

877986

中国科学院院内科学基金资助项目

5111

7533

究出

黄河粗泥沙来源及 侵蚀产沙机理研究文集

陈永宗 主编

111

533

究出

科学出版社

中国科学院院内科学基金资助项目

黄河粗泥沙来源及 侵蚀产沙机理研究文集

陈永宗 主编

科学出版社

内 容 简 介

本文集的14篇论文,分别讨论了黄土高原侵蚀产沙历史、全新世环境演变、坡地侵蚀过程、黄河粗泥沙来源及输移和北京燕山地区流域产沙规律,还简要介绍了室内人工模拟降雨装置和自制测流测沙仪器特点。各篇文章的实际材料丰富,理论分析深入,可供水利、水土保持、地学、环境科学工作者和大专院校有关专业师生参考。

黄河粗泥沙来源及 侵蚀产沙机理研究文集

陈永宗 主编

责任编辑 潘根娣

气象出版社出版

(北京西郊白石桥路46号)

中国科学技术情报研究所印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 全国各地新华书店经售

开本787×1092 1/16 印张 9.5 字数 231千字

1989年2月第一版 1989年2月第一次印刷

印数 1—700 定价 4.50元

ISBN 7-5029-0200-7/P·0125

前 言

黄河象一条金色的巨龙躺卧在祖国的大地上，以她甘美的乳汁孕育了我国灿烂的古代文化；她又象一条吼哮的蛟龙不断迁徙改道，吞噬了无数田园庄舍，给中国人民带来了深重的灾难，成为闻名于世的害河。

为了征服黄河、除害兴利，千百年来中国人民对她的特性和治理途径进行了长期探索。从王景的“宽河行洪”到潘季驯的“束水攻沙”以及近代治河专家的宽河、固堤、定槽，多把目光集中在下游河道整治上。自从北宋沈括指出黄河害在下游因在中游以后，徐贞明、周用和胡定等人又相继提出“正本清源”、“汰沙澄源”等治河方略，限于当时的条件，这些卓越的见解未能付诸实践。人民治黄以来，博采古今中外众家之长，丰富和发展了治黄思想，实行了综合治理方针，取得了很大成绩。但是，黄河至今尚未驯服，黄河问题仍然是中国最大的环境问题。

黄河的特点是水少沙多，治黄的要害是如何处理好泥沙，当前的中心任务是防止洪水泛滥成灾。黄河泥沙主要来自中游黄土高原，防治黄土高原土壤侵蚀乃是治黄之本。

黄土高原的水土保持是一项十分复杂而又艰巨的工作。它涉及到自然和社会经济的各个方面，必须要有长期奋斗的思想准备和扎实的理论基础。

1985至1988年，我们在中国科学院科学基金的资助下，开展了黄河粗泥沙来源和侵蚀产沙机制研究，目的是探寻黄河水沙的产生和运行规律，为治黄决策提供科学依据。这本文集就是这项研究的部分成果。文集的内容大致有三类：第一类是探讨黄土高原侵蚀产沙的历史过程；第二类是分析黄河粗泥沙来源和输移规律；第三类是研究流域侵蚀产沙机制。从这些文章涉及的内容和采用的研究方法可以看出，我们是力图把侵蚀产沙的历史过程和现代过程联系起来、把流域侵蚀产沙和河道输沙联系起来、把影响侵蚀产沙的自然因素和人为因素结合起来，从宏观分析到微观研究，从野外调查到室内外人工模拟实验，多方面和多途径地进行综合研究。尽管文集中有些文章的科学结论有待进一步提高和验证，我们仍保持作者原意，将它付印，以期得到国内外同行的批评和指正，使我们日后为治黄服务的科学研究工作做得更好些。

文集中包括了北京燕山地区的两篇论文，目的是把它们作为研究黄河泥沙问题的参考。

这本文集是中国科学院地理研究所地貌研究室侵蚀地貌组计划系统研究我国北方多沙河流侵蚀产沙规律的第一批成果。随着研究工作进展，今后还将陆续编辑出版类似成果。这个想法希望得到广大水土保持和河流泥沙科技工作者的大力支持。

陈 永 宗

中国科学院地理研究所

1988年

20514/06

目 录

前 言

1. 黄河粗泥沙来源及近期变化.....陈永宗 景 可 (1)
2. 黄土高原泥沙输移比的研究.....景 可 (14)
3. 坡度影响坡面产流、产沙过程的试验研究.....陈 浩 蔡强国 (27)
4. 植被覆盖对降雨溅蚀的影响.....蔡强国 陈 浩 (41)
5. 降雨历时和前期土壤含水量对溅蚀的影响.....蔡强国 陈 浩 (48)
6. 表土结皮在溅蚀和坡面侵蚀过程中的作用.....蔡强国 陈 浩 陆兆熊 (57)
7. 黄土高原黄土地貌发育历史及其与现代侵蚀的关系.....陈永宗 (65)
8. 黄土高原全新世环境变迁及其国土整治意义.....陈永宗 (75)
6. 陕北洛川地区沟道侵蚀与发育.....张勋昌 (83)
10. 黄土地区重力侵蚀发生的内部条件及地貌临界值分析朱同新 (100)
11. 燕山地区流域产沙与流域形态的初步分析卢金发 (112)
12. 燕山地区流域形态量计研究——以潮白河流域为例卢金发 (122)

附 录

- I. 室内人工模拟降雨实验装置系统侵蚀地貌组 (136)
- II. 室内人工模拟降雨冲刷实验水沙自动取样称重装置系统介绍
..... 张盛元 陈 浩 蔡强国 (140)

黄河粗泥沙来源及近期变化

陈永宗 景 可

黄河泥沙中粒径大于0.05毫米的“粗泥沙”对下游河道为害最大。70年代末,龚时扬等^[1]认为粗泥沙主要来自晋西、陕北、陇东和内蒙古南部黄土高原的11.4万平方公里区域;钱宁等^[2]也认为这些地区来水来沙对黄河下游河道淤积影响最大。近年,景可^[3]确定的粗泥沙产沙面积约15.8万平方公里,其中又集中于8.0万平方公里区域;他还分析了基岩地层的粗泥沙产量。

