液相与固相组分浓度与风力-水力两相作用指标的关系

与中等的沙尘暴日数相组合的区域即曲线中段，最有利于固相的发育，才出现了固相浓度的高值。

我们在图 6 中分别点绘了液相与固相组分浓度与风力-水力两相作用指标的关系。从图 6(a)中可以看到，在曲线的左端即风水两相作用指标值的低端，为风力作用为主的区域，由于上文所述的原因，液相不能充分发育；在曲线的右端即风水两相作用指标值的高端，为水力作用为主的区域，由于上文所述的原因，液相也不能充分发育，故出现液相组分浓度的低值区。在曲线中段，风水两相作用指标值为中等，为风力-水力两项作用占优势的地区，出现了液相组分的高值区。同样地，从图 5(b)中可以看到，在曲线的左端即风水两相作用指标值的低端，为风力作用为主的区域，固相不能充分发育；在曲线的右端即风水两相作用指标值的高端，为水力作用为主的区域，固相也不能充分发育，故出现固相组分浓度的低值区。在曲

线的中段即风力-水力两项作用占优势的地区，出现了固相组分的高值区。由于引进了风水两相指标，图中的点子的分布要集中一些，趋势也更为明显。

4 高含沙水流含沙量特性与风力-水力两相作用的关系

由于总含沙量在很大程度上取决于液相与固相组分的含沙量，故可以预期，高含沙水流含沙量特性与风力-水力两相作用指标之间具有密切的关系。我们在图 7 中分别点绘了多年平均含沙量(C_{mean})、多年平均年最大含沙量(C_{max})和有观测记录以来的断面平均最大含沙量($C_{\text{max},s}$)与风力-水力两相作用指标(I_{ww})的关系。从图 7 中可以看到，随着风水两相作用指标值的增大， C_{mean} 、 C_{max} 和 $C_{\text{max},s}$ 都增大，并达到一个峰值。此后，当风力-水力两相作用指标进一步增大时， C_{mean} 、 C_{max} 和 $C_{\text{max},s}$ 则减小。各图中左侧的 I_{ww} 低

值区, 对应于风力作用主导区; 右侧的 I_{ww} 高值区, 对应于水力作用主导区. 在这两个区域中, 均出现含沙量的低值区. 与含沙量峰值相对应, 出现了中等的风力-水力两相作用指标值, 说明风力-水力两相作用占优势的条件, 最有利于高含沙水流的发育. 从图中还可以看到, 与含沙量峰值所对应的 I_{ww} 值是有差异的, 与多年平均含沙量(C_{mean})峰值对应的 I_{ww} 值最大, 与多年平均年最大含沙量(C_{max})峰值对应的 I_{ww} 值次之, 与有观测记录以来的断面平均最大含沙量($C_{max,s}$)

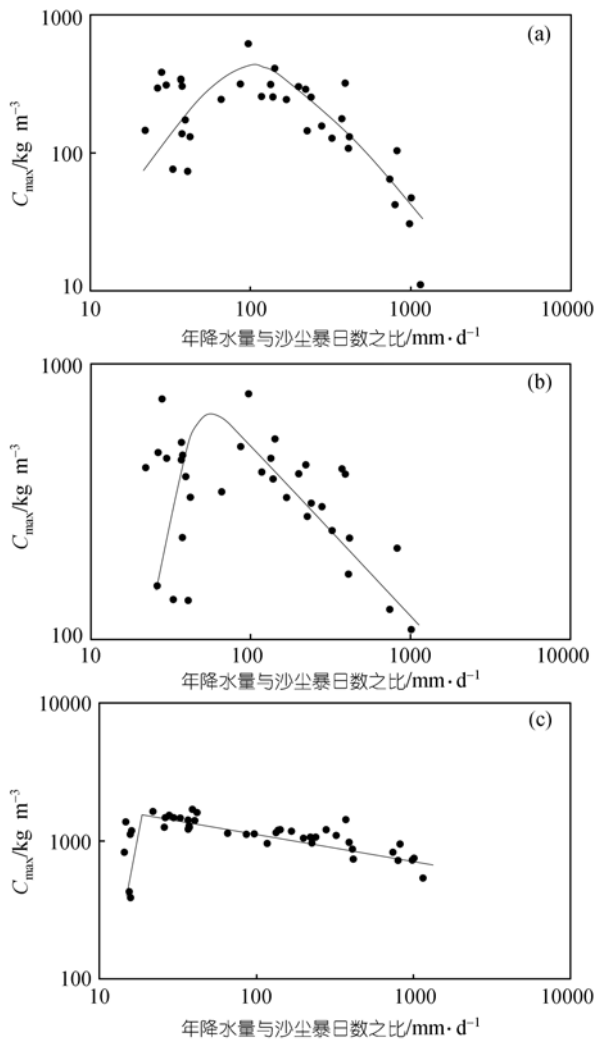


图 7 含沙量特征值与风力-水力两相作用指标的关系 (a) 多年平均含沙量(C_{mean}); (b) 多年平均年最大含沙量(C_{max}); (c) 有观测记录以来的断面平均最大含沙量($C_{max,s}$)

峰值对应的 I_{ww} 值最小. 这似乎说明, 风水两相作用中的风力, 对含沙量极大值的影响要大于对年均值的影响.

