



黄土高原 水沙变化新格局

穆兴民 赵广举 高鹏 孙文义 等著



科学出版社

黄土高原水沙变化新格局

穆兴民 赵广举 高鹏 孙文义 等著

地质出版社

地质出版社

地质出版社

地质出版社

地质出版社

地质出版社

地质出版社

地质出版社

地质出版社

地质出版社

地质出版社

科学出版社

北京



内 容 简 介

黄河径流和水沙变化研究是一个永恒的课题。本专著集成作者团队多年研究成果,系统分析了黄土高原水沙研究进展,重点围绕21世纪以来黄河水沙的突兀性减少问题,分析了影响黄土高原降雨及水土保持措施变化;从典型支流到区域,揭示了黄土高原水沙格局变化及其主要原因;针对各界关注的焦点,研究了黄土高原植被及淤地坝的减水减沙机理及其作用。

本书可供水利、水土保持、水资源、地理、泥沙、环境、农业等领域的科技工作者、大专院校师生和流域管理者阅读。

图书在版编目(CIP)数据

黄土高原水沙变化新格局 / 穆兴民等著. —北京: 科学出版社, 2019.4
ISBN 978-7-03-059858-5

I. ①黄… II. ①穆… III. ①黄河—含沙水流—研究 IV. ①TV152

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第264371号

责任编辑: 朱海燕 石 珺 / 责任校对: 何艳萍

责任印制: 肖 兴 / 封面设计: 北京图阅盛世文化有限公司

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京画中画印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019年4月第一版 开本: 787×1092 1/16

2019年4月第一次印刷 印张: 22 1/4

字数: 516 000

定价: 198.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

《黄土高原水沙变化新格局》著者委员会

穆兴民 赵广举 高 鹏 孙文义 焦菊英 温仲明

顾朝军 魏艳红 田 鹏 宋小燕 李朋飞 何 毅

前 言

黄河治理与开发决策的核心是黄河的径流和泥沙。黄土高原自然环境决定黄河水沙变化研究是一个永恒的研究课题。黄河水沙的增加、减少甚或不变都会引起各界关注。进入 21 世纪,黄河径流量和输沙量显著减少,黄河潼关站径流量由 1919~1960 年年均 427.5 亿 m^3 减少至 2010~2016 年 228.2 亿 m^3 ,输沙量由 1919~1960 年年均 15.3 亿 t (1949 年之前采用直线插补) 减少至 2010~2016 年的 2.5 亿 t,含沙量则由 $34.7 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 减少至 $12.7 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,黄河输沙量和含沙量之低是人们普遍未曾预料到的,黄河水沙变化问题再次成为人们关注的焦点。

自古以来,我国古文典籍中就有对黄河水沙之表述。在古代中国,河特指黄河。在《孟子·滕文公》中“当尧之时,洪水横流,泛滥于天下”就是对黄河洪水问题的写照,而汉代由班固编著的第二部中国古代水利通史《汉书·沟洫志》中有“河灾之羨溢,害中国也尤甚”之述,直到中华人民共和国成立初期,黄河治理之焦点仍为洪水之治,其可从《新黄河》(1952 年更名为《人民黄河》)的刊文窥之。关于黄河泥沙,《左传·襄公八年》的《周诗》中有“俟河之清,人寿几何”,魏晋时期,李康的《运命论》中有“夫黄河清而圣人生,里社鸣而圣人出,群龙见而圣人用。”明代,程登吉编撰的儿童启蒙读物《幼学琼林》中则有“黄河清圣人出”之表。部分文献典籍甚至有对黄河水沙量的描述,如《汉书·沟洫志》中有“大司马史长安张戎(四)言:……河水重浊,号为一石水而六斗泥……”的描述。到了清乾隆八年,陕西道监御史给乾隆皇帝的《河防事宜条奏》中则有了“黄河之沙,多出自三门以上及山西中条山一带破涧中”关于泥沙来源之述。

但作为一门科学,黄河流域的气象水文科学测验始于 20 世纪初,最早于 1916 年 1 月在山西省太原市设立气象站,1919 年在黄河的陕州设立水文站(河南省三门峡市陕州区),较之欧美设立时间甚短,更因战乱以致观测工作时断时续,加之技术落后、设备低劣,早期的观测结果差异甚大。如 1934 年潼关站和陕州站两站输沙量相差达 8 亿 t,显然有误。因潼关站和陕州站两站之间的土地面积仅 0.552 万 km^2 。黄河水利委员会泥沙研究所经过资料修订,1952 年在《人民黄河》杂志发表《黄河泥沙的数量与来源的分析》一文,指出黄河泥沙计算中存在的问题,首次系统阐释了黄河输沙量及泥沙来源。黄河水利委员会组织人员编辑整理,1962 年印刷《黄河干支流各主要断面 1919~1960 年水量、沙量计算成果》,刊布黄河多年平均输沙量为 16 亿 t (1919~1960 年黄河陕县水文站)并长期被广泛使用。