本文在前人和前期工作基础上,重点分析粗泥沙的产沙过程和近期变化。

一、粗泥沙输移量和主要产沙区

黄河龙门站,渭河华县站,北洛河淤头站和汾河河津站(下文简称四站)1983年以前的平均悬移泥沙输移量为15.658亿吨,其中粗泥沙量5.51亿吨,平均粗泥沙模数824.8吨/平方公里·年(表1)。黄土高原各地的粗泥沙来量差异很大,头道拐(或河口镇)以上流域(祖厉河流域除外)和汾河流域小于四站平均数;大理河、清涧河、延河、湫水河和北洛河(金佛坪以上流域),在4000吨/平方公里·年以上;皇甫川、窟野河、孤山川、佳芦河等都在8000吨/平方公里·年以上。粗泥沙模数小于四站平均数的区域,其总量仅占四站粗泥沙量的5.9%,它对黄河下游河道淤积影响是不大的。因此,可以将粗泥沙模数大于825.0吨/平方公里·年作为确定黄河粗泥沙主要来源区的标准之一。

含沙量高低对水流粘滞性产生显著影响,从而影响水流的挟沙能力,因而粗泥沙的输移特点与水流含沙量的关系密切。分析实测资料表明,水流含沙量较高的河流,其泥沙粒度组成普遍较粗。含沙量和流量的对比关系(来沙系数)直接影响黄河下流河道的淤积强度。据分析¹⁾,黄河花园口至利津河段历年来沙系数中小于0.014公斤·秒/立方米者多发生冲刷,大于此数则发生淤积,大于0.033公斤·秒/立方米的淤积量多达8.0亿吨以上(1970年和1977年)。所以我们将来沙系数作为确定黄河粗泥沙主要来源区的另一个标准。表1中粗泥沙模数小于四站平均数流域的来沙系数都在1.0公斤·秒/立方米以下。渭河华县的来沙系数0.3455公斤·秒/立方米,粗泥沙模数885.4吨/平方公里·年。这是因为该站的粗泥沙主要来自上游南河川站和泾河张家山站,计算粗泥沙来源区面积时只用这两个站的控制面积。

根据以上两个标准,黄河粗泥沙主要来源区是河口镇至龙门区间,北洛河淤头站和泾河张家山站,渭河南河川站以上流域及祖厉河流域(图1),总面积约21万平方公里,其粗泥沙量占四站总量的94.4%;其中的河口镇至龙门区间、北洛河(金佛坪以上流域)、周河流域

1) 叶青超等,黄河下游河道的发育过程和人工改道可行性研究,1984年。

表1 黄河中游干流及主要支流粗泥沙量统计表

Tab.1 The coarse silt of middle reaches of the Yellow River

河名 和站名	项 目	流域面积 (km ²)	输沙量 (10 ⁸ t)	来沙系数 (kg·s/m ³)	粗泥沙 含 量 (%)	粗 泥 沙 输 移 量		
						10 ⁸ t	t/km ² ·a	占四站 (%)
洮河·红旗		24 973	0.2533	0.0322	33.6	0.0851	340.8	1.5
湟水·民和		15 342	0.1934	0.0061	34.2	0.0661	340.8	1.2
祖厉河·靖远		10 647	0.5935	58.5469	24.4	0.1448	1 360.0	2.6
黄河·头道拐		367 898	1.4639	0.0068	26.9	0.3938	107.0	7.1
皇甫川·皇甫		3 199	0.5366	51.4851	62.0	0.3327	10 406.6	6.0
孤山川·高石崖		1 263	0.2516	80.3681	52.9	0.1331	10 538.4	2.4
窟野河·温家川		8 645	1.2223	7.3418	59.1	0.7224	8 356.3	13.1
秃尾河·高家川		3 253	0.3176	5.0543	66.8	0.2121	6 521.9	3.9
佳芦河·申家湾		1 121	0.1994	92.1986	54.7	0.1091	9 732.4	2.0
无定河·赵石窖		15 329	0.2649	2.7158	54.2	0.1436	936.8	2.6
无定河·川口*		30 217	1.4988	2.511	46.9	0.7029	2 326.2	12.8
大理河·绥德		3 893	0.4093	57.20	45.7	0.1871	4 806.1	3.4
清涧河·延川		3 468	0.4001	62.1564	37.5	0.1500	4 325.3	2.7
延河·甘谷驿		5 891	0.5494	33.9972	43.6	0.2395	4 065.5	4.3
岚漪河·裴家川		2 159	0.1262	36.055	46.8	0.0591	2 737.4	1.1
湫水河·林家坪		1 873	0.2362	78.878	33.1	0.0782	4 175.1	1.6
三川河·后大成		4 102	0.2535	9.368	35.4	0.0897	2 186.7	1.7
昕水河·大宁		3 992	0.2158	21.848	27.0	0.0583	1 460.4	1.1
洛河·金佛坪**		3 842	0.4747	108.7805	38.8	0.1842	4 793.4	3.3
·猓头		25 154	0.8443	5.7589	33.6	0.2837	1 127.9	5.1
蒲河·姚新庄		2 264	0.1355	43.679	22.3	0.0302	1 334.7	0.5
泾河·杨家坪		14 124	0.9310	3.9130	18.5	0.1722	1 219.2	3.0
西川·庆阳		10 603	0.8370	52.2467	30.4	0.2544	2 399.3	4.6
马连河·洪德		4 640	0.4805	21.7926	43.8	0.2105	4 535.8	3.8
·雨落坪		19 019	1.3400	20.1379	30.1	0.4033	2 120.7	7.3
泾河·张家山		43 216	2.8624	3.6290	29.1	0.8330	1 927.5	15.1
葫芦河·秦安		9 805	0.6753	12.1602	19.6	0.1324	1 349.9	2.9
渭河·南河川		23 385	1.4355	2.2545	24.2	0.3302	1 412.0	6.0
·华县		106 498	4.0995	0.3455	23.0	0.9429	885.4	17.1
汾河·河津		38 728	0.4064	0.5089	19.2	0.078	201.4	1.4
黄河头道拐至吴堡		65 616	4.6241		43.8	1.8670	2 845.3	33.9
·吴堡至龙门		64 047	4.2197		40.8	1.7216	2 688.1	31.2
·头道拐至龙门		129 663	8.8438		40.8	3.6083	2 782.8	65.5
黄河·龙门		497 561	10.3077		40.8	4.2055	845.2	76.3
·龙门+华县		667 941	15.6579			5.510	824.9	100.0
·+河津+猓头								

