

黄河水利委员会水土保持科研基金项目专题

黄土高原产流产沙机制 及水土保持措施对水资源 和泥沙影响的机理研究

徐建华 吴发启 等 编著



黄河水利出版社

黄河水利委员会水土保持科研基金项目专题

黄土高原产流产沙机制及水土保持措施 对水资源和泥沙影响的机理研究

徐建华 吴发启 等 编著

黄河水利出版社

内 容 提 要

本书是作者参加“第三期黄河水土保持科研基金项目”部分研究成果的汇总和提炼。主要论述了黄土高原不同类型区产水产沙机制、各种水土保持措施减水减沙机理、黄土高原水土保持生态建设对水资源和泥沙的影响等。可供从事水利和水土保持科研、生产、管理工作的人员参阅,也可作为有关大专院校师生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

黄土高原产流产沙机制及水土保持措施对水资源和泥沙影响的机理研究/徐建华等编著. —郑州:黄河水利出版社,2005.10

ISBN 7-80621-948-X

I. 黄… II. 徐… III. ①黄土高原-水土保持-影响-黄河-水资源-研究②黄土高原-水土保持-影响-黄河-泥沙-研究 IV. TV882.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 088368 号

出 版 社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市金水路 11 号

邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371-66026940

传真:0371-66022620

E-mail: yrep@public.zz.ha.cn

承印单位:黄委会设计院印刷厂

开本:787mm×1092mm 1/16

印张:11.25

字数:274千字

印数:1—1500

版次:2005年10月第1版

印次:2005年10月第1次印刷

书号:ISBN 7-80621-948-X/TV·412

定价:26.00元

前 言

实践表明,水土保持生态环境建设可以有效遏制水土流失,改善生态环境,减少入黄泥沙。寻找合适的水土保持生态环境建设对水沙影响的评价方法是黄河治理规划中急需的基础性研究工作。2000 年黄委会第三期水土保持科研基金设立了“水土保持生态建设对黄河水资源和泥沙影响评价方法研究”课题,其中,第一专题为“黄土高原产流产沙机制及水土保持措施对水资源、泥沙影响机理研究”,由黄河水文水资源科学研究所和西北农林科技大学资源环境学院共同承担,黄河水文水资源科学研究所还承担了第三专题“水土保持措施对水资源、泥沙影响评价模型研究”中的部分工作。各专题参加人员如下:

黄土高原不同类型区产流产沙机理探讨:徐建华、李雪梅、崔庆、金双彦、高亚军、王志勇。

沟壑措施减水减沙机理研究:金双彦、徐建华、张培德、杨向辉、李梅、崔庆、马兴平、柴成果、王志勇、吴强。

坡面措施蓄水保土机理及作用研究:吴发启、王健、孟秦倩。

典型支流水土保持措施对水资源、泥沙影响评价模型研究:李雪梅、柴成果、李梅、金双彦。

为了总结已取得的研究成果,使其能在今后的研究中发挥作用,同时也为了更好地与同行进行交流,将上述研究成果整理提炼,并编著成书。

全书共分 6 章,各章撰写人员如下:

第 1 章由徐建华、吴发启、金双彦和王健撰写;第 2 章由徐建华、金双彦、李梅、柴成果撰写;第 3 章由李梅、柴成果撰写;第 4 章由王健撰写;第 5 章由柴成果、李梅撰写;第 6 章第 1 节由李雪梅撰写,第 2 节和第 3 节由崔庆撰写。全书由徐建华、吴发启、王健和李雪梅等统稿。

在研究过程中,得到了有关领导的大力支持和许多专家的指导,张培德、杨向辉、马兴平、高亚军等参与过本书中有关内容的研究工作,特此致谢。

黄土高原产流产沙机制及水土保持措施对水资源、泥沙影响机理研究课题是一个“常谈常新”的老课题,其影响因素十分复杂,我们的认识也肯定存在片面性,甚至有谬误之处,恳请读者批评指正。

作者

2005 年 6 月

目 录

前 言

第1章 绪 论	(1)
1.1 研究背景	(1)
1.2 研究思路与方法	(1)
1.3 主要进展与成果	(2)
第2章 黄土高原不同类型区产流产沙机理探讨	(4)
2.1 不同下垫面的产水特性	(6)
2.2 不同下垫面的产沙特性	(10)
2.3 降雨、径流、输沙关系讨论	(17)
第3章 沟壑措施减水减沙机理研究	(29)
3.1 黄土高原淤地坝建设现状	(29)
3.2 坝库拦沙机理探讨	(34)
3.3 淤地坝减蚀作用的探讨	(36)
3.4 淤地坝正负效益的讨论	(78)
3.5 几点认识	(80)
第4章 坡面措施蓄水保土机理及作用	(81)
4.1 坡面措施蓄水保土机理	(81)
4.2 耕作措施的蓄水保土作用	(93)
4.3 梯田措施的蓄水保土作用	(104)
4.4 林草措施的蓄水保土作用	(108)
4.5 结论及讨论	(111)
第5章 黄土高原水土保持生态建设对水资源的影响	(113)
5.1 黄土高原退耕还林还草对水资源的影响	(113)
5.2 黄土高原水土保持生态建设耗水量宏观分析	(125)
第6章 典型支流水土保持措施对水资源泥沙影响评价模型研究	(129)
6.1 水文法综述	(129)
6.2 降雨产流产沙统计模型	(134)
6.3 延河、孤山川水土保持蓄水拦沙计算方法初探	(156)
参考文献	(171)

