

# 黄河中游多沙粗沙区的风水两相侵蚀产沙过程\*

许炯心

(中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

**摘要** 以黄河中游各支流的资料为基础, 提出了风水两相侵蚀产沙的概念, 并建立了风水两相侵蚀产沙模式, 从而为这一地区强烈的侵蚀产沙过程提出了新的解释. 风力作用与水力作用在时间上是相异的, 前者为高含沙水流搬运作用准备了大量粗颗粒泥沙, 存贮在坡面、沟道和河道中; 后者则形成了富含细颗粒的暴雨径流, 为粗颗粒泥沙的搬运提供了动力条件. 由此形成了高含沙水流, 导致了这一地区高强度的侵蚀产沙过程.

**关键词** 风水两相侵蚀产沙过程 高含沙水流 黄河中游

## 1 问题的提出

黄河中游多沙粗沙区, 指流域中河口镇至龙门之间的区域, 再加上泾河的支流马连河以及北洛河流域. 这一地区具有极高的侵蚀强度, 既是黄土高原的侵蚀高值区, 也是我国和世界大尺度空间范围中侵蚀强度最高的地区. 这一地区高强度侵蚀的形成机理问题, 是国际侵蚀学科中尚未完全解决的问题, 吸引了国内外研究者的广泛注意. 不少研究者已从不同的角度对于这一地区高强度侵蚀的机理进行了研究<sup>[1-3]</sup>, 但已有成果大多运用侵蚀力学的一般原理分析这一地区的侵蚀作用、方式与类型. 我们认为, 为了对这一地区特有的高强度侵蚀的内在机理作出满意的解释, 必须更新概念, 着眼于这一地区特有的自然现象和自然过程, 研究其中特有的力学作用. 为此, 在大量野外实际观测资料的基础上, 本文提出风水两相侵蚀产沙的概念, 对这一问题进行了进一步的研究.

黄河中游的高强度产沙与高含沙水流的作用密切相关. 高含沙水流是一种特殊的两相流, 其中的液相是由水和细颗粒泥沙所组成的近于均质的浆液, 而固相则是悬浮在这一均质浆液“骨架”中的粗颗粒泥沙<sup>[4]</sup>. 由于浆液中絮凝结构的形成, 使粗颗粒的沉速大大减慢, 因而可以更容易地进入悬浮状态, 使水流的挟沙能力大为提高<sup>[4]</sup>. 本研究将要说明, 高含沙水流的上述液相与固相, 在一定程度上来自不同的物源, 并与不同的地貌动力作用有关.

已有的研究还表明, 多沙粗沙区河流的悬移质泥沙中, 大于 0.05 mm 的粗颗粒含量比流域内黄土中大于 0.05 mm 的含量要高. 图 1(a)中点绘了悬移质中大于 0.05 mm 含量百分比与黄土中大于 0.05 mm 含量百分比的关系, 所有的点据都在 45° 线以上. 这说明, 悬移质泥沙粗颗粒成分中, 有一部分来自非黄土来源. 景可的计算表明, 在大于 0.05 mm 粗泥沙中, 有 38%

1999-08-20 收稿

\* 国家自然科学基金(批准号: 59890200)与水利部联合资助项目. 中国科学院地理科学与资源研究所知识创新工程领域前沿项目

并非由黄土所提供<sup>[3]</sup>。由于这一地区除黄土以外, 还分布着不连续的风成沙及基岩风化物, 后两者的粒度组成均大于黄土(图 1(b))。因此, 风成沙和基岩风化物对于悬沙中这一部分大于 0.05 mm 粗颗粒都有一定的贡献。基岩风化物中的粗粒部分, 可以经过流水的侵蚀进入河道。风沙覆盖的黄土区即盖沙区地表物质渗透性很强, 暴雨中亦不会大量产流, 故风沙中的物质只能通过风力作用才能进入河道。