* 1975年后迁至白家川, 面积为29,662km²。** 1980年后迁至吴旗, 面积为3,440km²。

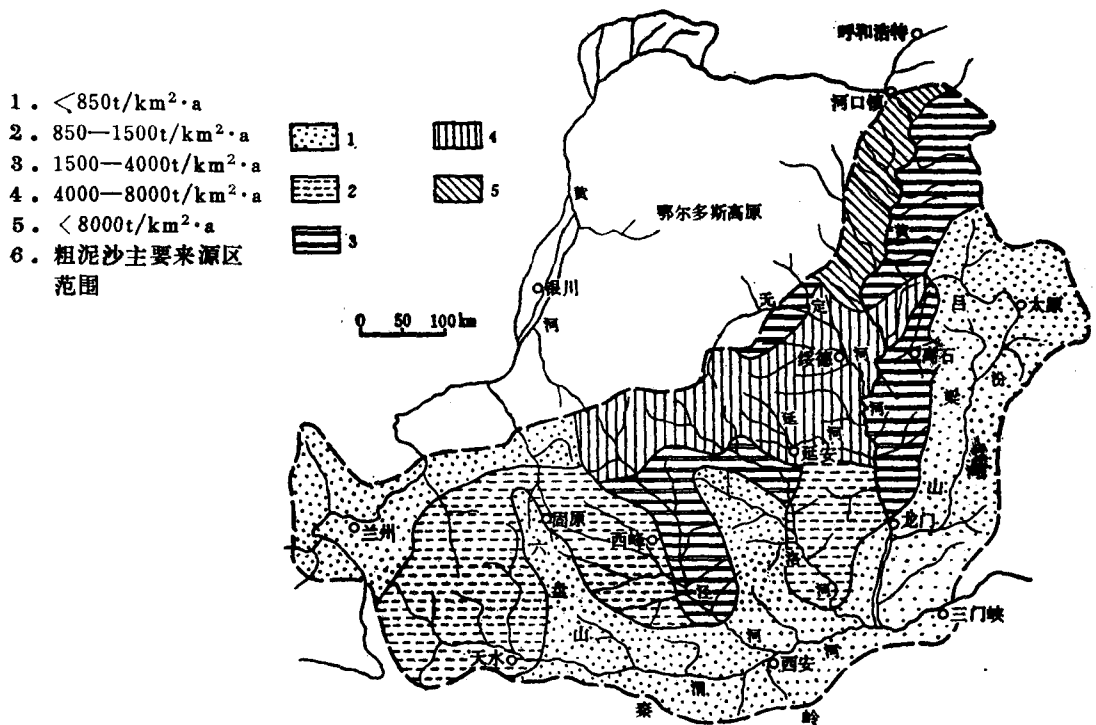


图1 黄河中游粗泥沙来源分区图

Fig.1 Division map of coarse sediment source in the middle reaches of the Yellow River

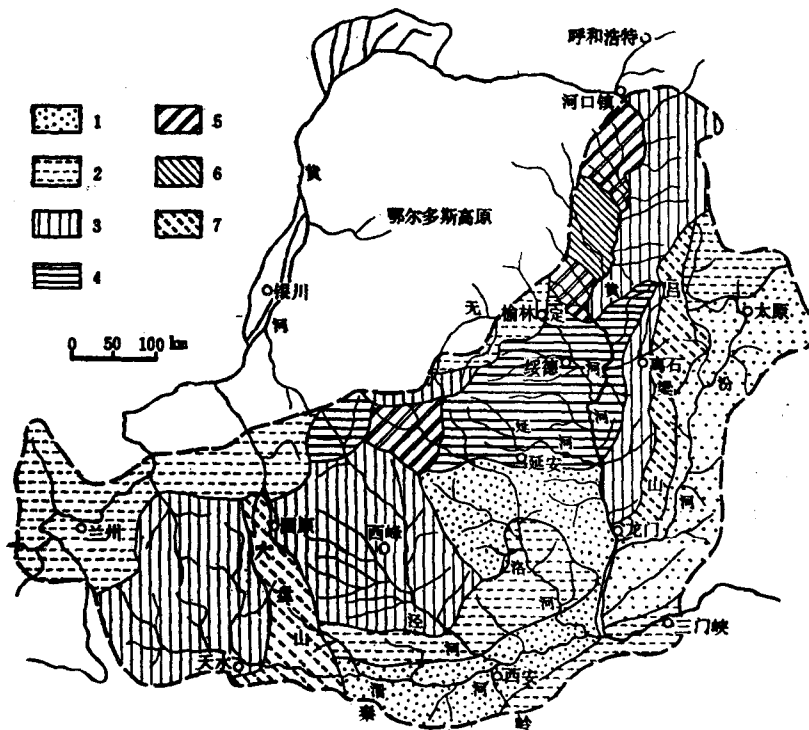


图2 黄土高原侵蚀强度分区图

Fig.2 The map of erosion intensity on the Loess Plateau

1. $< 1000 \text{ t/km}^2 \cdot \text{a}$
2. $1000 - 5000 \text{ t/km}^2 \cdot \text{a}$
3. $5000 - 10000 \text{ t/km}^2 \cdot \text{a}$
4. $10000 - 15000 \text{ t/km}^2 \cdot \text{a}$
5. $15000 - 20000 \text{ t/km}^2 \cdot \text{a}$
6. $> 20000 \text{ t/km}^2 \cdot \text{a}$
7. 有良好植被的基岩山地

和马连河流域的13万平方公里区域,粗泥沙量最多,约占四站总量的77%。在这13万平方公里区域内,又以皇甫川、窟野河、孤山川、秃尾河、佳芦河、无定河、清涧河、延河、马连河和北洛河(金佛坪以上)、周河等8.1万平方公里粗沙最多,达到3.238亿吨,占四站粗泥沙量的58.8%。

将图1和黄土高原侵蚀强度分区图(图2)加以比较可以看出,侵蚀强度很大的地区,恰好也是粗泥沙来量最多的地区。为了减缓黄河下游河道淤积,若使这8.1万平方公里区域粗泥沙来量减少一半,四站年平均输移的5.51亿吨粗泥沙有可能减少为3.891亿吨,下游河道的淤积速度将会大大减缓。

二、粗泥沙的产沙方式和地貌部位

1. 产沙方式

产沙方式是指固体物质脱离岩石或土壤母体进入槽床变为河流泥沙的形式。它和侵蚀方式有紧密的内在联系,但又有区别。前者是从河流泥沙来源角度而言,后者是指坡地物质被外营力破坏和位移的形式。坡地上被侵蚀的物质可以直接进入河道成为河流泥沙的组成部分,一部分物质也可以在坡地上暂时停积成为后期的侵蚀对象。一般来说,坡地上的侵蚀量总是大于产沙量,只有地面条件有利搬运、动力作用极强的地区二者才会接近或者相等。黄土高原的地形陡峻、地表物质组成的粒度较细(多小于0.5毫米)、地面光裸、暴雨频繁,对于粒径小于1毫米物质在较长时段内来说,侵蚀量与产沙量是接近相等的。但是,对于粗大物质和短历时来讲,二者常有较大差异。