第1章 绪 论

1.1 研究背景

黄河流域是中华民族的摇篮。早在远古时代,先民就在黄土高原这块神奇的土地上创造了中华文明。然而,长期以来,由于黄土高原地区突出的水土流失问题,给当地生态环境建设、区域经济社会的发展和黄河下游防洪等方面带来严重影响。实践表明,水土保持生态环境建设是一项防治水土流失、改善当地生态环境、促进经济社会发展和减少入黄泥沙的主要举措,对水资源、泥沙也将产生一定影响。因此,黄委会第三期水土保持科研基金于2000年立项,开展了“水土保持生态环境建设对黄河水资源、泥沙影响评价方法研究”课题。由于问题的复杂性和主客观条件,过去用以评价水土保持对水资源和泥沙影响的方法较多地建立在定性分析和数理统计的基础上,尽管具有一定的可操作性,但尚缺乏坚实的物理概念和理论基础,不可推广到其他流域。因此该课题要求从机理分析着手,以实用性和易操作性为原则,以建立一套水土保持对水资源和泥沙影响评价方法为研究目的,进而科学地、定量地评估水土保持对水资源及泥沙的影响,是做好水土保持规划和水资源合理开发利用的基础性应用研究课题。该课题下设三个专题:第一专题:黄土高原产流产沙机制及水土保持措施对水资源、泥沙影响机理研究;第二专题:水土保持措施的蓄水保土指标体系的评价与研究;第三专题:水土保持措施对水资源、泥沙影响评价模型研究。黄委水文局研究所和西北农林科技大学资源环境学院共同承担了“黄土高原产流产沙机制及水土保持措施对水资源、泥沙影响机理研究”专题。本专题的研究目的有两个:一是分析不同类型区域降水、径流、泥沙间的关系和流域的汇流、输沙特性,研究不同类型区的产流产沙机制。二是采用对比分析途径,分析不同类型区在水土保持措施作用前后的降水、径流、输沙过程变化及其相关关系,根据不同类型水土保持措施实施的实际,研究不同水土保持措施在不同条件下对水资源、泥沙的影响机理。通过本专题的研究,为“水土保持措施的蓄水保土指标体系的评价与研究”和“水土保持措施对水资源、泥沙影响评价模型研究”两个专题服务。同时,黄委水文局研究所还承担了第三专题中的部分研究工作。本专著就是由黄委水文局研究所和西北农林科技大学资源环境学院就本课题中的有关研究成果编写而成。

1.2 研究思路与方法

基于水文学、水力学、土壤侵蚀力学与水土保持原理,研究流域产流产沙的影响机制,分析影响水土保持措施蓄水保土指标的因素,探讨不同措施对水沙的影响机理。

首先是进行资料查新,黄土高原产流产沙机制研究前人曾做过大量工作,且微观性成果较多。本次以各地貌单元为主的代表性水文站为基本单元,通过水文站以上降雨、径流、泥沙间的宏观对比,找出差异,并结合地质、地貌、土壤及植被的特殊性进行分析与解释。

其次是以黄土高原沟壑区(淳化县)和黄土丘陵沟壑区(安塞县)坡耕地为研究对象,在分析已有小区资料的基础上,利用侵蚀学、土壤学、水文学、水力学、统计学原理和方法,进行室内外人工降雨试验,利用接触式测针糙度仪对农业耕作措施数量化,分析了农业耕作措施对地表糙度的影响,并就地表糙度对水沙的影响作了定量研究;探讨了梯田及林草措施的蓄水拦沙机理和蓄水拦沙效应。

在研究沟壑坝库措施对泥沙影响方面,对黄丘(一)副区岔巴沟流域的坝地淤积量进行了实际测量,用最新的实测资料进行减蚀机理分析。

第三是进行理论分析。不论是不同地貌单元产流产沙机制研究,还是不同水土保持措施减水减沙机理以及水土保持措施减水减沙模型研究中,都比较注意理论上的严谨性。

1.3 主要进展与成果

通过两个单位的联合研究,对以下几个问题有如下进展与成果。

1.3.1 增加入渗,减少水土流失

通过降雨、径流、输沙关系分析看出,黄丘区和易侵蚀基岩区(砭砂岩区)、汛期降雨量 100mm、年降水量 200mm 以下基本上不产流产沙,并且汛期径流泥沙关系基本上通过原点,说明“沙随水来,沙随水去”。增加入渗是减少水土流失的根本措施之一。这一观点,并非作者首创,朱显谟先生在《再论黄土高原国土整治“28 字方略”》等文章中就明确提出水土保持的目标是全部降水就地入渗拦蓄^[1]。

1.3.2 科学耕种,减少坡面侵蚀

模拟试验表明,不同的耕作管理措施,改变微地形,增加地表糙度,改善土壤物理性状,强化降雨入渗。其中,在相同的降雨条件下,土壤稳定入渗速率是等高耕作 > 人工掏挖 > 人工锄耕 > 对照直线坡。在黄土高原沟壑区等高耕作与直线坡相比,可提高入渗 67%; 人工掏挖可提高入渗 41%; 人工锄耕可提高入渗 29%。在黄土丘陵沟壑区等高耕作与直线坡相比,可提高入渗 45%; 人工掏挖可提高入渗 22%; 人工锄耕可提高入渗 14%。在中小雨强情况下,这种情况更为显著。

1.3.3 兴修梯田,增加入渗

水平梯田改变了地面坡度和径流系数,缩短了坡长,降水落到田面,冲刷力 $F_{\max} = 0$, 即田面超渗雨不具有冲刷土壤的能量,不易形成汇流,直接入渗成为壤中流,从而避免了径流的产生,起到了减蚀的作用,这就是水平梯田减蚀作用的机理所在。在年产流降雨量小于 125mm 时,水平梯田的蓄水保土效益为 100%; 大于 125mm 时,蓄水保土效益分别为 83.1%、79.3%。

