

黄土高原地区侵蚀产沙的尺度效应研究初探^{*}

闫云霞^{**} 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;
中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要 以黄河流域水文站的观测数据为基础, 对黄土高原地区产沙模数的尺度效应进行了分区研究. 研究表明, 不同分区的黄土、风沙、基岩的空间分布与组合关系不同、地形(坡度)不同, 其产沙模数随流域面积变化的趋势也不相同, 可以分为单调减小、单调增大、先增大而后减小、先减小而后增大等类型. 在对数据进行双对数转换后, 对上述尺度效应关系进行了线性和二次函数的拟合, 并分别针对这两种函数形式给出了校对方程. 依据所建立的校对方程, 将所有分区内各站点的产沙模数进行了 1000 km² 标准面积的校正以消除尺度的影响. 在此基础上使用 Kriging 插值法制作了消除尺度影响后的产沙模数图, 并将其与未进行尺度校正的产沙模数图进行了分析比较. 结果表明, 经尺度校正后, 重点侵蚀区域的位置大致相同, 但面积显著增大. 这主要是因为, 位于重点侵蚀区河流下游的站点经校正后, 其产沙模数有所增大.

关键词 黄土高原 侵蚀产沙 尺度效应 产沙模数

黄土高原是中国土壤侵蚀的重点研究区域, 学者们使用多种方法对其侵蚀产沙进行了大量研究 [1~5], 但对涉及到的尺度效应问题研究很少. 随着尺度的增大, 泥沙有可能随着地形坡度、河道比降的减缓或各种水利设施的拦截作用而堆积, 也有可能随着洪水的到来而遭受侵蚀, 因此流域尺度对侵蚀产沙的影响不容忽视, 必须考虑尺度转换问题.

Walling 等人 [6~8] 认为产沙模数和流域面积之间呈现线性负相关, Church 和 Slaymaker [9] 发现加拿大一些河流的产沙模数与流域面积之间存在着非线性关

系, 即随着流域面积的增大, 产沙模数先增大, 然后减小. Xu 等 [10] 通过对黄土高原的研究发现, 在宏观意义上, 黄土高原河流的产沙模数和流域面积之间也呈现非线性关系.

编制产沙模数图的传统方法, 是选取若干进行过长系列产沙模数观测的水文站, 确定其所代表的流域或流域区间, 然后通过插值的方法绘出产沙模数等值线. 由于涉及到的流域或流域区间的面积大小不等, 传统的方法实际上隐含着一种假设, 即流域面积的不等不会对产沙模数产生影响, 或其影响可

收稿日期: 2005-06-10; 接受日期: 2005-08-01

^{*} 国家自然科学基金与水利部联合资助重点项目(批准号: 50239080)和国家自然科学基金项目(批准号: 40271019)资助

^{**} E-mail: yanyx@igsrr.ac.cn

以忽略. 然而, 由于编制产沙模数图涉及到的流域面积不等, 前人已发现产沙模数与流域面积之间存在某种函数关系, 故上述隐含的假设是不能成立的. 有鉴于此, 在编制产沙模数图时, 必须考虑到尺度的影响, 并作出某种校正, 即按照尺度效应关系, 将各个流域或流域区间的产沙模数换算到某一标准面积之下的产沙模数, 然后再进行产沙模数的插值计算. Church 等人^[11]按这一思路对加拿大河流的产沙模数及其制图进行了研究. 本文试图在上述研究的基础上, 借鉴 Church 等人的研究方法, 结合黄土高原的实际情况, 对黄土高原的尺度问题进行分区研究, 并对不同分区不同的变化趋势进行深入的分析, 进而对具体的转换方法进行尝试. 在此基础上, 进行了基于尺度效应的产沙模数图的编制试验.

1 研究区域、资料来源与研究方法

1.1 研究区域

本研究的范围为太行山以西、洮河以东、秦岭以北、阴山以南的黄土高原地区^[13]. 遵循流域的完整性、下垫面及降雨条件一致性的原则(由于研究区域过大, 不排除各分区存在着微地貌的差异), 同时借鉴前人对黄土高原划分分区的研究成果^[12-14], 进一步将研究区划分为 7 个分区(图 1):

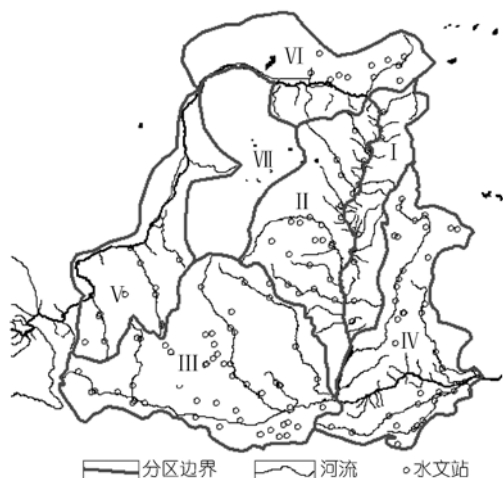


图 1 黄土高原侵蚀产沙尺度效应研究分区及站点分布图

I: 晋西黄河沿岸区域 包括了从托克托到龙门间黄河左岸所有流入黄河干流的支流;

II: 河龙区间黄河右岸 包括北起皇甫川, 南到

仕望川的黄河右岸流入黄河干道的支流, 主要支流有皇甫川、清水河、孤山川、窟野河、秃尾河、佳芦河、无定河、清涧河、延河、汾川河和仕望川;

III: 泾洛渭河区域 包括北洛河、泾河、渭河、千河、横水河及漆水河;

IV: 汾河、伊洛沁河区域 包括汾河、沁河及伊洛河;

V: 祖厉河清水河区域 包括苦水河、汝箕沟、清水河及祖厉河;

VI: 黄河内蒙古河段 包括哈德门沟、西柳沟、昆都仑河、五当沟、大黑河、哈拉沁、水磨沟、什拉乌、水洞沟及美岱沟;

VII: 风沙区 包括河东沙地、毛乌素沙漠、库布齐沙漠及沙漠边缘地带.