根据产沙动力特点,可以将黄土高原的产沙方式划分为水力侵蚀、重力侵蚀(又称物质块体运动)、风力侵蚀和人为侵蚀四类。从动力作用于地面的强度和分布范围来看,水力侵蚀是该区最主要的产沙动力。水力侵蚀的产沙方式有面状侵蚀产沙和线状(沟状)侵蚀产沙两种。据陕北子洲团山沟1962—1969年和甘肃天水梁家坪1945—1957年经流泥沙实测资料分析,小流域侵蚀产沙总量中约有一半是面状侵蚀(包括溅蚀和细沟侵蚀)提供的。沟谷侵蚀的产沙量视谷坡的物质组成和降雨条件而异,一般是红粘土谷坡大于黄土谷坡,如果降雨强度很大,则是黄土谷坡大于红粘土谷坡^[4]。

重力侵蚀的发生过程及其产沙效果,都与水力作用紧密联系。水是诱发物质块体运动的媒介和使重力侵蚀产物变为河流泥沙的载体。重力侵蚀的产沙意义视侵蚀方式和区域而异。一般来讲,泻溜、岸边崩塌和滑塌的产沙意义最大。在沟谷中则以沟头附近的小型滑塌提供的泥沙最多。例如宁夏西原县的干岔沟,1984和1985年沟头的崩塌和滑塌产沙量约有7.35万吨;陇东南小河流域1956年6月14日至7月4日连续降雨20天,降雨量208.4毫米,18亩台水库淤积的7.65万立方米泥沙中绝大部分是流域内的滑塌和崩塌提供的。据分析^[5],南小河流域历年的输移泥沙量中有57.3%来自泻溜侵蚀和沟床下切。内蒙古准格尔旗和陕北神木、府谷一带河道中的泥沙,主要是由中生代和上古生代砂岩、砂质泥岩坡面上的泻溜提供的。

大型滑坡的产沙意义一般是不大的,甚至有抑制产沙的作用。坡地上发生了大型滑坡以后,原有地面的坡度变缓,水力侵蚀因此减弱,仅仅在已经直接与槽床水流接触处的滑坡体前缘,不断遭受水流冲刷而逐渐变为河流泥沙。黄土高原有许多堰塞湖(聚淤),天然坝体几乎全是大型滑坡体。1920年宁夏海原大地震($M \geq 8$)时共形成了41个堰塞湖,至今还有27个未被冲毁,它们已经拦蓄了大量泥沙。

目前还不能确定黄土高原重力侵蚀产沙量在黄河泥沙量中占的比例。上文引用的陇东南

小河沟流域的数字,精度也不高,这是因为如何判断重力侵蚀的产沙滞后量尚未解决。蒋德麒等^[6]曾认为黄土丘陵区重力侵蚀产沙量占小流域产沙总量的1/4,黄土塬区占2/3,其精度是有待提高的。但是,从宏观分析来看,大致可以认为黄土塬区和陕北北部、内蒙古准格尔旗一带以及晋陕黄河峡谷两侧的一定范围内,重力侵蚀产沙是黄河泥沙的主要产生方式;尤其是黄河峡谷两侧的基岩崩塌和陕北、蒙南的沟溜侵蚀对黄河粗泥沙的贡献最大。泾河、洛河、无定河和延河等流域的河源地区,晚更新世形成的大片淤积平地(当地称为塄地或塋地、坎地),目前正遭受沟谷溯源侵蚀分割(破塄),其产沙方式显然是以沟蚀为主。沟蚀过程中,谷坡上的小型滑塌和崩塌十分活跃,因而也可以看成是重力侵蚀产沙活跃区。无定河上游河道中修建了若干水库后,由于局部侵蚀基准面抬高,沟道侵蚀相对减弱,使水库中的泥沙淤积量随着时间推移而减少,可以作为该区是以沟蚀为主要产沙方式的旁证。

风蚀提供的粗泥沙量在黄土高原北部占有重要地位。据估计,皇甫川、窟野河、孤山川等流域的风蚀量约1 000—5 000吨/平方公里·年。风力吹入沟(或河)的物质成份普遍较粗,是这些河流粗泥沙量较高的重要原因。

人类活动对侵蚀产沙的影响,是当今河流泥沙研究的重要命题。要准确说明黄土高原人为加速侵蚀产沙量,至今仍是难题。从典型地区的调查资料看,其数量是很可观的。例如,山西省蔚汾河流域1966—1975年因修公路增加的泥沙量为1.43万吨,相当该河同期输沙量的4.8%;陕西永寿县二道沟1960年修公路增加的沙量为该流域多年平均输沙量的22倍。据黄河水利委员会绥德水土保持试验站调查,1950—1983年无定河流域农民修建窑洞弃入河道中的土量多达0.602亿吨^[7],其中的大部分已经变为河流泥沙。

晋陕蒙接壤地区有丰富的煤炭资源,煤矿开发过程中必定会对区域环境产生重大影响,其中最主要的是可能造成严重的人为加速侵蚀。由于这一地区处在砂黄土分布区,黄土层之

表2 黄土高原小流域内不同地貌部位侵蚀产沙量计算成果表

Tab.2 The erosion yield of different geomorphic types in catchment on the Loess Plateau

侵蚀 产沙量 (t/km ² ·a)	地貌 部位	谷 间 地					沟 谷 地			流 域 平 均	注
		梁 峁 坡 上 部	梁 峁 坡 中 部	梁 峁 坡 下 部	梁 峁 坡 下 部 凹 坡	塄 面 及 塄 坡	平 均	黄 土 谷 坡	红 粘 土 谷 坡	平 均	
地 点											
黄土丘陵区	晋西离石 羊道沟	509.4	1 500.4	7 432.8	12 402.6		5 065.2	26 611.2	18 713.0	21 799.4	1963—1968 年平均
	陕北子洲 团山沟	11 538.1	19 834.8		21 404.3		20 234.4	17 107.1	35 012.5	34 275.6	1963—1969 年平均
黄土塬区	陇东西峰 南小河沟					731.8	731.8			15 198.4	1955—1969 年和1971— 1979年平均