1.3.4 植树种草,保持水土

林草措施的林冠截留作用可保护地面免受打击;凋落物具有持水作用,可调节地表径流,增加土壤入渗时间,消减径流动能,加强和增进土壤渗透性;根系对土壤有很好的穿插、

缠绕、固结作用,众多的支毛根具有固结、保护阻挡、吸附牵拉作用,可有效提高土壤的抗冲性;植被残败体可以直接进入土壤,提高土壤有机质含量,而土壤抗蚀性直接与土壤有机质含量有关。林草植被可以有效地提高坡面的蓄水保土效益,其效益均可达 40% 以上。

1.3.5 筑坝淤地,减少重力侵蚀

在黄河中游黄土高原地区,重力侵蚀十分活跃,所占比重也很大。开展大规模淤地坝建设,一方面可以利用其库容,有效拦截坡面及其上游支沟下泄的泥沙,同时由于坝库内的淤泥抬高侵蚀基点,埋压和“缩减”了裸露的黄土陡崖,从而增加了黄土悬崖陡壁的稳定性,减少其垮塌的概率和垮塌的厚度,因而减少水土流失。据岔巴沟坝库测量资料估计,其减蚀量约占天然输沙量的 21%,达到每公顷坝地 1 556t。只要坝库不垮,这种减蚀作用将是长期的。坝地的发展,一是增加稳定性,二是保证退耕还林还草。因此,在黄河中游多沙粗沙区大力筑坝淤地,起到“一箭多雕”的作用。

1.3.6 水土保持措施影响基流

岔巴沟流域坝库措施增加地下径流补给系数、基流与总径流的比值和地下径流系数,空库大坝时明显,随着淤积,作用逐渐减少。岔巴沟流域坝库措施减少地表径流与总径流的比值和地表径流系数,剩余库容较大时减少明显,剩余库容较小时,作用减缓。

通过北洛河支流葫芦河张村驿以上与北洛河上游刘家河以上、云岩河临镇以上与延河甘谷驿以上的对比分析得出,植被措施消耗水资源,也消耗地下径流。两流域分析认为,植被措施对地下径流蒸发后的总结果是减小地下径流补给系数,但地下径流与总径流的比值是增加的。

第2章 黄土高原不同类型区 产流产沙机理探讨

从水土流失强弱的角度看,黄土高原可分为严重流失区、中度流失区和轻微流失区。在严重流失区内主要有黄土丘陵沟壑区和黄土高原沟壑区;中度流失区主要有风沙区、土石山区等,而黄土阶地区和冲积平原区的水土流失比较轻微。

从产流产沙的角度看,黄土高原对产流产沙影响较明显且差异较大的下垫面类型主要有黄土区、风沙区、易侵蚀基岩(指朱罗纪白垩纪的泥质岩或泥质砂岩——当地俗称砒砂岩)区和林区。

从表 2-1 可见,由于风沙土、黄土的孔隙度较高,稳渗速度较大;而在基岩出露区,稳渗速度较小,有利于产流、集流,形成较大洪峰并侵蚀产沙;黄土质地较砒砂岩疏松,但从水中崩解速度看,砒砂岩,尤其是其中的泥岩,崩解速度不亚于马兰黄土,因此在皇甫川、窟野河等流域中,砒砂岩出露区产沙模数较高。

表 2-1 黄河中游多沙粗沙区与水沙过程有关的地表物质特性^[2]

地表物质	地质年代	天然密度 (g/cm ³)	密度程度	稳渗速度 (mm/min)	水中崩解时间 (s)	孔隙度 (%)
马兰黄土	Q ₃	1.3~1.45	较松	2.1~2.8	21~50	50~55
离石黄土	Q ₂	1.4~1.55	较紧密		40~140	45~50
风沙土	Q ₄	1.4~1.5	松散	3~3.5		
砒砂岩	泥岩 砂砾岩	T,N T,J	紧密 极紧密	0.6~1.2	<30 >300	

研究表明:地表组成物的抗蚀性是一个十分复杂的问题。虽然国内外学者对此已进行过长期研究,大致通过两个途径进行:一是在相似条件下,进行小区对比观测研究;另一个是纯粹的土力学性质的理论研究。当前比较多的还是径流小区的观测研究,从比较中得到土壤类型与侵蚀的关系(见表 2-2)。土壤与侵蚀之间没有像其他因素那样,有一个相对稳定的关系式。同一类土壤因降雨强度、坡度、季节气温变化,它的抗蚀性都不一样,没有一个相对稳定的抗蚀值。如砒砂岩土类尽管抗蚀性能高于其他土壤,它受到强烈的风化以后,其抗蚀性能减弱,反而更容易受到侵蚀。过去的研究表明:皇甫川流域砒砂岩土壤分布是最强烈侵蚀区之一。

黄土高原不同水土流失类型区基本情况见表 2-3。

表 2-2 皇甫川流域三类土壤抗蚀值表^[3]

土类	砒砂岩	黄土	沙黄土	风沙区
域值	0.021~0.04	0.015~0.025	0.01~0.02	0.005~0.01
均值	0.03	0.02	0.015	0.0075