约翰·开普勒说“测量就是为了知晓”。尼罗河每年的泛滥推动了几何学的发展,因为每次洪水过后都要重新进行土地测量与精确分配。黄河水沙的“跌宕起伏”也在不断推动水文学及泥沙科学的发展和含沙河流治理技术的进步。1949 年之后,沙玉清、

钱宁等对高含沙水流的研究都处于国际领先地位,从国外期刊收录的我国学者在泥沙方面的研究论文亦可见一斑。在《水文学史》(Asit K. Biswas 著,刘国纬译)中,总结柏拉图和亚里士多德的思考方法时指出“柏拉图讲授知识时,通常表现为人与人之间想象丰富的对话形式,因此他的著作中往往很难把历史事实与纯粹的幻想区分开来。而亚里士多德的方法却截然不同,他几乎完全忠实地把以往博学的人的观点收集起来,然后再加进自己的观点。”沈学汶认为钱宁和万兆惠合著的《泥沙动力学》“在成书过程中,对欧洲、美洲、俄国、日本、新西兰和其他许多国家的泥沙文献显然是经过精心的分析。作者们做了很大的努力将颇有价值的中国的数据和研究成果与世界各地的成果相联系”,从而得到国际同行的认可。进入 21 世纪以来,黄河水沙的突兀性减少,再次激起学者们研究黄河水沙问题的兴趣。

中国科学院、科技部、水利部等先后部署科研项目开展黄土高原水土保持及水沙变化研究,本书作者有幸主持或参加了“十二五”中国科学院知识创新工程重大项目、“十三五”国家重点研发计划、水利部行业公益专项、国家自然科学基金等项目。集作者近 18 年的黄土高原水土保持与水沙研究之新建展,拓展和深化《黄土高原生态水文研究》一书内容,完成《黄土高原水沙变化新格局》之专著。参与本书撰写的作者长期从事黄土高原水土保持与生态水文研究工作,大多都有 10 年以上的工作经历,本书是作者们多年研究工作之集成,甚或有不同见解,他人亦难纠异,留之。著述面对黄河以黄土高原为重点,阐述黄河及重点支流的径流及输沙的格局变化;针对近年关注焦点,分析植被及淤地坝的水沙效应。本书由穆兴民策划、统稿。全书共七章,第 1 章回顾了黄土高原水土流失与水土保持概况,由孙文义、宋小燕执笔,第 2 章针对影响水土流失的自然因素,重点分析侵蚀性降雨特征的变化,由顾朝军和何毅执笔,第 3、4 章阐述黄河及重点支流径流及输沙的时空演变,分别由高鹏、赵广举、田鹏及李朋飞执笔,第 5 章阐述植被的水土保持作用及其对径流和输沙的影响,由温仲明、穆兴民执笔。第 6、7 章阐述淤地坝拦沙作用及其分析方法,分别由焦菊英、魏艳红和赵广举执笔。

由于领域知识繁杂,涉及学科众多,本书难免有疏漏之处,恳请读者批评指正。

穆兴民

2018 年 8 月

目 录

前言

第1章 黄土高原的水土流失与水土保持	1
1.1 黄土高原地貌和土壤侵蚀	1
1.2 黄土高原土壤侵蚀影响因素	3
1.3 黄土高原土壤侵蚀分区	5
1.3.1 黄秉维的土壤侵蚀分区	6
1.3.2 朱显谟的黄土高原土壤侵蚀分区	9
1.3.3 水利部黄河流域土壤侵蚀分区	10
1.3.4 黄土高原水土流失综合治理分区	11
1.4 黄土高原土壤侵蚀评价	13
1.4.1 土壤侵蚀定性评价方法	13
1.4.2 土壤侵蚀定量评价方法	14
1.4.3 土壤侵蚀模型在黄土高原的应用述评	15
1.5 黄土高原水土流失状况	16
1.5.1 土壤侵蚀强度分布	16
1.5.2 土壤侵蚀强度的区域差异	18
1.5.3 土壤侵蚀年际变化	19
1.6 黄土高原的水土保持	21
1.6.1 梯田措施	21
1.6.2 林草措施	23
1.6.3 淤地坝措施	24
1.6.4 治沟骨干工程	25
1.7 黄土高原水土保持效益评估	26
1.7.1 淤地坝措施	27
1.7.2 梯田措施	28
1.7.3 林草措施	29
1.8 结论	30
参考文献	32
第2章 黄土高原侵蚀性降雨格局变化	36
2.1 降雨特征及其研究	36
2.1.1 雨量的时间变化特征	36
2.1.2 雨量的空间分布特征	38