下几乎全是抗蚀力不强的长石砂岩和泥质页岩或泥岩，如果煤矿开发时不做好水土保持工作，必然会给黄河增加大量粗泥沙。

2. 侵蚀产沙的主要地貌部位

小流域是黄土高原侵蚀产沙的基本单元。按照侵蚀产沙特点，可分为谷间地和沟谷地。谷

表3 黄河中游黄土高原非黄土地层粗泥沙量计算成果表

Tab.3 The coarse sediment load from non-loess stratum on the Loess Plateau

河名 和站名	项 目	控制面积 (km ²)	年平均 输沙量 (10 ⁸ t)	d>0.05mm含量%		非黄土地层d>0.05mm泥沙最少量		
				河流泥沙	黄 土	量 (10 ⁸ t)	占年输沙量 (%)	模 数 (t/km ² ·a)
洮河·红旗		24 973	0.2533	33.6	18.0\	0.0395	15.6	158.2
湟水·民和		15 342	0.1934	34.2	26.7	0.0145	7.5	94.5
祖厉河·靖远		10 647	0.5935	24.4	13.4	0.0653	11.0	613.3
黄河·头道拐		367 898	1.4639	26.9	37.9			
皇甫川·皇甫		3 199	0.5366	62.0	38.1\✓	0.1282	23.9	4 007.5
孤山川·高石崖		1 263	0.2516	52.9	25.9	0.0679	27.0	5 376.1
窟野河·温家川		8 645	1.2223	59.1	36.0	0.2824	23.1	3 266.6
秃尾河·高家川		3 253	0.3176	66.8	45.0	0.0692	21.8	2 127.3
佳芦河·申家湾		1 121	0.1994	54.7	32.1\✓	0.0451	22.6	4 023.2
无定河 { 赵石窑		15 329	0.2649	54.2	33.0△	0.0565	21.3	369.6
	川口*(白家川)	30 217	1.4988	46.9	32.1\✓	0.2218	14.8	73.4
大理河·绥德		3 893	0.4093	45.7	28.5	0.0704	17.2	4 389.3
清涧河·延川		3 468	0.4001	37.5	25.3\✓	0.0488	12.2	1 407.2
延河·甘谷驿		5 891	0.5494	43.6	31.0	0.0692	12.6	1 174.7
岚漪河·裴家川		2 159	0.1262	46.8	25.5\✓	0.0269	21.3	1 245.9
湫水河·林家坪		1 873	0.2362	33.1	33.3\✓			
三川河·后大成		4 102	0.2535	35.4	22.0\✓	0.034	13.4	828.9
昕水河·大宁		3 992	0.2158	27.0	14.3	0.0274	12.7	686.4
北洛河 { 金佛坪(吴旗)*		3 842	0.4747	38.8	25.0\✓	0.0655	13.8	1 704.8
	猓 头	25 154	0.8443	33.6	16.4	0.1452	17.2	577.2
东川·庆阳(贾桥)		2 988	0.2096	23.2	13.0\✓	0.0211	10.2	715.5
西川·庆阳		10 603	0.8370	30.4	13.0\✓	0.1456	17.4	1 373.6
马连河·雨落坪		19 019	1.3400	30.1	20.0	0.13534	10.1	711.6
蒲河·姚新庄		2 264	0.1308	22.3	16.5\✓	0.0075	5.8	335.1
泾 河 { 杨家坪		14 124	0.9310	18.5	14.6△	0.0363	3.9	257.1
	张家山	43 216	2.8624	29.1	17.9△	0.3206	11.2	741.8
散度河·甘谷		2 484	0.2315	20.7	11.9	0.02084	9.0	838.8
葫芦河·秦安		9 805	0.6753	19.6	12.1	0.05065	7.5	516.5
渭 河 { 南河川		23 385	1.4355	24.2	12.5	0.1679	11.7	718.2
	华 县	106 498	4.0995	19.2	11.2	0.32796	8.0	307.9
汾河·河津		38 728	0.4064	25.2	20.2	0.02032	5.0	52.5

说明：表中有“\”者引自马秀峰（人民黄河，第4期，1982年）；有△者引自朱海之（第四纪地质问题，科学出版社，第77—88页1964年）其余系作者资料。

• 同表1的注。

间地的侵蚀产沙强度取决于降雨侵蚀力和地面抗蚀力的组合关系；沟谷地除了这种关系外还要受沟间地来水来沙特点影响。根据实测资料分析（表2），沟谷地的侵蚀产沙量在黄土丘陵区一般比谷间地大41.0—76.8%；黄土塬区大94.8%。也就是说，按单位面积计算，黄土高原的小流域的侵蚀产沙量主要产生于沟谷地。但是，除陕北绥德地区外的绝大部分地区谷间地的面积都大于沟谷地，因而谷间地和沟谷地各自的侵蚀产沙量占流域产沙量的比例又常常是谷间地大于沟谷地。表3中团山沟谷间地面积占流域面积74%，侵蚀量为1.5万吨，沟谷地为0.91万吨。在谷间地梁峁坡面上，降雨径侵蚀产沙强度由分水岭向下坡逐渐加强。梁峁坡下部的单位面积侵蚀量常常大于中部或顶部一倍到数十倍。沟谷地中侵蚀产沙量最活跃的地貌部位多在沟头附近。离石羊道沟的沟头部位侵蚀产沙量为该流域平均侵蚀产沙量的1.4倍。

三、产沙地层及非黄土地层粗泥沙量估算

1. 产沙地层

黄土高原的产沙地层主要有第四纪黄土及黄土状土、风沙、第三纪地层和第三纪前地层。第三纪前地层称为“基岩”。

黄土分布最广的地区是陕西、山西和甘肃三省，占总面积的76%。不同时代黄土的分布面积中以晚更新世马兰期黄土最广，中、早更新世黄土露头多见于沟谷谷坡。因此，马兰期黄土的特征对侵蚀产沙的影响最大。

实验表明，马兰期黄土遇水后的崩解分散速度一般只需要30—40秒，约比早更新世午城黄土快一倍。马兰期黄土的粒度组成由北而南由粗变细⁽⁸⁾。北部砂黄土的相对可蚀性比南部粘黄土大2—3倍⁽⁴⁾。黄土状土大多是经过外营力搬运再堆积的物质，其抗蚀性与马兰期黄土接近。

黄土高原风沙分布面积不广。沙丘覆盖区风力将砂粒吹至沟谷，是黄河粗泥沙的重要来源。

六盘山以西黄土地层的厚度多数地区是30—100米，其下为甘肃系地层。甘肃系地层出露面积约占土地面积的1/4。凡是甘肃系地层外露的沟谷，重力侵蚀都较活跃。该地层中的粗砂夹砾石岩层，是河流粗泥沙的重要来源。该区的侵蚀强度较小，其中的粗泥沙经过银川平原和内蒙古平原调节，通过头道拐站进入四站的量不大，从减少黄河下游河道淤积出发，不是治理的重点。六盘山至吕梁山间地区缺失早、中第三纪地层，晚第三纪三趾马红粘土的出露面积仅占总面积的5—9%，其岩性粘重，粗泥沙产量有限。但它的顶面多有地下水出露，对上覆地层的稳定性影响极大，具有间接的粗泥沙产沙意义。