由于没有 VII 区的相关数据, 因此本文只对前 6 个区进行研究.

1.2 资料来源

水沙数据来自黄河水利委员会刊印的黄河流域各水文站的观测资料. 本文主要研究自然条件下侵蚀产沙的尺度效应问题, 而黄土高原 20 世纪 70 年代以前人为因素对侵蚀产沙的影响相对较小, 因而使用了“1919~1970 黄河流域水文特征值统计”中的水文站数据. 剔除了少量无代表性的站点, 剔除原则是: ①时间序列不足 5 年; ②受水利工程如水库影响较大, 水库拦沙减小了输沙模数; ③位于风沙区的某些站点, 由于数量过少不能反映规律; ④为避免流域过大、影响因素过多, 还剔除了某些处于河流下游干流上的站点. 基于上述原则, 选取了 148 站点进行分析研究(图 1).

1.3 研究方法

首先利用各站点流量、悬移质含沙量及站点控制的流域面积数据, 计算出各站多年平均产沙模数, 进而将产沙模数和控制的流域面积进行对数转换, 再进行相关分析, 点绘产沙模数(Y_s)和流域面积(A_d)的关系, 在此基础上分析各分区是否存在着尺度效应, 并通过回归计算建立线性的或非线性的 Y_s - A_d 函数关系式. 依据这些关系式, 对存在尺度影响的分区进行

校正,得到校正后的产沙模数数据,然后通过插值制作出消除尺度影响后的产沙模数图。

2 研究结果

2.1 分区尺度效应分析结果

首先对研究区域所有站点进行尺度效应的分析。其中,Ⅳ区域由于黄土厚度的差异 [14],对汾河、伊河、洛河、沁河分别分析。以站点控制的流域面积为横坐标,以产沙模数为纵坐标,将二者的关系点绘在双对数坐标中(图 2)。

从图上看,点子分布比较散乱。将产沙模数和流

域面积的对数转换结果分别进行线性和抛物线拟合, R^2 分别为 0.068 和 0.114,相关系数很低,可见,整个研究区域由于下垫面变化复杂,没有一定的变化趋势,因而我们就每一个分区分别分析。

2.1.1 晋西黄河沿岸区域

本区东部为基岩组成为主的中山和低山,黄土分布于河谷及坡麓低洼处;中部为典型的黄土丘陵;西部沿黄地带为土石丘陵 [15]。考虑到研究区下垫面的一致性,选择的站点主要位于黄土区。按上述原则对本区选取的 11 个站点的尺度关系在双对数纸上点绘如图 3,分析结果见表 1。

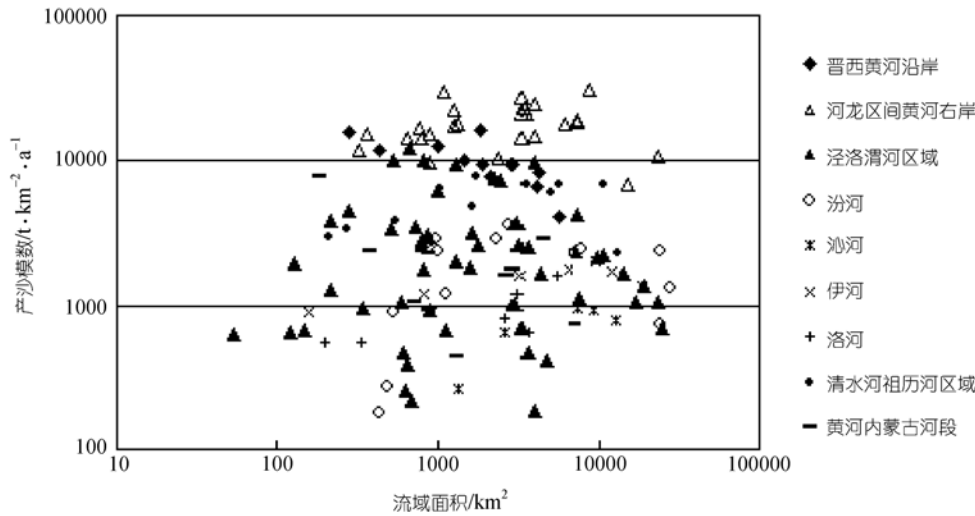


图 2 研究区域所有站点产沙模数与控制的流域面积的关系

表 1 各分区产沙模数的尺度效应统计表 a)