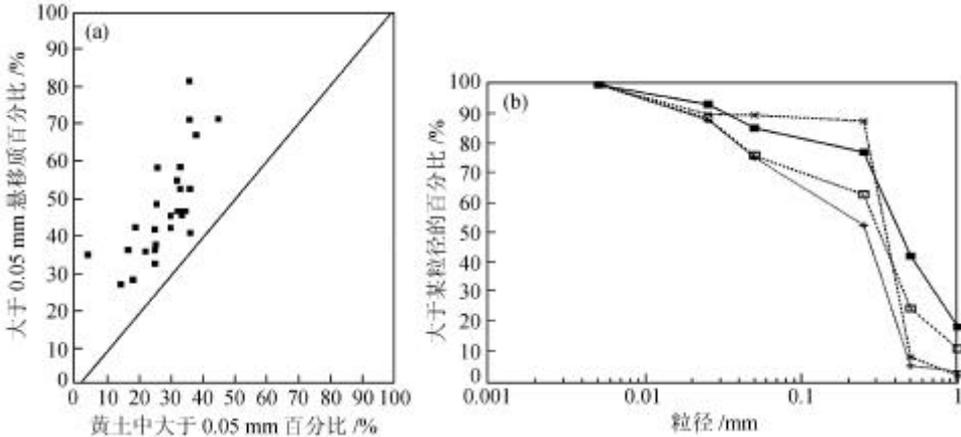


图 1 黄河中游地表物质与悬移质泥沙的组成特征

(a) 黄土与悬移质特征的比较, (b) 皇甫川流域悬移质泥沙、黄土、风成沙和基岩风化物的粒度分配曲线。■示基岩风化物, +示黄土, \*示风成沙, □示悬移质泥沙

黄河中游多沙粗沙区位于半干旱区, 年降水量在 500~300 mm 之间, 在自然地理上属于水力-风力作用的过渡带。按照著名的 Langbein-Schumm 规律, 这里应该是侵蚀产沙的高值区, 为此我们已作过了比较深入的分析<sup>[5]</sup>。这一地区不仅在空间上表现为从流水作用为主向以风力作用为主的过渡, 在时间上也表现出风力-水力作用的交替。图 2 中点绘了典型地区的多年平均大风日数、沙暴日数和年降水量的季节变化曲线。可以看出, 在一年中, 春季、冬季以风力作用为主, 降雨极少; 夏季则为雨季, 因而是雨滴溅蚀及流水侵蚀集中发生的季节。这种时间上的风水交替作用, 对于本区的侵蚀产沙过程有着十分深刻的影响, 形成了特殊的风水两相侵蚀产沙机制。概括而言, 在冬季和春季, 风力将风沙区的风成沙或一部分基岩风化物, 搬运到坡面、沟道和河流的滩地上, 其中一部分可以直接进入河道中。夏季的暴雨径流使黄土区受到侵蚀, 形成了含有大量细

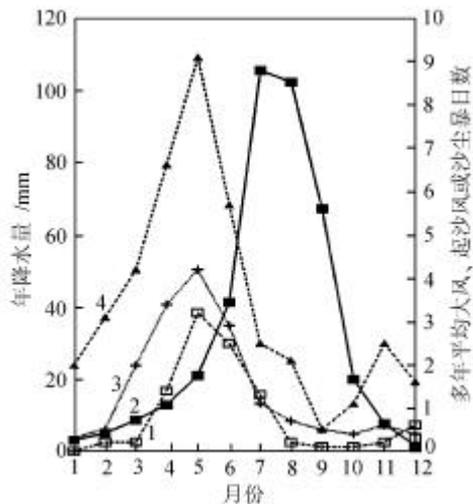


图 2 准格尔旗多年平均大风日数、起沙风日数、沙暴日数和年降水量的季节分配曲线  
■示年降水量, +示大风, □示沙尘暴, ▲示起沙风

泥沙的浑水并汇入沟道和河道, 进而使前期存贮在那里的粗颗粒泥沙悬浮而被搬运, 形成输送能力极强的高含沙洪水. 这就是黄河中游多沙粗沙区沙的风水两相侵蚀产沙模式.

在下文中, 我们将对此进行论证, 并进而揭示这一模式的地貌学意义. 所依据的资料除野外考察所得以外, 主要来自有关水文站的流量、输沙量、含沙量和悬移质粒度资料. 由于风水两相侵蚀产沙主要是一种自然过程, 为了更好地揭示其形成机理, 我们主要采用了 1950~1970 年的资料, 因为在这一时段中, 人类活动的影响还相对较弱.

## 2 风力侵蚀及风成沙进入沟道和河流的过程

本区风力侵蚀主要发生在春季, 其作用是将粗颗粒搬运到沟道与河道中, 在沟谷中、滩地上和河道内存贮下来, 以供流水作用进一步搬运.