表 2-3 黄土高原不同水土流失类型区基本情况

类型区	面积(万 km ²)				人口密度 (人/km ²)		地形、地貌				林草 覆盖率 (%)	水土流 失特点	年均侵 蚀模数 (t/km ²)	年均 降水量 (mm)	年均 径流深 (mm)	治理 面积 (km ²)	治理 程度 (%)
	总	流失	耕地	总	农业	沟壑 密度 (km/km ²)	地面坡度组成(%)										
							<5°	5°~ 15°	15°~ 25°	>25°							
严重 流失区	第一副区	7.08	6.72	2.03	76	69	3~7	9	7	16	68	沟蚀、面蚀 均很严重	10 000~ 30 000	400~500	40~50	19 288	28.6
	第二副区	2.72	2.37	0.76	58	50	3~5	7	19	22	52	沟蚀、面蚀 均很严重	500~ 15 000	450~500	30~60	5 594	23.6
	第三副区	3.55	3.11	1.55	221	204	2~4	7	32	42	19	面蚀为主 沟蚀次之	1 000~ 10 000	500~550	80~130	11 271	36.2
	第四副区	2.34	2.23	0.61	174	142	2~4	8	21	40	31	面蚀为主 沟蚀次之	7 000~ 10 000	400~450	25~50	3 882	17.4
	第五副区	6.19	6.00	1.76	86	64	1~3	21	27	39	13	沟蚀为主 面蚀次之	3 000~ 6 000	300~400	10~25	11 526	19.2
黄土高原 沟壑区	小 计	3.27	3.16	1.32	180	161	1~3	39	17	21	23	沟蚀为主 面蚀次之	2 000~ 5 000	500~600	30~50	11 870	37.6
中 度 流 失 区	小 计	25.15	23.59	8.03	120	103											
	土石山区	13.87	9.33	1.88	63	55	1~3	3	4	21	72	坡耕地上 有面蚀	100~ 5 000	200~700	50~200	19 632	21.0
	风沙区	6.51	3.70	0.23	16	13	2~3	90	6	3	1	风蚀为主 沙丘移动	200~ 2 000	150~400	15~20	9 710	26.3
	干旱草 原区	5.70	4.55	0.38	18	16	1~2	2	58	30	10	风蚀为主 水蚀较轻	200~ 2 000	180~240	2~5	2 888	6.3
	高地草 原区	3.69	1.57	0.13	24	20	1~2	12	24	31	33	坡耕地上 有面蚀	200~ 500	400~600	25~80	566	3.5
轻 微 流 失 区	丘陵林区	1.97	0.88	0.13	23	19	2~4	8	3	44	45	坡耕地上 有面蚀	100~ 200	600~700	25~100	1 849	20.9
	小 计	31.74	20.04	2.75	38	33											
	黄土阶 地区	2.32	1.98	1.52	419	378	1~2	84	14	1	1	面蚀轻微 略有沟蚀	1 000~ 3 000	500~650	50~150	8 577	43.4
合 计	冲积平 原区	5.06	0.24	2.64	410	307	0.2~0.3	100				流失轻微	100~ 200	200~600	5~150	1 170	49.2
	小 计	7.38	2.21	4.16	413	329											
合 计	合 计	64.28	45.84	14.94	113	95										107 823	23.5

注:由文献[4]表 2-16、表 2-17、表 2-18 和表 4-39 整理而来。

2.1 不同下垫面的产水特性

鉴于地面物质组成(下垫面)特性在不同地域间存在着较大的差异,故对产水产沙过程及其数量的地域分布产生了重要的影响,现分别阐述。由于1960年以前资料参差不齐,1970年以后受人类活动影响较大,为便于同步比较,统一选取1960~1970年系列来讨论(秃尾河高家堡除外)。虽然系列较短,作为比较不同地貌类型区产流产沙的差异还是比较明显的。

2.1.1 产流方式

2.1.1.1 基岩出露区

在基岩出露区,地面透水性较弱,蓄水能力较低,集流快,地表径流十分突出,而地下径流量较少。如皇甫川支流纳林川,其西侧支流虎石沟、圪秋沟、干昌板沟、尔架麻沟等流域,均位于砭砂岩丘陵沟壑区,总面积 915km^2 ,占纳林川沙圪堵测站以上流域面积 1351km^2 的67.7%,其多年平均基流量仅占年径流总量的10%,而地表径流占90%,是基流径流比重最小的区域(见图2-1),多年平均单位面积洪峰模数也是较大的地区,达到 $35\text{m}^3/(\text{s}\cdot\text{km}^2)$ (见表2-4和图2-2)。