区号	分区名称	R^2	站点数	拟合方程	F	Sig. F	产沙模数与控制面积间的函数关系	b	面积极值
I	晋西黄河沿岸	0.5691	11	$Y = 5.034 - 0.325X$	11.886	0.007	$Y_s = 10^{5.034} A_d^{-0.325}$	-0.325	
II	河龙区间黄河右岸区域	0.4901	25	$Y = 5.193 - 0.321X$	22.104	0.000	$Y_s = 10^{5.193} A_d^{-0.321}$	-0.321	
III	泾洛渭河区域	0.3866	52	$Y = 0.574X + 1.519$	31.516	0.000	$Y_s = 10^{1.519} A_d^{0.574}$	0.574	
IV	汾河	0.6917	14	$Y = -0.92X^2 + 6.78X - 8.99$	12.34	0.0015	$\lg Y_s = -0.92 \lg^2 A_d + 6.78 \lg A_d - 8.99$		4839
		0.6525	4	$Y = 0.308X + 2.654$	3.755	0.1920	$Y_s = 10^{2.654} A_d^{0.308}$	0.308	
	沁河	0.9997	5	$Y = -1.21X^2 + 9.22X - 14.6$	3088.629	0.0003	$\lg Y_s = -1.21 \lg^2 A_d + 9.22 \lg A_d - 14.6$		6455
	伊河	0.8175	7	$Y = -0.1X^2 + 0.78X - 0.7$	8.962	0.0333	$\lg Y_s = -0.1 \lg^2 A_d + 0.78 \lg A_d - 0.7$		7943
	洛河	0.588	6	$Y = 0.244X^2 + 2.141$	5.717	0.0750	$Y_s = 10^{2.141} A_d^{0.244}$	0.244	
V	祖厉河清水河区域	0.4249	13	$Y = -0.43X^2 + 2.84X - 0.87$	3.69	0.0629	$\lg Y_s = -0.43 \lg^2 A_d + 2.84 \lg A_d - 0.87$		2006
VI	黄河内蒙古河段	0.4695	11	$Y = 0.79X^2 - 5.17X + 11.47$	3.54	0.0792	$\lg Y_s = -0.79 \lg^2 A_d + 5.17 \lg A_d + 11.47$		1871

a) 表中: $X = \lg A_d$, $Y = \lg Y_s$; A_d : 站点控制的流域面积; Y_s : 产沙模数; b : 尺度指数 [11]

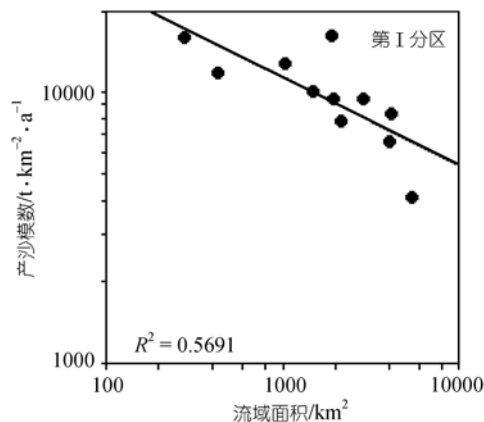


图3 第 I 分区产沙模数与流域面积的关系

本区产沙模数随流域面积的增大呈现单调减小的趋势, 可以从两方面予以解释: 一方面是由于泥沙来源的影响. 由于站点主要分布在河流的中下游, 黄土厚度自中游向下游呈现由厚到薄的变化, 因而侵蚀带来的泥沙也减少. 另一方面是由于泥沙在输移过程中, 随着河谷展宽, 比降减缓, 泥沙在河流中下游发生淤积可能性增大, 同时, 本区属于多沙粗沙区, 上游来沙较粗, 随着比降降低, 粗颗粒泥沙容易淤积 [16], 而位于河流上游基岩区站点非常少, 因此很难揭示整个流域产沙模数变化规律. 但假设上游有足够多站点, 产沙模数应该有一个先增大再减小过程.

2.1.2 河龙区间黄河右岸区域

本区的地表形态可分为 3 种: 晋陕蒙接壤地区的砒砂岩区, 研究区西北部的风沙区, 其余为黄土区 [13]. 本区选择的站点大部分位于黄土区, 因而本区尺度效应主要揭示的是黄土区的变化规律. 本区的 25 个站点的点绘结果如图 4, 分析结果见表 1.

本区产沙模数随流域面积的增大呈现单调减小的趋势. 由于河流上游多处于风沙区或砒砂岩区, 带来了大量的粗泥沙. 据许炯心 [17] 的研究表明 >0.05 mm 的粗泥沙颗粒的百分比大于 40%, <0.01 mm 百分比小于 20% 是高含沙水流的最优粒度组成. 来自上游的粗泥沙可与黄土侵蚀形成的细颗粒泥沙的组合, 使这里极易形成高含沙水流, 使得本区侵蚀强度极大. 该区大部分河流中游已有大面积的基岩出露,

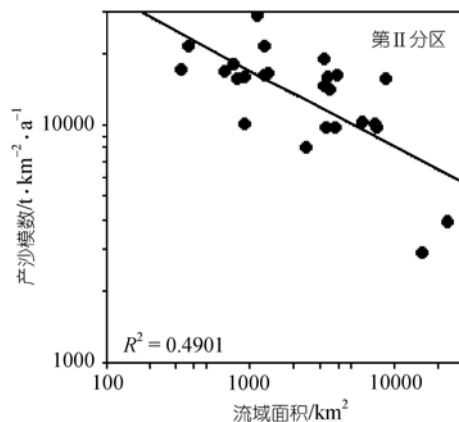


图4 第 II 分区产沙模数与流域面积的关系

干支流谷底宽广, 比降减缓, 因而上游剧烈侵蚀带来的大量泥沙, 到中游开始在河漫滩淤积. 本区河流下游干支流均深切入基岩内, 因而来自河岸边壁崩塌带来的泥沙减少. 这些原因造成了产沙模数随流域面积增大而减小.

2.1.3 泾洛渭河区域

按上述原则对本区选取的 52 个站点的点绘结果如图 5, 分析结果见表 1.