本区春季多大风, 且盛行西北风, 风向多与沟道成垂直或高角度相交. 风力所挟带的粗颗粒泥沙进入沟道以后, 往往在那里堆积下来. 我们在无定河的野外考察表明, 风力-水力交替作用区的切沟常常被风沙填平, 冲沟沟底也为风沙所填积. 在开阔的河谷中和滩地上形成的风成沙丘, 在风力的驱动下向河道方向缓慢移动, 有的直接坍入河道, 更多的是随着下一个汛期中河岸侵蚀的发展而坍入河道. 卫星像片和航空照片上的观察表明, 无定河、秃尾河、皇甫川等流域中, 风成沙主要分布在一些河道的北岸、西岸和西北岸, 无法越过河道. 野外实际调查也观察到与盛行风来向一致的一岸的谷坡上有风沙堆积, 而对岸则无风沙, 说明这些河道对风成沙有“拦截”的作用. 中国科学院沙漠研究所曾对于上述几条河风成沙的入河量进行过推算<sup>[6]</sup>. 他们在典型土地利用条件下, 通过野外试验得出了风速与单宽输沙量之间的经验公式, 然后按实测风力与风向的时程变化和不同河段的土地覆盖、土地利用类型以及河段的走向与风向的夹角, 对于风沙入河量进行了计算. 结果表明, 窟野河、无定河、秃尾河风沙入河量每年分别为  $3\ 483 \times 10^4$ ,  $2\ 457 \times 10^4$  和  $1\ 633.5 \times 10^4$ t, 分别相当于这些河年平均悬移质输沙量的 24.2%, 11% 和 33.5%. 由此可见, 在风力驱动下入河的风沙对河流泥沙粗颗粒部分的贡献是不容忽视的.

由于造成风力侵蚀和流水侵蚀的外营力在季节分配上是相异的(参见图 2), 故风沙入河量与悬移质输沙量的季节分配也相异的. 以内蒙古鄂尔多斯高原北部向北注入黄河的小支流的资料为基础, 图 3 中给出悬移质输沙量与入河风沙量的月分配曲线. 可以看到, 每年汛后 11 月至次年 5 月, 是大量风沙入河的时期. 入河风沙堆积在河道中或滩地上, 在汛期(主要为 7~9 月)集中向下输移. 图中的曲线较好地反映了风力水力两相异时泥沙侵蚀输移过程. 仔细观察还可以看到, 4~6 月份, 河流输沙量的变化与风沙入河量相比, 有一个时间上的滞后.