第三纪前地层中粗沙产量最大的地层有两类，一是白垩纪紫红色粗砂岩，另一个是在内蒙古南部和榆林北部的上古生代和中生代长石砂岩（当地称为砭砂石）。前者抗蚀力较弱，水库淤积物中所见的厚层紫红色粗沙全部来自此类地层；后者浸水后易成粉末，露头上的风化剥落十分严重，是皇甫川、窟野河等流域粗泥沙的主要来源。这两类地层分布区正好是砂黄土覆盖区，加上风沙影响，是该区粗泥沙来量最多的主要原因。这些地区的地广人稀，与延河、清涧河等流域相比，人类活动对侵蚀产沙的影响相对为轻，其侵蚀产沙量极大的原因主要是自然因素的影响，其中岩性因素是一个重要方面。

2. 非黄土地层粗泥沙来量估算

准确地分别河流输移泥沙中来自黄土地层和非黄土地层的沙量是很困难的。这是由于

黄土的矿物成分复杂,没有明显的区域差异,陆源矿物分析法和颗粒形态分析法未必有效。但是,各地黄土粒度组成大致均一的特点,使我们有可能计算出粗泥沙中非黄土地层的最低限度来量^[3]。其方法是将河流泥沙中粒径大于0.05毫米沙量百分数与流域内黄土地层相同粒级含量比较,差值若为正数,多出的粗泥沙则是来自非黄土地层;差值为负,即使已知该流域有非黄土地层产沙,也不能确定它的产沙数量。

运用上述方法计算结果列于表3。由表3可知,黄河中游干流和主要支流输移的粗泥沙中至少有5—27%以上是来自非黄土地层,在粗泥沙主要来源区的13万平方公里内,至少有12—27%的粗泥沙来自非黄土地层。非黄土地层粗泥沙来量最多的流域,依次是孤山川、皇甫川、窟野河、佳芦河、秃尾河、岚漪河、大理河和北洛河等。这和黄土高原主要产沙区基本上是一致的。六盘山以西(渭河上游除外)非黄土地层产生的粗泥沙对黄河下游的影响不大,研究粗泥沙治理时可以不作重点。六盘山以东非黄土地层中风沙的入黄沙量估计不超过四站粗泥沙总量的3%,即非黄土地层粗泥沙量中的绝大部分是基岩提供的。崩塌和泻溜是基岩的主要产沙方式。目前黄河干流和各级支流和大多数支沟,都已切入基岩五六十米以上,黄河晋陕峡谷段达到150—200米以上,崖壁上的崩塌十分活跃。黄河府谷至禹门口河段河床上众多的堆积型块石急流滩,其物质大多数是来自临近支流和支沟河口段的基岩崩塌。这些物质在洪水推移下沿程破碎提供了部分粗泥沙。

四、粗泥沙量的近期变化及其原因

1. 粗泥沙量的近期变化

点绘四站1950—1983年径流量和泥沙量双累曲线看出(图3),1971年至1983年黄河泥沙比1970年以前减少了6.2509亿吨,减少比例为36%,同期径流量减少了89.99亿立方米,减少比例为19.4%;粗泥沙量减少了2.5987亿吨,减少比例为41.6%(表4)。粗泥沙减少数量最多的是黄河龙门站和吴堡站,无定河川口站,泾河张家山站和窟野河温家川站;减少比例最大的流域依次为三川河、汾河和无定河。粗泥沙减少数量最少的是东川庆阳站、洮河红旗站、湟水民和站和蒲河姚新庄站;减少比例最少的是马连河和北洛河。

粗泥沙量减少幅度与年径流量和年平均含沙量的减少幅度不完全一致。年径流量减少比例最大的依次是汾河河津站、祖历河靖远站,渭河华县站和三川河后大成站,都在30%以上;6—9月径流量减少最多的依次是汾河、清

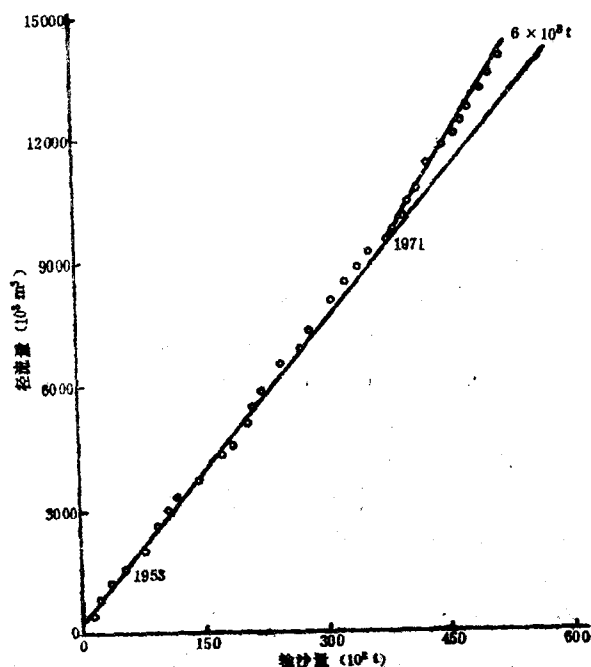


图3 黄河中游四站历年径流量和泥沙量双累曲线

Fig.3 The double cumulative curve of runoff and sediment load in He-jin, Longmen, Huaxian and Zhuangton station

表 4 1970以前和以后黄河中游干、支流泥沙和降雨量变化

Tab.4 The variation of sediment load and precipitation in the middle reaches of the Yellow River before 1970yr. and after