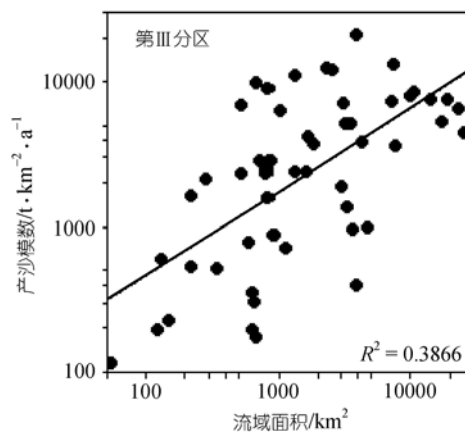


图5 第 III 分区产沙模数与流域面积的关系

本区产沙模数随流域面积的增大呈现单调上升的趋势. 造成这种变化趋势的原因主要有两个方面. 一是泥沙来源增加, 这与黄土厚度和侵蚀方式有关. 本区的站点主要分布于河流的中上游, 黄土厚度变化表现为由薄变厚, 同时, 随着黄土厚度的增加, 滑坡与崩塌等侵蚀活动显著 [5,14], 都导致侵蚀模数随流

域面积的增大而增大。二是泥沙的输移的沿程变化。相对前两个分区, 该研究区的河流宽深比相对小, 河道窄深, 容易满足高含沙水流稳定输送的条件^[18,19], 也是造成其产沙模数随流域面积增大而增大的一个因素。然而, 这种增大并不是无限制的, 当渭河进入中下游平原, 泾河下游进入冲积平原区, 泥沙也是不断淤积的, 因而产沙模数略有减小^[10]。

2.1.4 汾河、伊洛沁河区域

由于本区分布的黄土厚度有一定差异, 因而再分为 5 个亚区, 分别进行分析。根据下垫面的差异, 汾河流域各站点分为两类, 一类控制区既有黄土也有基岩, 包括 15 个站点; 一类完全是黄土, 包括 4 个站点。点绘结果如图 6。伊河、洛河和沁河各自成为一个亚区, 剔除受局部下垫面影响过大的站点后, 其尺度关系分别点绘在图 6 中。分析结果见表 1。

汾河支流主要发源于两侧的石质山地, 后流经黄土分布区域, 纳入汾河干流^[15]。控制面积小于 5000 km² 的站点主要位于支流, 而大于 5000 km² 的站点主要位于干流。产沙模数先随流域面积的增大而增大的主要原因是, 位于汾河支流的站点, 随着控制面积的增大, 流域中的黄土面积增大, 侵蚀强度增大, 故产沙模数增大; 进入干流后, 由于河谷宽展, 河漫滩发育, 泥沙开始淤积, 因而大于 5000 km² 后产沙模数又随着流域面积增大而减小。黄土区的站点都位于汾河的支流上, 虽然只有 4 个站点, 可能不足以反映其变化规律, 但仍显示出随着区域面积的增大, 产沙模数增大的趋势。

伊洛河和沁河的黄土分布形式相似, 河流的支流主要发源于基岩区, 从上游向下游黄土分布面积越来越大, 到下游进入冲积平原区^[15,20]。这与位于基岩-黄土区的汾河干支流相似。伊河和沁河出现产沙模数先随流域面积先增大再减小的尺度关系, 也可以用同样的原因来解释。洛河之所以出现不同的变化趋势, 是因为在其与伊河汇合后的淤积河段上无站点, 未能体现产沙模数的减小。

2.1.5 祖厉河清水河区域

对该区 15 个站点的点绘结果如图 7, 分析结果见表 1。

本区产沙模数先随流域面积的增大而增大, 达

到峰值后又随流域面积的增大而减小。河流多发源于基岩山地, 上游地区黄土面积小、厚度薄。由上游向下游, 黄土分布逐渐变厚, 故产沙模数随流域面积的增大而增大。河流的下游进入冲积平原区, 来自上中游的泥沙发生淤积, 使得产沙模数随流域面积的进一步增大而减小。

2.1.6 黄河内蒙古河段

本区 11 个站点的点绘结果如图 8, 分析结果见表 1。

本区产沙模数先随流域面积增大而减小, 因为河流主要发源于基岩区, 由上游向下游河流坡度逐渐变缓, 侵蚀减弱, 因而产沙模数降低; 河流中下游出现非黄土类土^[19], 很容易被侵蚀, 因而进入该区域后, 产沙模数随流域面积的增大而增大。

2.2 尺度效应的校正方法及产沙模数图的制作

2.2.1 尺度效应校正方法

从上述分析可以看出, 黄土高原的产沙模数计算过程中存在着尺度效应, 因而在进行产沙模数制图时, 需要将产沙模数校正到相同的尺度下(如 100, 1000 km² 等), 以消除尺度效应的影响。由表 1 可以看出, 第 I ~ III 分区符合尺度效应的一般规律^[11]: $Y_s = K_s A_d^b$, 经对数转换的产沙模数和站点控制的流域面积可进行线性拟合, 第 IV ~ VI 分区变化相对复杂, 除线性相关外, 还表现为抛物线型的二次函数关系。因而分别针对线性和二次函数两种函数关系给出校正方法。