为了对于春季风沙入河并为流水所搬运这一事实进行论证, 我们在图 4 中点绘了纳林川、秃

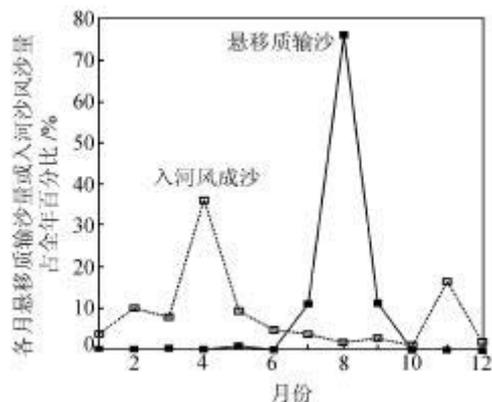


图 3 悬移质输沙量与入河风沙量的月分配曲线

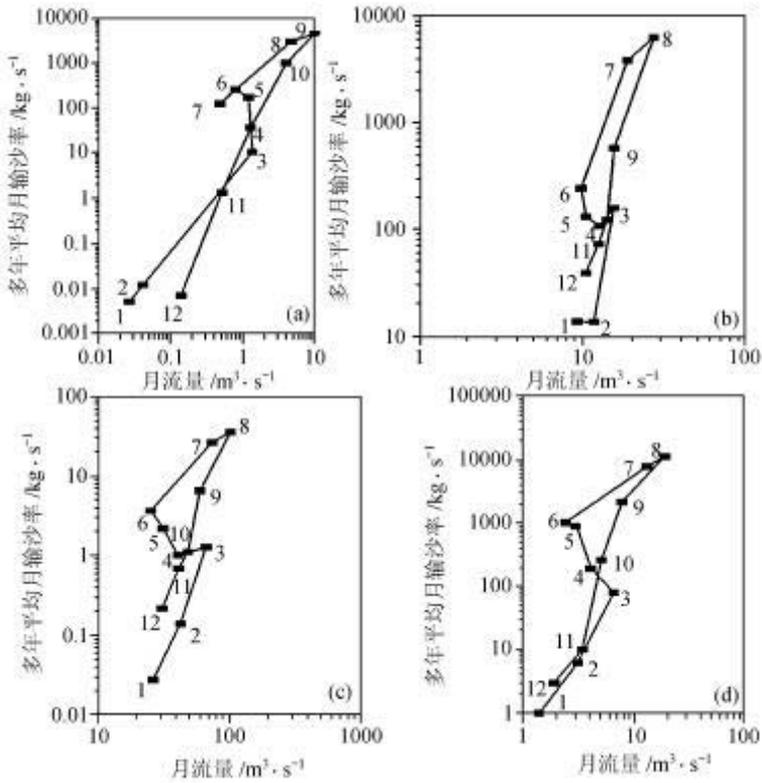


图 4 纳林川、秃尾河、无定河、大理河等河流 1950~1970 年间多年平均月输沙率与月流量的关系  
 (a) 纳林川, (b) 秃尾阿, (c) 无定河, (d) 大理河

尾河、无定河、大理河等河流 1950~1970 年间多年平均月输沙率与月流量的关系。图中显示  
 的各河流输沙率的月际变化图形十分相似, 表现出某种一般规律。从 3 月份到 6 月份, 尽管流  
 量是减小的, 但输沙率却显著增大。从图 2 中可以看到, 3~6 月间是风力作用的高峰时期, 大  
 量风沙直接进入河道或通过河岸侵蚀而进入河道, 其中较细部分可以直接成为悬移质泥沙的  
 来源, 使得悬移质输沙量大为增加, 这就是上述变化的实质。这显然为风力输沙入河的作用提  
 供了旁证。当然, 风力输送入河的泥沙是以粗颗粒为主的, 因为风成沙的粒度比黄土粗得多。  
 这些粗泥沙存贮在河道中, 要等到 7~9 月雨季中暴雨径流发生时, 才会进一步被搬运。应该  
 指出, 在上述各图中, 1~6 月月输沙量在 6 月份存在一个明显的拐点, 而在图 3 中, 同期月输  
 沙量以 5 月为最高。这主要是由于图 4 所涉及到的多数河流, 月大风日数的峰值出现在 6 月,  
 故风沙入河的峰值也出现在 6 月; 而在位于此区西北方的鄂尔多斯高原北部, 月大风日数峰  
 值的出现要早一些。

我们还可以运用矿物分析的资料, 来对风沙进入河道作进一步的论证。通过采样分析, 得  
 到了风成沙和河道中粗泥沙所包含的 14 种矿物的含量百分比, 如角闪石、绿帘石、石榴子石、  
 磁铁矿等。图 5 中点绘了黄河干流晋陕峡谷上段准格尔旗境内河道中淤积的粗泥沙中各种矿  
 物成分百分比和风成沙中相应矿物百分比的关系, 可以看到, 数据点能较好地分布在 45° 线附

近,即河道泥沙和风成沙中相对应矿物的百分比接近于相等,说明黄河淤积物中的粗泥沙与风成沙在矿物组成上是相似的,间接证明前者中的一部分是从后者中来的。

### 3 水力侵蚀搬运过程

对于黄河中游多沙粗沙区的水力侵蚀过程,前人已进行了大量研究,积累了丰富资料<sup>[1~3]</sup>。这里结合本文提出的风水两相侵蚀搬运模式,进一步阐述水力侵蚀搬运过程在侵蚀中的作用。

#### 3.1 暴雨径流及准均质浆液的形成

本地区高含沙水流中准均质浆液的

形成,是黄土区暴雨径流作用的结果。黄河中游多沙粗沙区暴雨强度大,黄土坡面上经过雨滴的击溅,即可形成高达  $600 \text{ kg/m}^3$  的含沙量。王兴奎等人的研究表明<sup>[7]</sup>,只要暴雨强度在  $0.3 \text{ mm/min}$  以上,坡地表面的黄土物质,无论颗粒粗细,均可全部被坡面径流侵蚀搬运,不发生颗粒分选现象。此时形成的高含沙水流,除了水与部分小于  $0.01 \text{ mm}$  细颗粒组成的浆液外,还含有一定数量的大于  $0.05 \text{ mm}$  的粗颗粒,但其含量不会超过黄土物质这部分颗粒的百分含量。进入沟道各级支流之后,在风力作用为主的季节中存贮在那里的粗粒泥沙,便会不断地补给到水流中来,使水流的含沙量不断增大,粒径也不断变粗。不少研究表明,当含沙水流中直径小于  $0.01 \text{ mm}$  的细颗粒含量达到某一极限之后,便基本上不随含沙量的增大而增大;当全沙含量进一步增大时,所增加的主要是大于  $0.05 \text{ mm}$  的粗颗粒含量<sup>[4]</sup>。从风水两相模式出发,这一特征是很容易理解的。小于  $0.01 \text{ mm}$  细颗粒来自黄土,是在坡面流和细沟流阶段就已进入水流中了;水流进入沟道和河道中以后,大量补给到水流中的泥沙是前期存贮于沟道、河道中的粗泥沙(包括风成沙和基岩风化物中的粗颗粒以及前期小流量时淤积下的粗颗粒),而细颗粒的来源甚少,故细颗粒的含量便不会再继续增大。