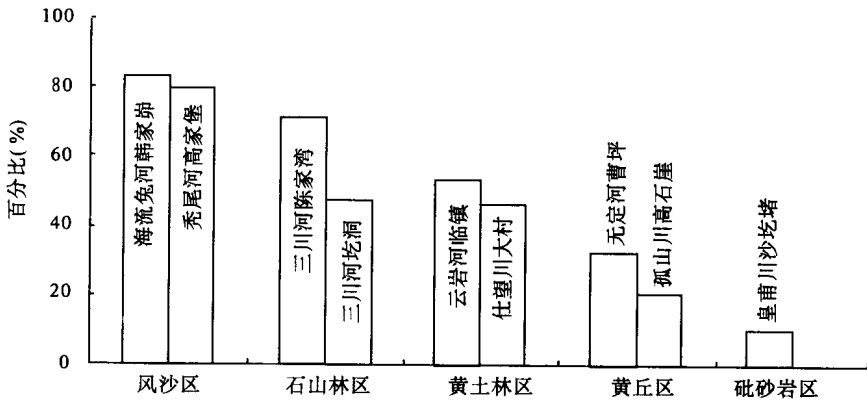


图 2-1 不同地貌类型区基流占总径流量百分比柱状图

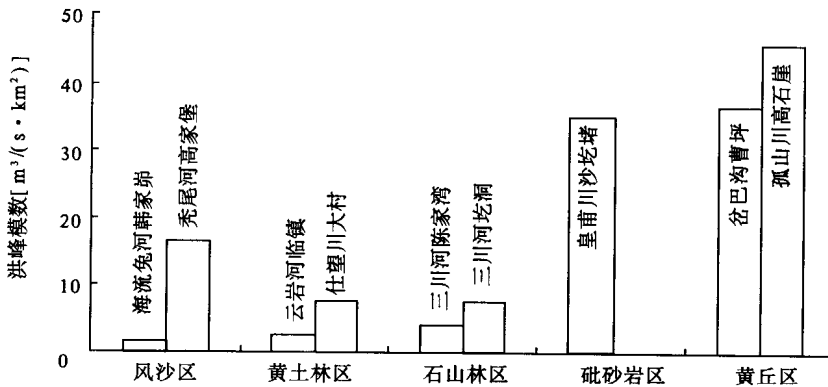


图 2-2 不同地貌类型区洪峰模数柱状图

2.1.1.2 风沙区

在风沙覆盖区,降雨几乎全部入渗,形成稳定的地下补给水。据海流兔河韩家崙以上和秃尾河高家堡以上资料分析,地下径流量占总径流量的 80% ~ 84%,而地表径流只占 16% ~ 20%(表 2-4 和图 2-1)。在沙漠,雨滴落地很快入渗沙层,沙层的毛细管粗短,地面蒸发较黄土地区为小,形成丰沛的地下径流。地表径流主要来源于少量的黄土、村庄、道路等地段的超渗产流及部分水地中的蓄满产流,洪峰模数远比黄丘区和砭砂岩区小(见图 2-2),主要是部分黄土区、林区和道路产生的,秃尾河高家堡以上就有部分黄土盖沙区,因而洪峰模数和输沙模数等比韩家崙以上大。

2.1.1.3 黄土区

黄土覆盖地区,由于沟壑密度大且坡度较陡,又由于该区多高强度降水,因而极易产生地表径流。表 2-4 中列举的岔巴沟曹坪以上和孤山川高石崖以上地表径流高达 68% ~ 80%,洪峰模数在 $37 \sim 46 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$ 之间。

2.1.1.4 石山林区

比较典型的石山林区是三川河的北川河圪洞和陈家湾以上,地面有灌丛和森林覆盖,洪峰模数较小,在 $10 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$ 以下,基流比较丰富,在 47% ~ 71% 之间,高于黄土丘陵区 and 砭砂岩区。

2.1.1.5 黄土丘陵林区

河龙区间南部的云岩河和仕望川是比较典型的黄土丘陵林区,该区高强度暴雨相对较少,再加之森林植被的蒸腾作用,径流深不大,产流系数也很小;但由于土壤中根系的作用,基流比较丰富,约占 50%,洪峰模数也很小,在 $10 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$ 以下。

2.1.2 径流过程

由于风沙区地面渗水性极强,加之河网密度低,地面较平缓,更有利于降雨入渗,因而河川流量变幅较小。如海流兔河韩家崙以及秃尾河高家堡月径流量最大最小比值为 10 左右(见表 2-5),属变幅最小的地区(见图 2-3)。

基岩出露区,由于地表径流比重大,加之砭砂岩风化程度较高,沟谷切割较深,谷坡陡峻,更有利于地表径流的集中。如纳林川沙圪堵站以上流域,一场占年均雨量 38.6% 的暴雨,可产生占年均径流量 66% 的径流。其最大月径流量可达 $12\,642 \text{ 万 m}^3$ (1967 年 8 月),最小月径流量多次出现 0(见表 2-5)。

黄土覆盖区产流特性介于林区和基岩出露区之间。该区河流平均月径流变幅较基岩区河流为小,而远较风沙区和林区的河流为大。

2.1.3 暴雨径流特征

不同下垫面流域暴雨径流关系亦存在着显著的差异。例如,基岩区的纳林川沙圪堵站以上流域,1972 年 7 月 19 日一场暴雨,24 小时雨量达 156.4mm,占多年平均雨量 405mm 的 38.6%,相应径流量为 0.51 亿 m^3 ,占该年径流总量(0.72 亿 m^3)的 71%。

在黄土区,占年雨量的 20% 左右的一场暴雨,就可产生占年径流总量 50% ~ 60% 的径流量(表 2-6),黄土区的河流,洪峰流量往往是常流量的数百倍甚至上千倍。