(1) 线性函数的校正方法(图 9)。假设拟合方程为 $Y = AX + B$, 对某一个站点数据(x_1, y_1), 其校正后的计算方程为 $Y' = AX' + B'$, 则 $B' = y_1 - Ax_1$, 站点方程转换为: $Y = AX' + y_1 - Ax_1$, 由于 $X' = \lg A_d$, $Y' = \lg Y_s$, 实际的产沙模数 $Y_s = 10^{(\lg A_d + y_1 - Ax_1)}$, 当水文站控制的流域面积 A_d 取不同的值(如 1, 100, 10000 km² 等), 得到相应的校正后的产沙模数, 如 $A_d = 1 \text{ km}^2$, $Y_s = 10^{(y_1 - Ax_1)}$ 。

(2) 二次函数的校正方法(图 9)。假设二次方程的拟合方程为 $Y = AX^2 + BX + C$, 需要校正的某站点的实际数据为(x_1, y_1), 校正方程为 $Y' = AX'^2 + BX' + C'$, 则 $C' = y_1 - (Ax_1^2 + Bx_1)$, 校正方程转换为 $Y' = AX'^2 + BX' +$

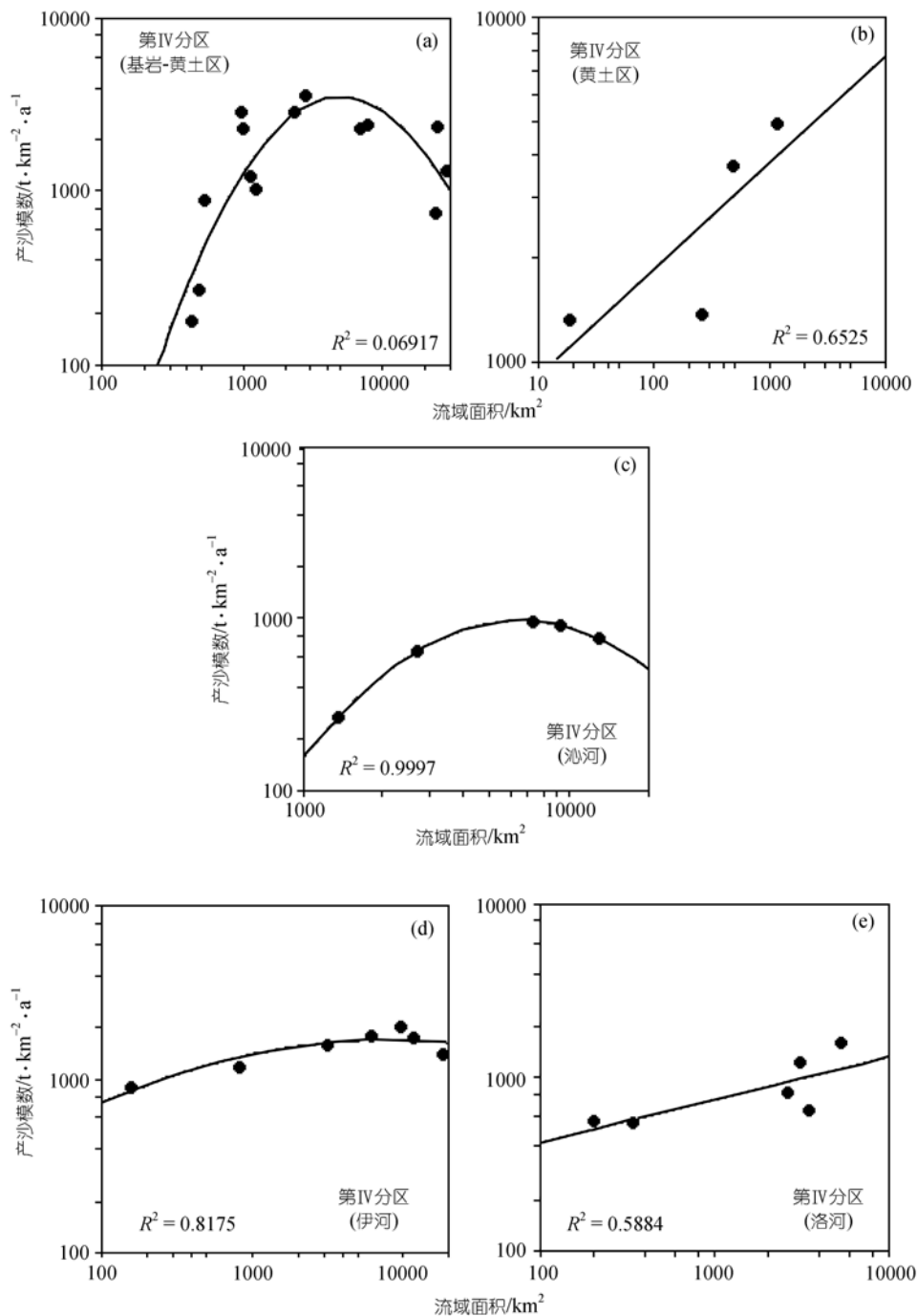


图 6 第IV分区产沙模数与流域面积的关系

(a) 第IV分区汾河流域中控制区既有基岩又有黄土的站点的产沙模数与流域面积的关系; (b) 第IV分区汾河中控制区完全为黄土的站点产沙模数与流域面积的关系; (c) 第IV分区沁河站点产沙模数与流域面积的关系; (d) 第IV分区伊河站点产沙模数与流域面积的关系; (e) 第IV分区洛河站点产沙模数与流域面积的关系