2.1.3	黄土高原侵蚀性降雨与降雨侵蚀力	39
2.1.4	黄土高原极端强降雨变化	41
2.2	黄土高原降雨格局	43
2.2.1	雨量和降雨天数年际及年内特征	44
2.2.2	雨量和降雨天数趋势变化特征	47
2.2.3	雨量空间分布特征	48
2.2.4	雨量主要等值线年代变化特征	49
2.2.5	典型时段雨量和降雨天数空间变化	50
2.2.6	雨量和降雨天数趋势空间变化特征	51
2.3	黄土高原不同等级降雨空间分布	53
2.3.1	降雨指标的年内变化特征	53
2.3.2	降雨指标的年际及年代变化特征	54
2.3.3	特征降雨指标空间分布特征	55
2.3.4	特征降雨指标趋势分析	56
2.3.5	特征降雨指标趋势空间分布特征	57
2.4	基于黄河水沙时段变化特征的不同等级降雨变化	59
2.4.1	不同降雨指标典型时段年际和年内变化	60
2.4.2	降雨指标典型时段频率变化特征	62
2.4.3	典型时段降雨指标的差异	64
2.5	结论	67
	参考文献	69
第3章	黄河径流与气候和人类活动	72
3.1	黄河径流研究现状	72
3.1.1	气候变化对径流的影响	72
3.1.2	人类活动对径流的影响	74
3.1.3	黄河径流变化的研究	75
3.2	黄河中游径流量变化过程	76
3.2.1	黄河干流径流量变化	77
3.2.2	黄河中游干流径流量变化	79
3.2.3	黄河中游主要支流径流量变化过程	90
3.3	黄河中游径流对气候变化及水土保持的响应	98
3.3.1	气候要素变化分析	98
3.3.2	人类活动分析	105
3.3.3	降水与人类活动对黄河中游径流影响的评价	109
3.4	典型支流渭河流域径流变化及驱动因素	112
3.4.1	渭河流域概况	113
3.4.2	渭河流域径流量的时间变化特征	113
3.4.3	渭河流域径流变化的影响因素	119

3.5 典型支流黄甫川流域径流变化及驱动因素	127
3.5.1 黄甫川流域概况	127
3.5.2 黄甫川流域径流量变化特征	128
3.5.3 气候变化和人类活动对径流的影响评价	132
3.6 典型支流延河径流变化及驱动因素	138
3.6.1 延河流域概况	139
3.6.2 延河流域径流量变化特征	140
3.6.3 延河流域径流量变化的影响因素	141
参考文献	149
第4章 黄河输沙与气候和人类活动	152
4.1 黄河输沙之研究现状	152
4.1.1 黄河输沙量时空变化	153
4.1.2 黄河输沙变化的机制及其影响因素	154
4.1.3 河流径流-输沙协同关系研究	156
4.2 黄河输沙变化	157
4.2.1 黄河输沙沿程变化	158
4.2.2 黄河输沙量变化趋势	159
4.2.3 黄河输沙量与径流量相关性演变	163
4.3 黄河中游典型支流输沙变化	165
4.3.1 黄河中游支流输沙时间变化	165
4.3.2 黄河中游输沙空间变化	168
4.4 典型支流次洪径流输沙协同关系	174
4.4.1 流域径流-输沙关系	174
4.4.2 次洪过程径流-输沙滞回关系	178
4.5 黄河中游输沙变化驱动因素	183
4.5.1 气候变化	183
4.5.2 水土保持措施	186
4.5.3 降水和人类活动对输沙量变化的贡献	189
4.6 典型支流输沙量变化解析与方法对比	192
4.6.1 典型支流输沙量变化归因识别方法	193
4.6.2 黄甫川输沙量变化归因分析	195
4.7 结论	199
参考文献	200
第5章 黄土高原植被恢复的径流及泥沙效应	202
5.1 植被防治土壤侵蚀机理	203
5.1.1 植被对土壤的直接保护作用	203
5.1.2 植被对土壤侵蚀的间接影响	204
5.2 植被因子在土壤侵蚀研究中的表达	206