#### 3.2 前期存贮的风成沙在洪水过程中的再运移

前已指出,冬春季中风力作用搬运到沟道和河道中的粗粒泥沙,绝大部分都暂时堆积在那里。只有到了洪水来临之后,这部分泥沙才有可能被搬运而下移。汛期进入河道的含有大量细颗粒的径流,作为两相紊流中的液相,可以使上述粗颗粒的沉速大大减小,使之得以大量进入悬浮状态而向下运移,从而增加了两相紊流中的固相部分,使含沙量大幅度升高。

应该指出,前期存贮在河道中的粗泥沙,在数量上是不足以为高含沙水流提供充足的粗泥沙供应的。洪水时发生强烈的河岸侵蚀,可以使前期形成的风成沙坍入河道,并进而为水流所搬运。对于多数河段而言,更多的粗颗粒补给是通过后一种方式得到满足的。

### 4 高含沙水流最优颗粒搭配及其与风力作用的关系

已有的研究表明,在高含沙河水流中,存在着某种最优的颗粒搭配关系,使得其输沙能

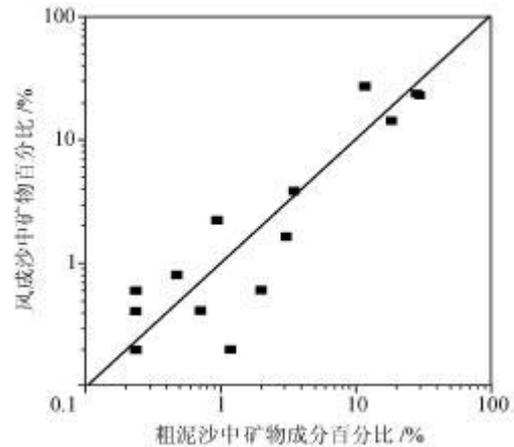


图 5 黄河河道中淤积的粗泥沙中各种矿物成分百分比和风成沙中相应矿物百分比的关系(矿物资料据文献[6])

力为最大. 戴纪岚等人<sup>[8]</sup>以多沙粗沙区皇甫川、秃尾河、窟野河等河流 1971~1975 年间 140 次含沙量在  $300\sim 400\text{ kg/m}^3$  以上的洪水的实测资料, 点绘了悬移质含沙量与小于  $0.01\text{ mm}$  细颗粒含量的关系, 发现在小于  $0.01\text{ mm}$  细颗粒含量为  $4\%\sim 6\%$  时, 含沙量达到最大值. 我们以黄河中游若干支流 1950~1970 年间多年平均资料, 点绘了多年平均含沙量和最大含沙量与悬沙中大于  $0.05\text{ mm}$  含量百分比及小于  $0.01\text{ mm}$  含量百分比的关系(图 6), 同样表现出含沙量的峰值. 这证明, 确实存在着一个最优的悬移质泥沙的组成, 使所形成的高含沙水流具有最大的输沙能力, 因而使侵蚀产沙强度达到最大值. 这是因为, 当粗颗粒很多而细颗粒不足时, 不容易形成具有足够容重的均质浆液, 无法使粗颗粒的水下重量减轻而进入悬浮状态; 反过来, 当细颗粒很多而粗颗粒不足时, 所形成的水流将会很快进入层流状态而发生阻塞. 显然, 在上述两种情形下, 水流的挟沙能力都不会很大. 只有当粗细颗粒处于某种适当的搭配, 才可能出现含沙量的最大值.