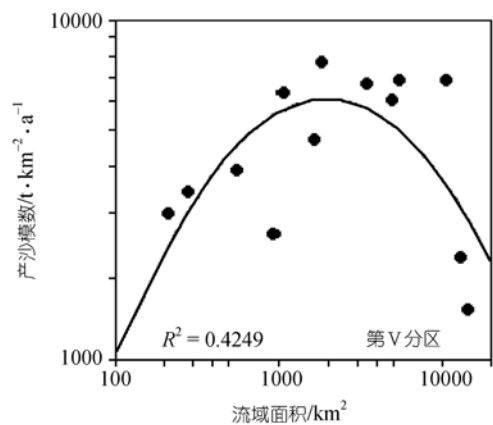


图 7 第 V 分区产沙模数与流域面积的关系

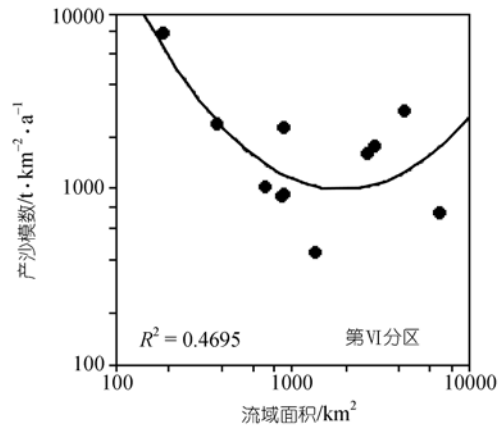


图 8 第 VI 分区产沙模数与流域面积的关系

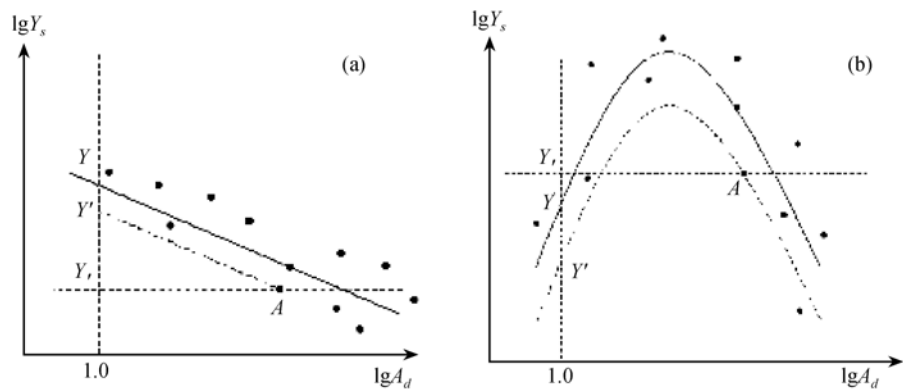


图 9 尺度校正过程演示图
(a) 线性; (b) 二次函数

$(y_1 - Ax_1^2 + Bx_1)$, 则 $Y_s = 10^{(A \lg^2 A_d + B \lg A_d + y_1 - Ax_1^2 - Bx_1)}$, 当 $A_d = 1 \text{ km}^2$, $Y_s = 10^{(y_1 - Ax_1^2 - Bx_1)}$.

2.2.2 产沙模数图的制作

根据上述校正方法，将各分区的产沙模数校正到标准面积下，进而使用空间插值法制作研究区域的产沙模数图。当数据在某个距离内或某个方向上相关，能够反映一定的空间变化趋势时，Kriging空间插值法是最好的选择 [21]。由于各个分区包括的站点面积范围不同，拟合方程不同，因而最佳的拟合区域也不同。我们选择了对各个区域的拟合误差比较小的 1000 km^2 作为标准面积，使用普通Kriging插值法制作出整个研究区域的产沙模数图(图 10)。

从图中可以很明显地看出 3 个极剧烈侵蚀中

心 [3] ($>20000 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$): (1) 黄甫川、孤山川中下游地区; (2) 窟野河、秃尾河、佳芦河中下游地区; (3) 无定河、清涧河中下游地区。

上述 3 个极剧烈侵蚀中心皆处于年降水为 $400 \sim 450 \text{ mm}$ 的降雨带上，符合Langbein-Schumm关系 [22]。许炯心 [23,24] 对上述现象通过由降雨决定的侵蚀力与由植被保护作用所决定的抗蚀能力的相互作用进行了解释。上述降雨带对应的是半干旱向半湿润气候的过渡带，植被则由草原向森林草原过渡。这一区域暴雨比较集中，可以产生相当强的侵蚀力，而地表植被由并不茂盛的草本植物组成，抗蚀力很弱，使本区成为侵蚀产沙的高值区。由本区向东南方向，随着降雨的增加，植被对底部的保护作用增强，产沙模数减小；向西北方向，因降雨侵蚀力已变得非常微弱，即