高含沙水流发生的频率可以用每年出现日均含沙量大于 400 kg/m^3 的日数来表示. 图 8 中点绘了黄河中游多沙粗沙区一些河流 1950~1970 年间的高含沙水流频率与风力-水力两相作用指标的关系. 可以看到, 随着风水两相作用指标值的增大, 高含沙水流频率增大, 并达到峰值. 此后, 当风力-水力两相作用指标进一步增大时, 高含沙水流频率则减小. 这一变化图形与图 7 是一致的, 其形成机理也是相同的.

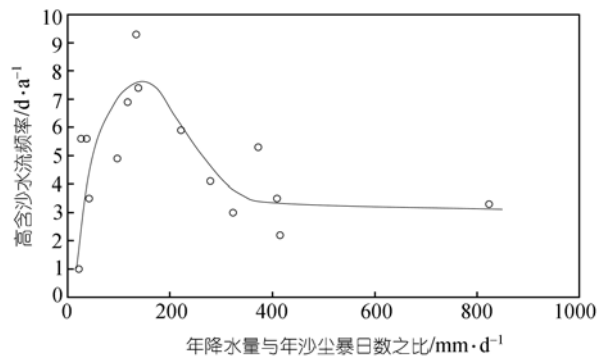


图 8 黄河中游多沙粗沙区河流高含沙水流频率与风力-水力两相作用指标的关系

除了通过对两相流液相与固相发育的影响来影响高含沙水流的形成以外, 风水两相作用还有利于形成最优粒度组成. 我们在以前的研究中发现, 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^[8,9]. 我们近期的研究表明, 悬沙中 $>0.05 \text{ mm}$ 的粗颗粒组分百分比 ($r_{>0.05}$) 随风水两相作用指标 (P_m/D_{ss}) 的增大而减小, 悬沙中 $<0.01 \text{ mm}$ 的细颗粒组分百分比 ($r_{<0.01}$) 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最优粒度组成的形成有一定的影响. 这一成果已经在另文中进行了报道¹⁾, 这里不再赘述.

1) 许炯心. 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. 自然科学进展, 2005(待发表)

5 结论

高含沙水流可以用一个简单的“运载工具”模式来描述. 固液两相流的液相是一种“运载工具”, 固相则是由这一运载工具所运输的物质. 高含沙水流的形成与特性, 与液相和固相的形成和特性有密切的关系.

本区的地表物质与地表营力之间形成了特定的组合关系, 这种关系对高含沙水流的液相与固相的形成有深远的影响. 以风力为主的区域, 出现了粗颗粒物百分比的高值区与细颗粒物百分比低值区的组合, 即粗颗粒可以充分供应, 而细颗粒供应条件不足. 以水力为主的区域, 出现了细颗粒物百分比的高值区与粗颗粒物百分比低值区的组合, 即细颗粒可以充分供应, 而粗颗粒供应条件不足. 风水两相作用占优势的地区, 地表物质表现为中等的粗颗粒百分比与中等的细颗粒百分比的组合, 即粗、细颗粒泥沙都有较充分的供应.

液相与固相浓度随总含沙量的变化方式是不同的. 随着总含沙量的增大, 液相组分浓度趋向于某一极限后便不再增大. 然而, 固相组分的浓度却随总含沙量的增大而不断增大. 因此, 总含沙量所能达到的量级, 取决于粗泥沙的供应条件和水流对粗颗粒的输运能力. 在风力作用为主的区域, 液相和固相都不能充分发育, 其浓度均较低. 在以水力作用为主的区域, 液相和固相组分浓度也较低. 只有在风力-水力

两相作用占优势的区域, 最有利于液相和固相的发育, 因而出现了液相和固相组分浓度的高值.

风力作用主导区和水力作用主导区, 均出现含沙量的低值区, 不利于高含沙水流的发育. 风水两相作用主导区, 出现含沙量的峰值区, 最有利于高含沙水流的发育. 高含沙水流频率与风水两相作用指标值的关系, 也表现出类似的规律.

参 考 文 献

- 1 钱宁主编. 高含沙水流研究. 北京: 清华大学出版社, 1989. 1~204
- 2 赵文林主编. 黄河泥沙. 郑州: 黄河水利出版社, 1996
- 3 王兴奎, 钱宁, 胡维德. 黄土丘陵沟壑区高含沙水流的形成及汇流过程. 水利学报, 1982, (2): 26~35
- 4 许炯心. 黄土高原高含沙水流形成的自然地理因素. 地理学报, 1999, 54(4): 319~326
- 5 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
- 6 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: 科学出版社, 1991. 118~152
- 7 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
- 8 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
- 9 Xu Jiongxin. 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