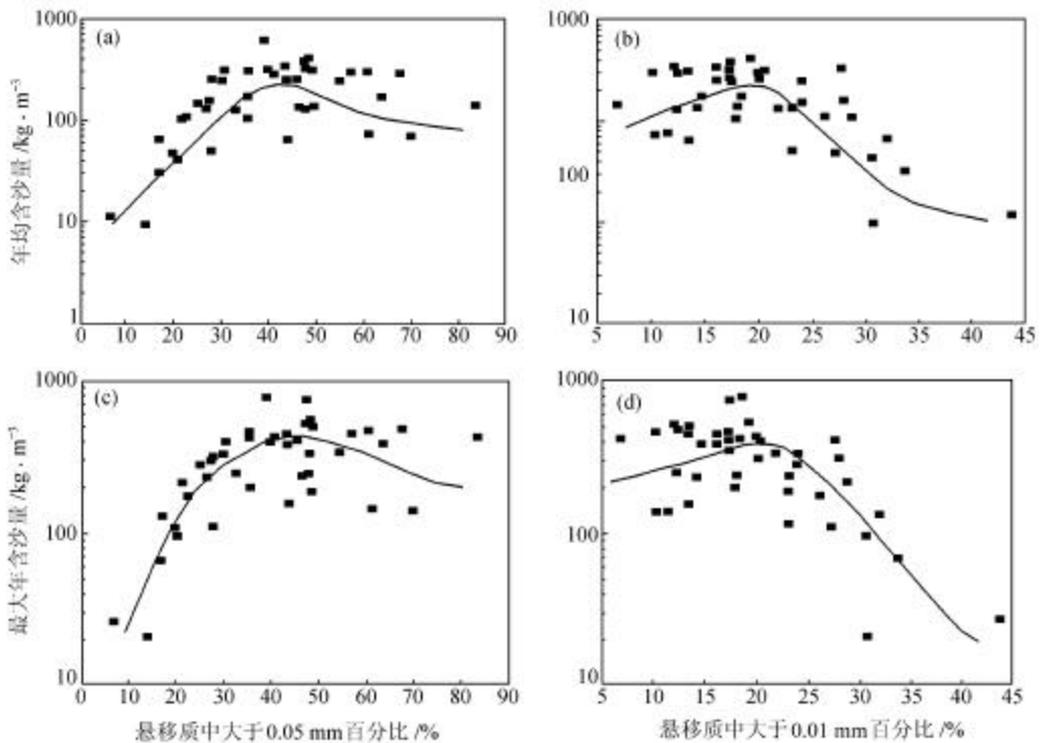


图 6 含沙量与悬移质粒度组成的关系

(a) 年均含沙量与悬移质中大于  $0.05\text{ mm}$  粗泥沙百分比的关系, (b) 年均含沙量与悬移质中小于  $0.01\text{ mm}$  细泥沙百分比的关系, (c) 最大年含沙量与悬移质中大于  $0.05\text{ mm}$  粗泥沙百分比的关系, (d) 最大年含沙量与悬移质中小于  $0.01\text{ mm}$  细泥沙百分比的关系

很显然, 上述最优的颗粒搭配, 正是多沙粗沙区特定的自然地理条件下的产物. 黄土中存在的细颗粒与风成沙、基岩风化物中存在的粗颗粒, 为形成上述最优粗粒搭配提供了可能性; 而这种搭配的出现, 是这一地区特定的风力-水力两相作用的结果. 图 7 中以黄河中游各支流 1950~1970 年间的资料为基础, 点绘了悬移质中大于  $0.05\text{ mm}$  含量百分比、悬移质与黄

土中大于 0.05 mm 含量百分比之差与多年平均沙尘暴日数的关系. 在这里, 悬移质与黄土中大于 0.05 mm 含量百分比之差可以用来表示黄土以外的来源对悬移质中粗泥沙的贡献. 可以看到, 随着沙尘暴日数的增多, 悬移质泥沙明显变粗, 悬沙中非黄土来源补给的粗颗粒含量也增多, 说明了风力作用在图 6 中的悬移质颗粒组成最优搭配中起到了十分重要的作用. 图 7(c) 中点绘了悬移质泥沙与黄土中大于 0.05 mm 百分比之差随纬度的变化, 表现出从南向北逐渐增大的趋势. 这与风力作用按同一方向加强是一致的, 也说明了风力提供了部分粗颗粒泥沙.