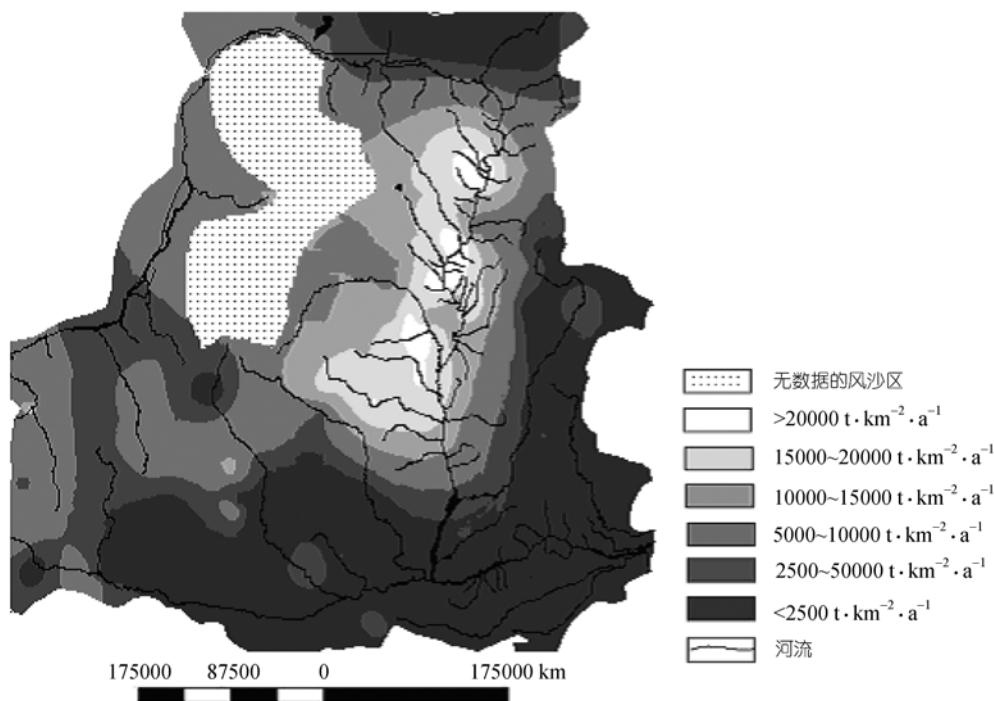


图 10 校正到 1000 km^2 标准面积下的产沙模数图

使地表覆盖甚差,也不足以有效地移动和搬运地表物质,故侵蚀产沙模数减小。同时,3个侵蚀中心都位于多沙粗沙区,是高含沙水流的重点发生区域。据许炯心的研究,黄河中游的高强度产沙与高含沙水流的作用密切相关,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^[17]。在黄土高原高含沙水流中,小于 0.01 mm 的颗粒呈絮凝结构的液相;而大于 0.05 mm 的粗颗粒作为固相悬浮于其中。当 $>0.05 \text{ mm}$ 百分比大于 40%, $<0.01 \text{ mm}$ 百分比小于 20% 时,是使该地区高含沙水流含沙量达到最大的最优粒度组成。这几个侵蚀中心的地表物质组成为高含沙水流的形成提供了条件,所不同的是前两个侵蚀中心的粗泥沙有砒砂岩和风成沙两种来源,而第三个侵蚀中心的粗泥沙则主要来自于风成沙。另外,上述 3 个侵蚀中心都处于黄河中游的风水转换区,风力、水力、重力侵蚀都很活跃^[25]。

使用 Kriging 插值方法对未经校正的各个站点的产沙模数进行插值,得到未经尺度校正的产沙模数图(图 11)。比较图 10, 11 可以看出,极强烈侵蚀产沙

中心($>10000 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)无论是校正前、后都处于黄河中游的河龙区间,这一区域既是多沙粗沙区,又是高含沙水流的主要形成区域^[23,24],是黄河流域泥沙治理的重点区域。与校正前的产沙模数图相比,校正后比较显著的差异是,从极强烈侵蚀中心到极剧烈侵蚀中心的面积都显著增大,这主要是由于通过尺度校正之后,位于该区域的河流下游的站点,其产沙模数有所增大。

3 小结

对各分区的研究表明,在产沙模数与流域面积的关系中,存在着尺度的影响。经对数转换后的产沙模数与流域面积的关系,表现为四种形式:单调递减,如第 I 分区的晋西黄河流域,第 II 分区的河龙区间黄河右岸;单调递增,如第 III 分区的泾渭河区域;先增大后减小,如第 V 分区的祖厉河清水河区域;先减小后增大,如第 VI 分区的黄河内蒙古河段。上述变化一方面与各个分区地表物质的性质的变化即黄土、风沙、基岩的空间分布与组合关系相关,同时还与由地形(坡度)的变化等方面决定的泥沙的输移条件