5.2.1	基于植被类型的土壤侵蚀研究	206
5.2.2	基于植被盖度的土壤侵蚀/径流泥沙研究	208
5.2.3	基于植被结构的土壤侵蚀/径流泥沙研究	209
5.2.4	侵蚀研究中植被参数的选择	211
5.3	植被结构变化与侵蚀产沙响应	211
5.3.1	结构化植被指数及其应用	211
5.3.2	生物多样性变化与产流产沙响应	214
5.4	产流产沙过程对植被恢复时间的响应	218
5.4.1	试验设计与方法	219
5.4.2	坡面产流时间的变化特征	220
5.4.3	径流率和产流强度的变化特征	220
5.4.4	累计径流量和累计产沙量与径流时间的关系	222
5.4.5	不同恢复方式下各恢复阶段的减流减沙效益分析	224
5.5	植被格局变化与流域水沙过程响应	224
5.5.1	黄土高原土壤侵蚀与植被格局	225
5.5.2	流域水沙时空变化特征分析	227
5.5.3	景观格局变化与径流泥沙的关系	231
5.6	结论	233
	参考文献	234
第6章	黄土高原小流域土壤侵蚀产沙评价	240
6.1	土壤侵蚀产沙评估研究	240
6.1.1	黄土高原土壤侵蚀监测与评价	240
6.1.2	土壤侵蚀泥沙来源研究	242
6.1.3	淤地坝的发展	244
6.1.4	基于淤地坝的土壤侵蚀评价	246
6.2	淤地坝沉积泥沙样品采集与分析	247
6.2.1	研究区概况	247
6.2.2	淤地坝选择与样品采集	249
6.2.3	样品处理与分析	252
6.2.4	泥沙来源示踪方法	253
6.3	坝控流域土壤侵蚀产沙强度	254
6.3.1	淤地坝库容曲线的确定	254
6.3.2	淤地坝不同类型层的容重确定	255
6.3.3	淤地坝运行期间淤积量计算	255
6.3.4	利用 ¹³⁷ Cs重建淤地坝的沉积序列	258
6.3.5	淤地坝淤积信息反演侵蚀产沙强度	260
6.4	坝控小流域侵蚀泥沙来源	261
6.4.1	淤地坝淤积信息分析	262

6.4.2	淤地坝泥沙来源指纹识别因子的筛选	266
6.4.3	源地泥沙贡献率的变化	272
6.4.4	复合指纹识别泥沙来源精度分析	274
6.5	结论	275
	参考文献	276
第7章	黄土高原淤地坝拦沙对输沙的影响	280
7.1	淤地坝泥沙淤积研究现状	281
7.1.1	淤地坝泥沙淤积量估算方法研究	281
7.1.2	淤地坝泥沙淤积特征研究	282
7.1.3	淤地坝减沙作用研究	283
7.2	淤地坝泥沙淤积量的估算方法	284
7.2.1	淤地坝泥沙淤积量的估算过程	285
7.2.2	典型淤地坝泥沙淤积量估算实例	293
7.3	典型坝控流域侵蚀产沙及驱动力	305
7.3.1	产沙模数反演与分析	306
7.3.2	次产沙模数变化特征	308
7.3.3	年产沙模数变化特征	312
7.3.4	小流域产沙模数变化特征	314
7.3.5	小流域产沙与降雨、下垫面条件的关系	317
7.4	典型支流淤地坝拦沙对河流输沙量变化的影响	325
7.4.1	淤地坝拦沙量估算与分析	326
7.4.2	典型支流输沙量变化特征	328
7.4.3	典型支流淤地坝的拦沙量	330
7.4.4	典型支流输沙变化对淤地坝拦沙的响应	332
7.4.5	淤地坝拦沙对支流输沙减少的贡献	333
7.4.6	淤地坝对支流泥沙输移的影响	335
7.5	结论	337
	参考文献	338

第1章 黄土高原的水土流失与水土保持

黄土高原是我国乃至世界上土壤侵蚀危害最严重的地区之一，严重的水土流失是造成黄土高原土地退化和黄河大量泥沙淤积的主要原因，也是黄河流域暴雨洪水灾害的重要根源。黄土高原水土流失问题关乎国计民生、生态安全、区域经济和“一带一路”倡议。该区域总面积约为 64 万 km^2 ，水土流失面积占比高达 73%，土壤侵蚀模数平均为 $2000\sim 2500 \text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ，水土流失严重区域的土壤侵蚀模数超过 $15000 \text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。为了扭转黄土高原水土流失日益恶化的局势，先后开展一系列重大生态治理工程，如退耕还林还草、大规模梯田建设、淤地坝工程等，黄土高原水土流失加剧态势开始逆转，粮食增产与生态效益凸显。定量评价土壤侵蚀量、土壤侵蚀强度及其空间分布特征，可以为水土流失防治措施的制定提供依据。