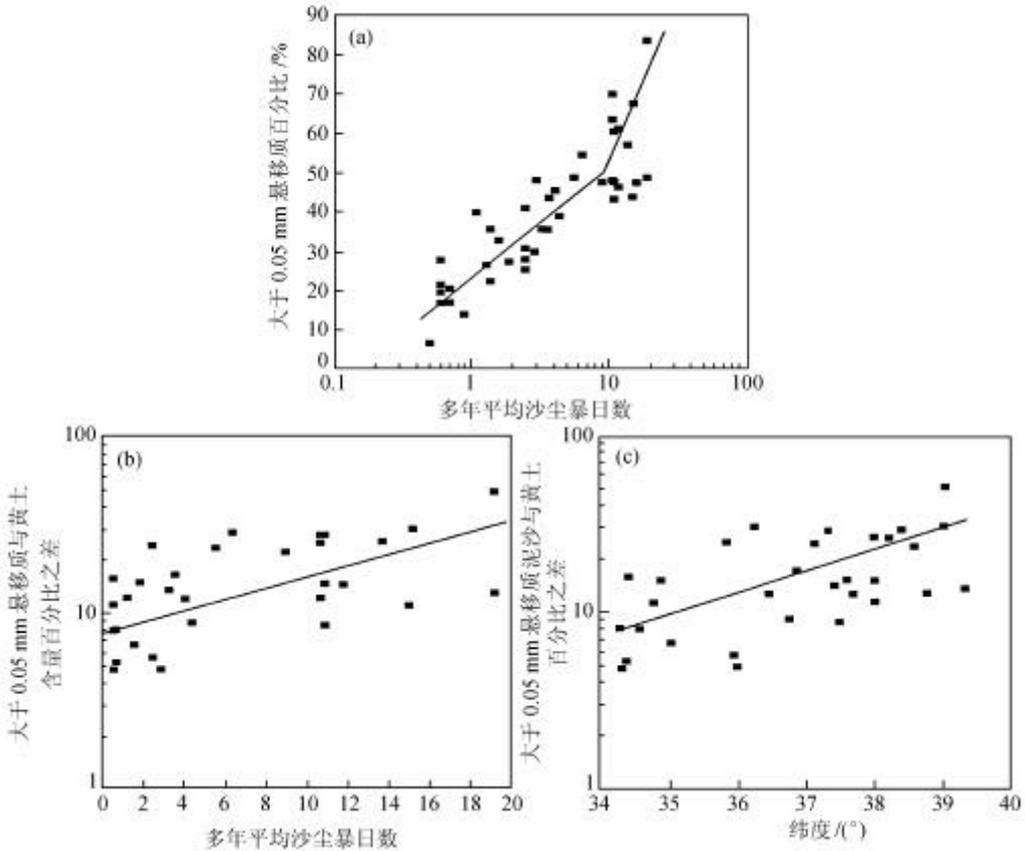


图 7 风力作用对泥沙粒度组成的影响

(a) 悬移质中大于 0.05 mm 含量百分比与多年平均沙尘暴日数的关系, (b) 悬移质与黄土中大于 0.05 mm 含量百分比之差与多年平均沙尘暴日数的关系, (c) 悬移质泥沙与黄土中大于 0.05 mm 百分比之差随纬度的变化

## 5 风水两相作用对侵蚀产沙宏观分布的影响

为了说明空间上的风水交替作用对黄河中游侵蚀产沙宏观分布的影响, 我们以黄河若干支流的资料为基础, 在图 8 中分别点绘了多年平均沙尘暴日数和年降水量与产沙模数的关系. 图中的两条曲线上, 都存在着峰值, 与之对应的是风水交替作用区. 在以风力作用为主的地区和以水力作用为主的地区, 侵蚀产沙强度都不是最高的. 以风力作用为主的地区, 缺乏流水作为泥沙的搬运动力, 故流域产沙模数很低; 以流水作用为主的地区, 主要是半湿润和湿润地