表 2-4 黄河中游不同下垫面类型区径流构成分析

下垫面 类型区	河 流	站 名	面积 (km ²)	河道平 均比降 (‰)	年 均 降水量 P(mm)	年 均 径流量 W(万 m ³)	年均径流深 (mm)			径流组成 (%)		产流系数 (%)		历年最大洪 峰流量均值 $\bar{Q}_m$ (m ³ /s)	洪峰流量模数 $\bar{Q}_m/\sqrt{F}$ [m ³ /(s·km ²)]	统计年份
							基流 R_g	地表 R_s	合计 R	基流 R_g	地表 R_s	合计 R	基流 R_g			
风沙区	海流兔河	韩家站	2 452	3.36	386.9	10 868	37.0	7.3	44.3	83.5	16.5	1.9	11.4	77	1.6	1960 ~ 1970
	秃尾河	高家堡	2 095	4.65	424.0	35 584	135.7	34.2	169.9	79.9	20.1	8.1	40.1	764	16.7	1966 ~ 1976
砒砂岩区	皇甫川	沙圪堵	1 351	3.89	376.2	7 092	5.2	47.3	52.5	9.8	90.2	12.6	14.0	1 306	35.3	1960 ~ 1970
黄土丘陵区	岔巴沟	曹坪	187	7.57	435.3	1 061	18.3	38.4	56.7	32.2	67.8	8.8	13.0	503	36.8	1960 ~ 1970
	孤山川	高石崖	1 263	5.48	434.5	10 177	16.1	64.4	80.5	20	80	14.8	18.5	1 641	46.2	1960 ~ 1970
石山林区	三川河	圪洞	749	8.32	534.5	8 216	51.8	57.9	109.7	47.2	52.8	10.8	20.5	216	7.9	1960 ~ 1970
	三川河	陈家湾	280	15.4	524.6	2 030	51.5	21.0	72.5	71.1	28.9	4.0	13.8	71	4.2	1960 ~ 1970
黄土丘陵林区	云岩河	临镇	1 121	4.11	553.0	2 573	12.1	10.8	22.9	52.9	47.1	2.0	4.2	89	2.7	1960 ~ 1970
	仕望川	大村	2 141	7.72	579.5	9 929	21.4	25.0	46.4	46.1	53.9	4.3	8.0	364	7.9	1960 ~ 1970

注: (1) 基流由小到大的砒砂岩(10%)—黄土丘陵区(50%左右)—石山林区(50%~70%)—风沙区(80%以上);

(2) 洪峰模数($\bar{Q}_m/\sqrt{F}$): 黄土丘陵区砒砂岩区 ≥ 35 , 其他区 < 20 , 其中 $\bar{Q}_m$ 单位为 m³/s, F 的单位为 km²。

表 2-5 黄河中游不同下垫面类型区多年平均月径流变幅

下垫面类型区	河流	站名	面积 (km ²)	最大月径流量 $\bar{W}_{\max}$ (万 m ³)	出现年月	最小月径流量 $\bar{W}_{\min}$ (万 m ³)	出现年月	$\bar{W}_{\max}/\bar{W}_{\min}$	统计年份
风沙区	海流兔河	韩家岭	2 452	4 500	1964·08	394	1969·06	11.4	1960 ~ 1970
	秃尾河	高家堡	2 095	12 722	1967·08	1 379	1967·01	9.2	1966 ~ 1976
砒砂岩区	皇甫川	沙圪堵	1 351	12 642	1967·08	0	多次	/	1960 ~ 1970
黄丘区	岔巴沟	曹坪	187	822	1966·08	5	多次	164	1960 ~ 1970
	孤山川	高石崖	1 263	12 937	1967·08	3	多次	4 312	1960 ~ 1970
石山林区	三川河	圪洞	749	6 610	1967·09	139	1967·01	47.6	1960 ~ 1970
	三川河	陈家湾	280	1 019	1964·09	43	1961·01	23.7	1960 ~ 1970
黄土丘陵林区	云岩河	临镇	1 121	1 050	1963·09	21	1962·06	50.0	1960 ~ 1970
	仕望川	大村	2 141	4 925	1964·09	67	1961·01	73.5	1960 ~ 1970

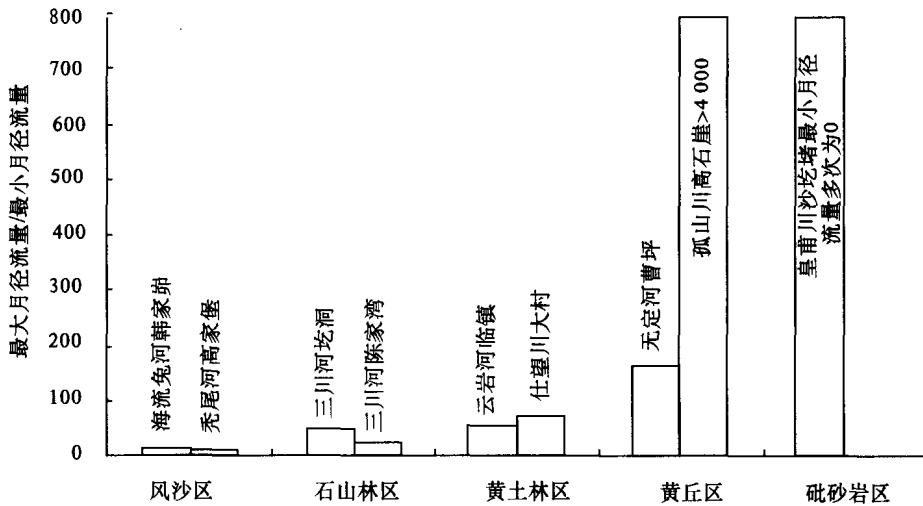


图 2-3 不同地貌类型区径流量月最大值与月最小值比值柱状图

在风沙区的河流,如芹河,其洪峰流量只有常流量的 2~8 倍,在这里,24 小时降雨小于 10mm,一般不产流,降雨 10~15mm 时发生中等洪水,降雨大于 50mm 才发生较大洪水。例如秃尾河高家堡以上流域,发生在 1970 年 7 月 31 日到 8 月 1 日的一场大暴雨,雨量逾 100mm,占年降水量的 25% 左右,可是相应的径流量仅及全年径流量的 10%。

2.1.4 几点认识

(1)径流组成。砒砂岩区地表径流比重最大,达 90%,其次是黄土区(70%~80%),黄土林区(50%)和石山林区(30%~50%),风沙区最小(20%以下)。

(2)径流过程。风沙区最平稳,砒砂岩和黄土区变幅最大,从径流量最大与最小比值来看,风沙区比值为 10 左右,林区在 20~70 之间,而黄土区和基岩区可以上千或上万。