河名 和站名	径流量 (10 ⁸ m ³)		输沙量 10 ⁴ t		d>0.05mm沙量 (10 ⁴ t)		含沙量 (kg/m ³)		降雨量 (mm)	
	6—9月		年		6—9月		年		年	
	年	6—9月	年	6—9月	年	6—9月	年	6—9月	年	6—9月
洮河·红旗	54.32	28.775	0.259	0.253	0.035		5.37		376.9	226.7
湟水·民和	18.95	10.279	0.203	0.101	0.068		10.4		353.3	252.4
祖厉河·靖远	1.578	1.28	0.753	0.636	0.156		464.0		332.1	231.7
黄河·头道拐	249.2	129.548	1.67	1.143	0.443		0.67		160.6	263.6
窟野河·温家川	7.841	4.743	1.36	1.337	0.862		174.0		450.8	351.6
无定河·川口	15.40	6.814	2.12	1.312	0.368		138.0		450.9	323.1
延河·甘谷驿	2.374	1.6063	0.33	0.331	0.266		135.0		300.2	348.7
清涧河·延川	1.537	1.0766	0.34	0.333	0.113		211.0		450.3	160.6
三川河·后大成	3.203	1.806	0.55	0.336	0.171		56.3		375.3	380.4
北洛河·袱头	8.809	4.6039	0.39	0.362	0.215		121.0		397.6	353.4
渭河 { 南河川 华 县	14.89	7.8759	1.51	1.371	0.293		104		195.6	359.2
	93.37	43.965	4.16	3.913	0.843		37.3		339.6	409.2
马连河·雨落坪	4.71	3.1719	1.12	1.3736	0.435		393		544.3	342.4
西川·庆阳	2.19	1.6034	0.92	0.9034	0.332		411		342.0	370.8
东川·庆阳	0.893	0.5957	0.255	0.278	0.0648		244		501.1	370.8
蒲河·姚新庄	0.962	0.6349	0.179	0.2725	0.092		216.0		356.8	376.7
泾河·张家山	21.29	12.334	0.13	2.893	1.0517		177.0		546.0	566.7
汾河·河津	16.66	9.167	0.48	0.1437	0.1245		29.9		477.8	358.2
黄河 { 吴 堡 龙 门	312.3	162.466	6.73	5.433	3.0285		21.5		468.3	329.2
	344.1	177.44	11.462	9.339	4.563		33.3		376.5	353.7
龙门+华县+派头+河津	462.939	241.3779	17.376	15.3152	6.2241					

续表 4

河名 和站名		1971—1983 年										说 明		
		径流量 ($10^8 m^3$)		输沙量 ($10^8 t$)		$d>0.075mm$ 沙量 ($10^8 t$)		含沙量 (kg/m^3)	降雨量 (mm)		粗泥沙减少量			
		年	6—9	年	6—9	年	6—9		年	6—9	量 ($10^8 t$)			比例%
洮河·红旗		49.776	26.066	0.261	0.2396	0.065	0.0487	4.6	531.7	230.7	0.0165	20.2	1970年前	
湟水·民和		14.489	7.738	0.1797	0.17	0.0498	0.0487	12.5	325.4	243.7	0.0182	26.8	测量河流	
祖厉河·靖远		0.9824	0.7486	0.4054	0.385	0.0872	0.092	407.2	251.0	156.8	0.0931	51.6	泥沙颗粒	
黄河·头道拐		248.3846	86.719	1.1888	0.574	0.3269	0.637	18.4	324.2	246.8	0.1184	26.6	组成时间	
窟野河·温家川		6.35	3.49	1.053	1.032	0.64	0.5002	150.3	391.7	300.1	0.2222	25.8	不足 5 年	
无定河·川口		11.22	4.279	0.846	0.78	0.3705	0.3765	69.2	432.0	301.2	0.6163	62.5	者未作比	
延河·甘谷驿		1.98	1.251	0.364	0.3407	0.1467	0.1347	166.0	451.9	339.9	0.1139	43.7	较分析	
清涧河·延川		1.327	0.485	0.31	0.3068	0.1169	0.1347	200.3	486.4	351.5	0.0544	31.8		
三川河·后大成		2.215	0.91	0.14	0.0684	0.0148	0.0106	58.7	465.9	314.4	0.1116	88.4		
北洛河·秋头		5.699	3.3915	0.7616	0.725	0.2711	0.109	141.7	503.6	363.1	0.0512	15.9		
渭河 { 南河川		12.383	6.896	1.2669	0.9692	0.238	0.2154	87.3	495.5	310.3	0.0619	20.6		
渭河 { 华 县		64.2	34.326	3.197	2.886	0.6414	0.7033	53.5	511.8	303.7	0.1719	21.2		
马连河·南洛坪		4.226	2.753	1.115	1.095	0.3713	0.66	60.8	513.8	341.1	0.0632	15.5		
西川·庆阳		1.874	1.2967	0.6297	0.6269	0.2009		188.4	484.8	336.8	0.1103	35.4		
东川·庆阳		0.806	0.511	0.1193	0.1716	0.0516		178.1	484.8	316.8	0.932	20.4		
蒲河·姚新庄		0.74	0.4385	0.1595	0.1455	0.0459		70.7	484.8	316.8	0.0481	52.3		
泾河·张家山		15.88	9.264	2.253	0.104	0.5024		183.8	523.7	406.2	0.5493	52.2		
汾河·河津		8.7998	4.04	0.1465	3.36	0.0242	0.02944	13.0	465.9	344.1	0.1003	80.6		
黄河 { 吴 堡		270.0	117.7	4.41	5.86	1.918	1.7375	17.1	448.8		1.1105	36.7		
黄河 { 龙 门		294.25	123.34	7.02		2.6887	2.408	24.8	534.1	365.8	2.2743	45.8		
龙门 + 黄县 + 秋头 + 河津		372.9488	165.0975	11.1251	9.575	3.6254					2.5987	4.8		

涧河和三川河,都在50%以上。渭河华县站,北洛河猗头站,湟水民和站和黄河头道拐站、吴堡站1971年以来的平均含沙量反而较前期增加。

黄河6—9月的输沙量一般占年总量的80%以上,此时也正是粗泥沙的主要输送期。1970年前祖厉河、无定河、渭河南河川、汾河和黄河吴堡站6—9月粗沙量都多于年平均量。但是,窟野河温家川,北洛河猗头,马连河雨落坪等粗泥沙来量较多的支流,非汛期的粗沙量却占了较大比重。

2. 原因分析

现代侵蚀产沙强度是自然因素和人为因素综合影响的结果。近10多年来,黄土高原的降雨量较前期减少,这是导致侵蚀产沙量减少的重要原因之一;此外,该区多年来兴建了大量水库和实施了相当面积的水土保持措施,它们的拦沙效果也是造成河流泥沙减少的另一重要原因^[9、10]。