1.1 黄土高原地貌和土壤侵蚀

土壤侵蚀是在水力、风力、冻融、重力等自然营力和人类活动作用下，土壤及其母质或其他地面组成物质被破坏、剥蚀、搬运和沉积的过程（张洪江，2008）。根据侵蚀营力的不同，可以分为水力侵蚀、风力侵蚀和重力侵蚀等主要的侵蚀类型。水土流失往往是多种类型的土壤侵蚀共同作用的结果（张翼，2001）。

降雨和径流是造成水力侵蚀的主要因素，常见的水力侵蚀形式有雨滴击溅侵蚀、面蚀、沟蚀等。水力侵蚀是黄土高原中部及东南部水土流失发生的主要形式，占黄土高原总面积的 52.7%（刘国彬等，2008），分布面积最广，危害最大（图 1.1）。风力侵蚀是指风力作用于地面，引起地表土粒、沙粒飞扬、跳跃、滚动和堆积，并导致土壤中细粒损失的过程。风力侵蚀是黄土高原西北部水土流失的主要形式，分布于内蒙古、陕北和宁夏境内，包括长城以北鄂尔多斯高原，占黄土高原总面积的 14.1%（刘国彬等，2008）。风力侵蚀和水力侵蚀复合是造成黄土高原水土流失加剧的重要原因，地处生态环境脆弱地带，在时间上表现为风蚀、水蚀交替进行，空间上表现为风蚀、水蚀复合侵蚀，分布在晋西北、陕北、宁夏大部和内蒙古、青海及陇东部分地区。重力侵蚀是指土壤及其母质或基岩主要在重力作用下，发生位移和堆积的过程，主要包括崩塌、泻溜、滑坡和泥石流等形式。重力侵蚀与水力侵蚀的复合作用是黄土高原坡沟发育、沟壑纵横的主要驱动力。在黄土高原丘陵沟壑区，重力侵蚀占流域侵蚀产沙量的 20%~25%，在高原沟壑区占 58%左右（杨吉山等，2011）。

黄土地貌是黄土分布地区独特地形形态特征的总称。黄土高原主要的地貌形态有黄土塬、黄土梁、黄土峁等，还有众多的其他各种形态及其组合，如冲沟、陷穴、漏斗等。黄土地貌的形成内因是地壳的新构造运动，黄土高原北部的上升与南部的沉降运动是塑