(3)暴雨径流特性。风沙区暴雨洪水不明显,林区也不十分明显,而黄土区和砒砂岩区暴雨洪水特征十分明显。

(4)洪峰模数($\bar{Q}_m/\sqrt{F}$):黄丘区和砭砂岩区 ≥ 20 ,林区和风沙区 < 20 。

表 2-6 黄河中游部分流域暴雨($P_{\text{暴}}$)、暴雨径流模数($M_{w\text{暴}}$)及暴雨输沙模数($M_{s\text{暴}}$)^[2]

下垫面 类型	流 域	时 间 (年·月·日)	$P_{\text{暴}}$ (mm)	$P_{\text{暴}}/P_{\text{年}}$ (%)	$M_{w\text{暴}}$ (m^3/km^2)	$M_{w\text{暴}}/M_{w\text{年}}$ (%)	$M_{s\text{暴}}$ (t/km^2)	$M_{s\text{暴}}/M_{s\text{年}}$ (%)
黄土区	韭园沟	1956.08.08	45.1	9.0	19 640	54.0	4 668	70.0
	韭园沟	1961.08.01	57.7	10.0	34 084		14 928	89.0
	王家沟	1969.07.26	87.6	13.7	47 472	87.7	36 455	90.8
	延 河	1977.07.04	215.0	43.6	64 165	36.4	15 988	67.2
	吕二沟	1962.07.26	74.3		8 934	63.0	2 416	62.0
基岩区	乌兰木伦河	1978.08.31	59.8	11.3	12 589	15.5	12 240	83.6
	乌兰木伦河	1984.07.03	33.6	7.2	4 548	8.6	5 694	70.1
	乌兰木伦河	1985.08.05	80.5	21.9	9 911	12.0	16 212	81.3
	乌兰木伦河	1989.07.21	45.0		10 063	26.0	7 640	95.0
	纳林川	1972.07.19	120.0	31.5	35 722	67.0	30 898	95.0
风沙区	海流兔河	1970 年最大 1 日降雨	188.9	47.0		10.0		13.0

2.2 不同下垫面的产沙特性

2.2.1 产沙方式及强度^[4]

鉴于黄土、风沙、基岩三类下垫面物质抗蚀性、渗透性等物理力学性质的差异及地表形态结构的差异,故其产沙方式和强度也有很大的不同(表 2-7)。

在砭砂岩区,由于砭砂岩受冷热、干湿变化而分解,并在水中崩解的速度很快,地面切割深度很大,十分破碎,谷坡陡峻,因此块体崩塌、散落作用十分强烈,加之地面稳渗速率较小,集流快,径流集中,故水流输沙强度大,侵蚀模数大于黄土覆盖区。

在黄土覆盖区,沟谷地以谷坡重力侵蚀和谷道水流侵蚀为主,沟间地以坡面冲刷为主。由于黄土覆盖层较厚,垂直节理发育,质地疏松,遇水崩解速度较快,尤其是表层马兰黄土,其抗蚀力很弱。因此,地面沟壑密度一般较大,侵蚀模数较高。

然而,发育在风沙区的河流,沟壑密度极低,其上游广大地区往往为四周流沙所包围,中间为草滩盆地,地下水位较高,部分滩地有盐渍化现象,但无明显地表径流,故水蚀微弱,以风蚀为主。只有流域的中下游,才是河道形成区,重力侵蚀和水流侵蚀集中,是流域泥沙输移直接来源区。据观测,其平均侵蚀模数可达 1 万 $\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,与黄土区的侵蚀强度接近。

从表 2-7 和图 2-4 看出,单位沙量所需降水量风沙区韩家崄最大,达 1 600 m^3/t ,黄丘区和砭砂岩区最小,约为 20 m^3/t ,而从年输沙模数的角度来看,黄丘区和砭砂岩区最高,风沙区和林区都很低(见图 2-5)。从含沙量分布来看,各地貌类型区差异是较大的(见图 2-6),黄丘区和砭砂岩区是高含沙地区,因此含沙量最高,它与输沙模数图的分布是一致的。

表 2-7 黄河中游不同下垫面类型区多年平均输沙量分析

下垫面 类型区	河 流	站 名	面积 (km ²)	年均降水量						输沙量		径流量		$P_{\text{汛}}/P_{\text{年}}$ (%)	$W_{\text{汛}}/W_{\text{年}}$ (%)	水沙比 (m ³ /t)		M_s (t/km ²)	含沙量 (kg/m ³)		统计 年份
				(mm)		(万 m ³)				(万 t)		(万 m ³)				$P_{\text{汛}}/W_{\text{汛}}$	$P_{\text{年}}/W_{\text{年}}$		汛期	全年	
				汛期 ($P_{\text{汛}}$)	全年 ($P_{\text{年}}$)	汛期 ($P_{\text{汛}}$)	全年 ($P_{\text{年}}$)	汛期 ($W_{\text{汛}}$)	全年 ($W_{\text{年}}$)	汛期 ($W_{\text{汛}}$)	全年 ($W_{\text{年}}$)										
												汛期 ($P_{\text{汛}}$)	全年 ($P_{\text{年}}$)								
风沙区	海流兔河	韩家昂	2 452	281.4	386.9	68 999	94 868	30.2	56.4	3 811	10 868			72.7	53.5	2 285	1 682	230	7.9	5.2	1960 ~ 1970
	秃尾河	高家堡	2 095	332.4	424.0	69 638	88 828	1 136	1 208	13 577	35 584	78.4	94.0	61	74	5 766	83.6	34.0	1966 ~ 1976		
	砭砂岩区	皇甫川	沙圪堵	1 351	279.6	376.2	37 774	50 825	2 128	2 250	5 654	7 092	74.3	94.6	17.8	23	16 654	376.3	317.2	1960 ~ 1970	
		无定河	曹坪	187	311.6	435.3	5 827	8 140	363	395	664	1 061	71.6	91.9	16.1	21	21 123	547.0	372.3	1960 ~ 1970	
黄丘区	孤山川	高石崖	1 263	331.4	434.5	41 856	54 877	2 538	2 568	7 059	10 177	76.3	98.8	16.5	21	20 333	359.5	252.3	1960 ~ 1970		
	三川河	圪洞	749	380.3	534.5	28 484	40 034	146	150	4 108	8 216	71.2	97.3	195	267	2 003	35.6	18.3	1960 ~ 1970		
石山 林区	三川河	陈家湾	280	372.3	524.6	10 424	14 689	10.4	10.6	802	2 030	71.0	98.1	1 002	1 386	379	13.0	5.2	1960 ~ 1970		
	云岩河	临镇	1 121	374.2	553.0	41 948	61 991	48.6	52.1	1 153	2 573	67.7	93.3	863	1 190	465	42.2	20.2	1960 ~ 1970		
黄土丘 陵区	仕望川	大村	2 141	394.1	579.5	84 377	124 071	364	370	4 200	9 929	68.0	98.4	232	335	1 728	86.7	37.2	1960 ~ 1970		