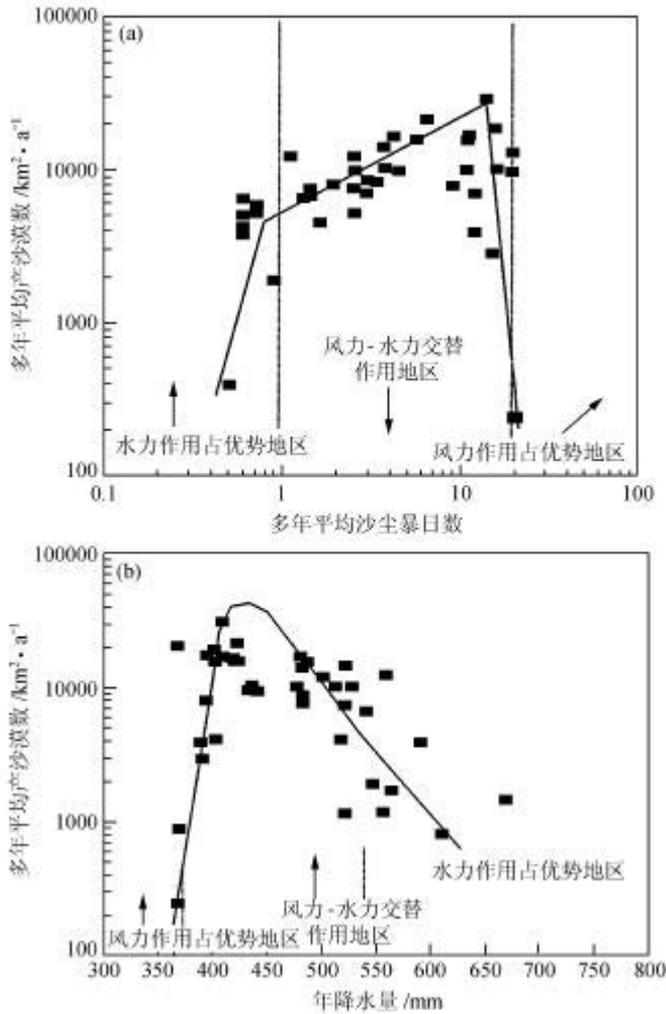


图 8 多年平均沙尘暴日数(a)和年降水量(b)与产沙模数的关系

区, 植被繁茂, 有效地保护了地表物质使之免遭强烈水蚀, 故流域产沙模数也不高. 风水交替作用区, 植被稀疏, 不能有效地保护地表物质; 暴雨强度大, 降雨及径流的侵蚀力也大, 加以黄土、风成沙、基岩风化物的适当搭配, 形成了最有利于泥沙侵蚀输移的高含沙水流, 自然便出现了产沙模数的峰值.

## 6 结论与问题

通过本研究, 可以得到如下结论:

(1) 黄河中游多沙粗沙区存在着特殊的风水两相侵蚀产沙机制, 在此基础上建立的风水两相侵蚀产沙模式, 可以较好地解释这一地区的高强度侵蚀产沙过程.

(2) 这一地区悬移质泥沙中大于 0.05 mm 百分比, 比地表的黄土物质中大于 0.05 mm 百分比高得多; 超过的部分中, 主要来自风成沙和基岩风化物.

(3) 这一地区风力作用的峰值期为 3~6 月, 风力将大量粗颗粒风成沙和部分基岩风化物搬运到沟道、河漫滩和河道中, 并暂时存贮在那里; 7~9 月为流水作用的峰值期, 来自黄土地区的径流含有大量的细粒成分, 形成了高含沙水流中的均质液相, 使前期存贮的粗颗粒泥沙大量悬浮而向下输移, 因此形成了高强度的输沙机制。

(4) 黄河中游多沙粗沙区河流的悬移质泥沙颗粒组成存在着最优的搭配, 使得输沙效率为最高; 这种最优搭配的实现与风水两相作用密切相关。

风水两相侵蚀产沙过程为多沙粗沙区的产沙机理提出了新的解释。但是, 目前还不能定量回答在悬移质泥沙中大于 0.05 mm 的部分中, 各有多少来自风成沙、基岩风化物和黄土中的粗粒部分的问题。为了使认识进一步深化, 需要进一步展开定位观测与示踪研究, 以确定风成沙、基岩风化物和黄土中的粗粒部分对于悬移质中粗泥沙的贡献率, 从而对黄河中游不同类型区的治理提供更为可靠的依据。同时, 由于 80 年代以来位于水力-风力交互作用区的神府和准格尔煤田的大规模开采, 使地表物质受到扰动, 也为冬春风力的搬运和夏季水力的侵蚀搬运提供了大量的物质。关于这种作用对风水两相侵蚀产沙影响的定量研究, 也有待于今后开展。

致谢 野外考察中得到景可教授、张胜利教授的帮助, 特此致谢。

### 参 考 文 献

- 1 陈永宗, 景 可, 蔡强国. 黄土高原现代侵蚀与治理. 北京: 科学出版社, 1988. 1~170
- 2 唐克丽主编. 黄土高原地区土壤侵蚀区域特征及其防治途径. 北京: 中国科学技术出版社, 1990. 1~249
- 3 景 可, 陈永宗, 李凤新. 黄河泥沙与环境. 北京: 科学出版社, 1993. 1~248
- 4 钱 宁主编. 高含沙水流研究. 北京: 清华大学出版社, 1989
- 5 许炳心. 我国流域侵蚀产沙的地带性特征. 科学通报, 1994, 39(11): 1 019~1 022
- 6 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
- 7 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, (7): 26~35
- 8 戴纪岚, 钱 宁. 粒径分布和细颗粒含量对两相管流水力特性的影响. 泥沙研究, 1982, (1): 24~38