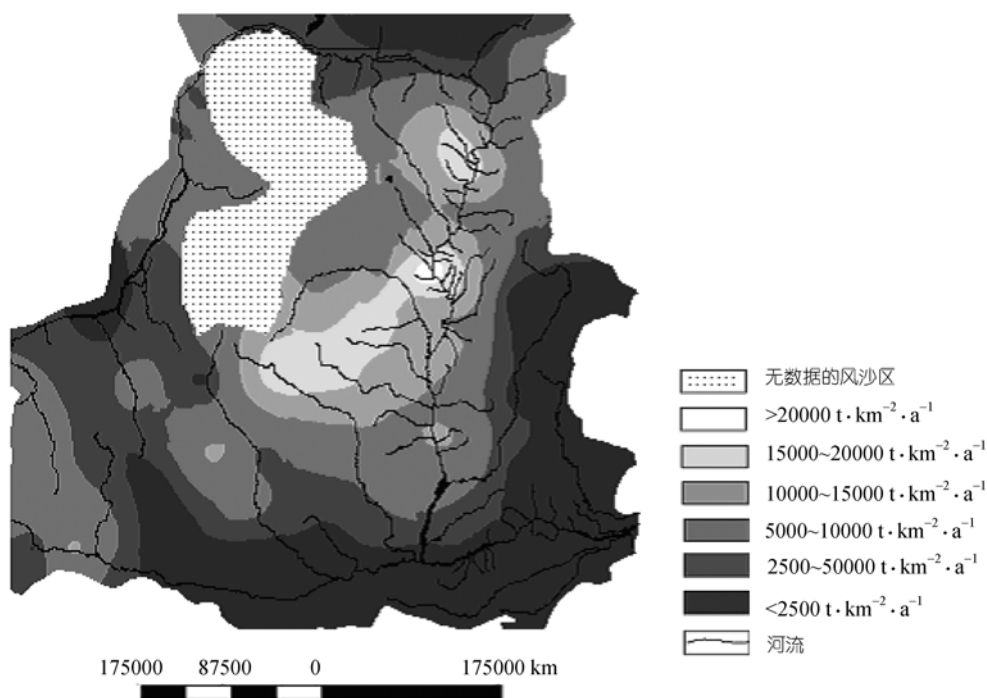


图 11 未经校正的产沙模数图

密切相关。

在上述分区中有些满足传统的尺度关系规律： $Y_s = K_s A_d^b$ ，如第 I~III 分区，经过双对数转换后表现为线性相关， $Y = AX + B$ ($X = \lg A_d$ ， $Y = \lg Y_s$)，而有些分区经双对数转换后则满足二次函数关系，即 $Y = AX^2 + BX + C$ 。对上述两种尺度效应关系式，本文均给出了校正方法。

为消除尺度的影响，尝试制作了标准面积为 1000 km² 产沙模数图，并与未进行尺度校正的产沙模数图进行了比较。消除尺度影响后，极剧烈侵蚀区 (>20000 t·km⁻²·a⁻¹) 的面积增大了，但都位于 400~450 mm 的降雨带上，这可以用由降雨决定的侵蚀力与由植被保护作用所决定的抗蚀能力的相互作用来解释。同时由地表物质组成、侵蚀方式决定，这个区域也是高含沙水流的重点发生区域，是急需治理的多沙粗沙区。通过尺度校正，极强烈侵蚀产沙中心 (>10000 t·km⁻²·a⁻¹) 仍位于河龙区间，但其面积显著增大，这主要是因为通过尺度校正之后，位于河流中下游的站点的产沙模数有所增大。

参 考 文 献

- 1 景可, 陈永宗, 李凤新. 黄河泥沙与环境. 北京: 科学出版社, 1993. 79—106
- 2 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. 157—169
- 3 唐克丽主编. 黄土高原地区土壤侵蚀区域特征及综合治理途径. 北京: 中国科学技术出版社, 1991. 53—91
- 4 张宗祜主编. 黄土高原区域环境地质问题及治理. 北京: 科学出版社, 1996. 60—105
- 5 陈浩. 黄土丘陵沟壑区流域系统侵蚀与产沙关系. 地理学报, 2000, 55(3): 354—363
- 6 Walling D E. The sediment delivery problem. J Hydrol, 1983, 65(1-3): 209—237[DOI]
- 7 Morris G L, Fan J. Reservoir Sedimentation Handbook. New York: McGraw-Hill, 1997. 7.1—7.43
- 8 Owens P, Slaymaker O. Late Holocene sediment yields in small alpine and subalpine drainage basins. British Columbia, IASH Publications No. 209, 1992. 147—154
- 9 Church M, Slaymaker O. Disequilibrium of Holocene sediment yield in glaciated British Columbia. Nature, 1989, 337(6206): 452—454[DOI]
- 10 Xu J X, Yan Y X. Scale effects on specific sediment yield in the Yellow River basin and geomorphological explanations. J Hydrol, 2005, 307(1-4): 219—232[DOI]
- 11 Church M, Ham D, Hassan M A, et al. Fluvial clastic sediment

- yield in Canada: scale analysis. *Can J Earth Sci*, 1999, 36(1): 1267—1280[DOI]
- 12 水利部黄河水利委员会编. 黄河流域地图集. 北京: 中国地图出版社, 1989. 265—354
- 13 黄秉维. 编制黄河中游流域土壤侵蚀分区图的经验教训. *科学通报*, 1955, (12): 15—21
- 14 陕西省地质矿产局第二水文地质队. 黄河中游区域工程地质. 附图: 黄河中游黄土分布图. 北京: 地质出版社, 1986. 1—267
- 15 中国科学院黄河中游水土保持综合考察队中国科学院地质研究所编辑. 黄河中游第四纪地质调查报告. 北京: 科学出版社, 1962. 1—22, 169—220
- 16 徐建华, 李雪梅, 张培德, 等. 黄河粗泥沙界线与中游多沙粗沙区区域研究. *泥沙研究*, 1998, (4): 36—46
- 17 许炯心. 黄河中游多沙粗沙区高含沙水流的粒度组成及其地貌学意义. *泥沙研究*, 1999, 5(5): 13—17
- 18 张仁, 钱宁, 蔡体录. 高含沙水流长距离输送条件的分析. *泥沙研究*, 1982, (3): 1—12
- 19 Xu J X. Erosion caused by hyperconcentrated flow on the Loess Plateau of China. *Catena*, 1999, 36(1-2): 1—19[DOI]
- 20 李英明, 潘车峰主编. 山西河流. 北京: 科学出版社, 2004. 25—41, 234—245
- 21 苏姝, 林爱文, 刘庆华. 普通 Kriging 法在空间内插中的运用. *江南大学学报(自然科学版)*, 2004, 3(1): 18—21
- 22 Langbein L B, Schumm S A. Yield of sediment in relation to mean annual precipitation. *Trans Am Geophys Union*, 1958, 39(6): 1076—1084
- 23 许炯心. 黄河中游多沙粗沙区的风水雨相侵蚀产沙过程. *中国科学, D 辑*, 2000, 30(5): 540—548
- 24 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): 318—326
- 25 许炯心. 中国不同自然带的河流过程的比较研究. 北京: 科学出版社, 1996. 95—104