降雨减少引起的侵蚀产沙变化过程是十分复杂的。直接比较1970年前后两个时段的年降雨量或汛期降雨量,甚至比较暴雨频率及其影响范围,都说明不了侵蚀产沙减少中降雨因素影响的量。譬如表4中的清涧河流域,1970年前后的年降雨量相近,后一时期汛期降雨量比前期增加了90.9毫米,流域内子长、永坪、延川三个雨量站1971—1980年的一日、三日、七日、十五日 and 三十日最大降雨量都大于1961—1970年,而1970年以后的年输沙量和6—9月输沙量分别减少了35.9%和35.5%,粗泥沙量减少了31.8%。显然这是水土保持发挥了作用,但其作用大小仍不能准确回答;湟水流域前后两时段的降雨特点差别不大,后一时期年输沙量减少,6—9月沙量却增加了68.3%。侵蚀产沙强度是降雨侵蚀力和地面抗蚀力的函数,并受人类活动影响。降雨侵蚀力大小取决于降雨能量及其持续时间长短,相似降雨侵蚀力作用于不同下垫面将产生不同侵蚀后果。黄土高原目前还不能提供这两方面的分析资料。熊贵枢^[10]试图用典型站多年泥沙累积变率来阐明降雨因素在河流泥沙减少中的作用,由于他忽视了对比流域地貌和岩性的差异,所得结果说服力不强。当前暂且可行的办法仍然是首先分析水利水土保持措施拦沙量占四站减沙总量的比例,剩余部分视为降雨变化的影响量。

据各省统计的水土保持措施实施面积,按流域加以归并,得出各地水平梯田和坝地的面积¹⁾。由典型调查得知,水平梯田的减沙系数一般情况是0.7—0.9,河口镇以上流域和汾河流域每亩坝地的拦泥量为1400—2800吨/亩,河口镇至龙门区间为3000—5000吨/亩,渭河和北洛河流域为2500—4000吨/亩。考虑到水平梯田和坝地统计面积一般偏大,调查的坝地拦沙量数字精度不高,计算这两项措施的拦沙量均取最低值。计算结果如表5。

由表5可知,黄土高原已有水平梯田和坝地共拦蓄泥沙59.947亿吨。各时期的拦沙量是不均等的。据统计,1971年以前黄土高原仅有水平梯田约459.9万亩,已淤成的坝地约122万亩,主要分布在河口镇以下地区。如果每亩坝地拦沙量按2500吨计算,水平梯田减少系数取0.7,计算出1971年以前的拦沙量并从表5中将其扣除,则1971—1983年的梯田和坝地拦沙量为2.263亿吨/年,占此期间黄河减沙量的36.2%。

据无定河流域调查^[7],该流域减少总量中林草措施的减沙量仅占4.5%。如果整个黄土高原已有的林草措施减沙量按占黄河减沙量的3%计算,则林草、水平梯田、坝地等措施的减沙总量约2.45亿吨/年,占黄河减沙总量的39.2%。

据张胜利等^[9]的调查资料,1971年来黄河干支流水库的拦沙量为0.856亿吨/年,扣除水

1) 引自黄河水利委员会水利科学研究所,近十几年黄河中上游来沙减少原因分析,1986年5月。

表5 黄土高原水平梯田和坝地减沙量计算成果*

Tab.5, Amount sediment trapped by level terraced field and dam on the Loess plateau

数 量 地 区	项 目	水 平 梯 田				坝 地			合 计 拦 沙 量 (10 ⁴ t)
		面 积 (km ²)	坡地侵 蚀 量 (t/km ²)	减沙量 (t/km ²)	减沙总量 (10 ⁴ t)	面 积 (km ²)	拦 沙 量 (10 ⁴ t/km ²)	拦沙总量 (10 ⁴ t)	
河口镇以上		3 086.7	1 115	780.5	240.92	432.0	210.0	90 720.0	90 960.9
河口镇至龙门		3 340.0	5 352	3 746.4	1 251.3	698.0	450.0	314 100.0	315 351.3
汾河流域		1 201.4	1 500	1 050	1 261.15	478.02	210.0	100 385.0	100 510.4
渭河和北洛河		5 839.6	5 000	3 500	2 043.3	201.34	450.0	90 603.0	92 646.9
合 计		13 467.7			3 662.3	1 809.36		595 808.0	599 470.3

* 水平梯田和坝地面积引自黄河水利委员会。

库下游河床冲刷恢复的0.3亿吨/年泥沙,水库的有效拦沙量为0.556亿吨/年。1971年以来,大型灌区每年引洪水灌溉减少量为0.635亿吨/年。由此得出1971—1983年水利和水保措施的平均拦沙量为3.641亿吨/年,占同期黄河减沙量的58.2%。各项措施减沙量中以土坝最多,占黄河减沙量35.8%,占各项措施减沙总量的61.4%。正是由于坝地拦沙最多,粗泥沙在坝地中首先落淤,所以近十几年来黄河粗泥沙减少的幅度大于河流泥沙。从减少入黄泥沙出发,今后加强筑坝拦沙是很重要的。

以上分析中有以下几点补充说明:第一,虽然计算时采用的水平梯田和坝地面积比实有面积偏大,考虑到计算中未包括目前尚未淤满的土坝中拦蓄的泥沙,计算误差不致太大。第二,近年来黄土高原大面积推广了水土保持耕地作法,仅延安地区1982年就推广了264万亩。据陕北、晋西、陇东等地水土保持站(所)观测分析,在一般降雨条件下它可减少坡耕地侵蚀量的50—90%。坡耕地是黄河泥沙的重要源地。这项措施的减沙效果尚未包括在上文计算的水土保持减沙效果之中;各地引洪漫地的减沙量也未计算在内。所以,计算的水土保持减沙效果基本上不存在过分夸大的情况。第三,水土保持的减沙效果与降雨特点的关系密切,一般是暴雨稀少和强度不大,减沙效果则大;暴雨频繁或强度较大,其减沙效果降低。例如1977年黄土高原发生笼罩面积较大的三次大暴雨,四站输沙量达到22.987亿吨,比多年平均输沙量大0.4倍;1982年全区干旱,又无暴雨,四站输沙量仅6.082亿吨。在支流流域内甚至有一次暴雨过程中的侵蚀产沙量占该年输沙量50%以上的记录^[6]。因此,不能以次暴雨作为评价水土保持减沙效益的主要依据。当然也不能因为某次大暴雨冲毁一部分水土保持工程,而贬低它的保持水土作用。

五、结 语

粒径大于0.05毫米的泥沙占黄河龙门站,渭河华县站,汾河河津站和北洛河猗头站悬移泥沙量的35.2%。粗泥沙的77%来自河口镇至龙门区间和北洛河(金佛坪以上)流域、周河、马连河流域的13.0万平方公里面积,其中的8.1万平方公里面积粗泥沙来量占总量的58.8%。粗泥沙主要来源区正好是侵蚀产沙最强烈的地区,也正好是水蚀、风蚀和重力侵蚀都很活跃的地区。由于谷间地的面积多大于沟谷地,谷间地的侵蚀产沙总量多于沟谷地,而侵蚀模数却是沟谷地大于谷间地。