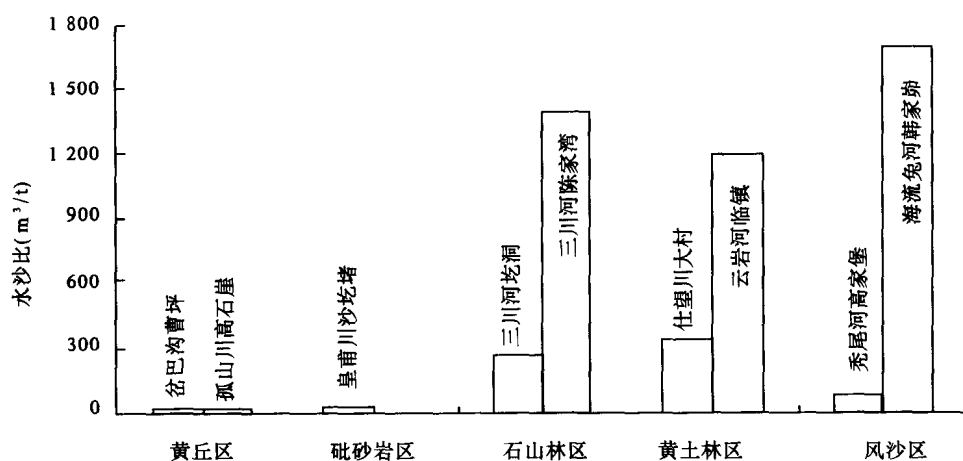


图 2-4 不同地貌类型区每吨输沙量所需降雨量柱状图

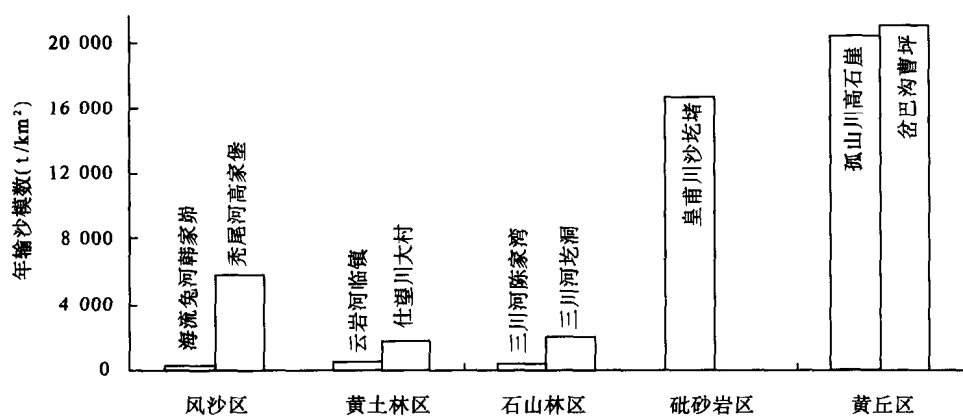


图 2-5 不同地貌类型区年输沙模数柱状图

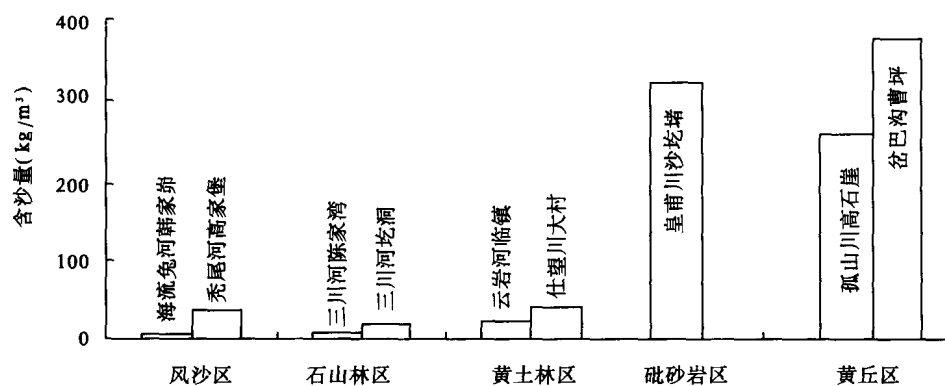


图 2-6 不同地貌类型区含沙量柱状图