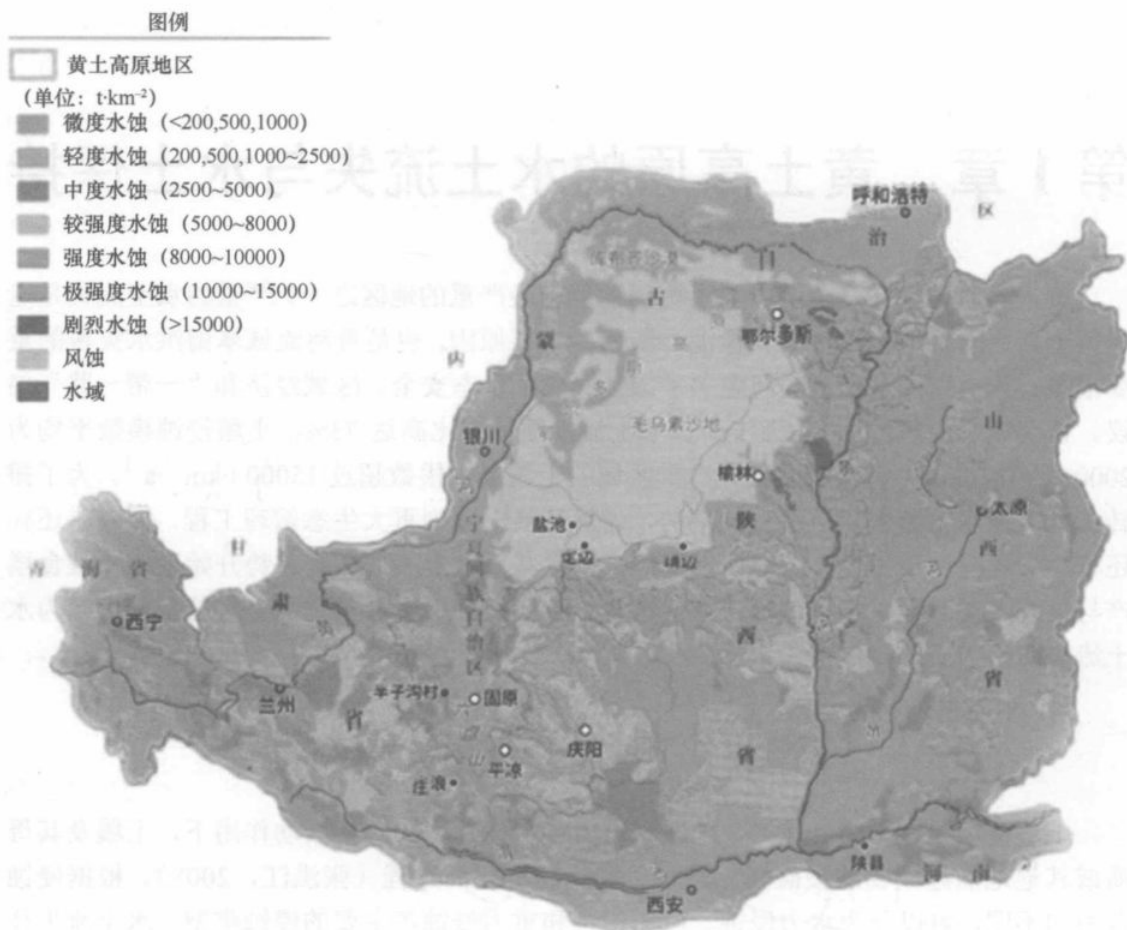


图 1.1 黄土高原土壤侵蚀强度图 (引自《中国国家地理》黄河·黄土特刊)

造黄土高原地貌格局的基本动力。而一大外因是分布发育于黄土高原的一些主要水系，如黄河及其主要支流，则对高原大的地貌格局和微地貌形态的形成、发展和演化有深刻影响。黄土地貌可分为沟谷地貌和沟间地貌两大类。

黄土沟谷地貌按形态特征，可分为细沟、浅沟、切沟、冲沟和河沟等几种（刘林等，2015）。细沟是由坡面表层径流集中形成的细流冲刷而成，在已开垦的地面最易形成。随着地面水流汇集成较大的股流，冲刷力增大细沟继续发育成浅沟。浅沟横剖面呈宽浅的V形，深只有几十厘米，多出现在梁峁坡上。流水进一步集中和侵蚀，浅沟则变为切沟。切沟切入黄土可达数米，长可达数十米，切沟纵剖面起伏较大，横剖面呈尖锐的V形，有明显的沟缘，流水下切非常活跃。切沟进一步发展成为冲沟。冲沟是黄土区沟谷中的重要类型，是流水强烈侵蚀和沟坡块体运动等作用的产物。冲沟纵剖面呈凹形，上陡下缓，起伏不平，横剖面呈V形，向下游逐渐扩宽，有明显的沟缘。若冲沟的沟底已停止加深，沟坡受旁蚀、滑坡与坡面流水等作用也逐渐变得平缓稳定时，沟谷就发育成为浅U形的坳沟。

黄土沟间地貌是塬、梁、峁（图 1.2）。这些地貌类型分布在冲沟、河沟等大沟谷之间，并由大沟谷分割而成。塬是黄土覆盖的范围较广的平坦高地。塬的边缘由于受沟谷

溯源侵蚀而变得支离破碎。塬受到沟谷长期切割，面积逐渐缩小，也可变得比较破碎，成为破碎塬。塬是黄土覆盖在大片平整古地形上形成的。梁是长条形的黄土丘陵。我国黄土地区当地所指的梁，其梁顶较窄，呈明显的穹形。另一种是顶部较平的平顶梁。梁的形成多与条状古地形有关。峁是沟谷分割的穹状或馒头状黄土丘陵。我国黄土地区群众所指的峁，峁顶面积不大，呈明显的穹起，整个外形很像馒头。另一种是连续的黄土平顶峁，峁顶之间有一个分水鞍地。峁的形成多与古地形有关。黄土峁顶面积不大，以 $3^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 向四周倾斜，并逐渐过渡为坡度 $15^{\circ}\sim 35^{\circ}$ 的峁坡。

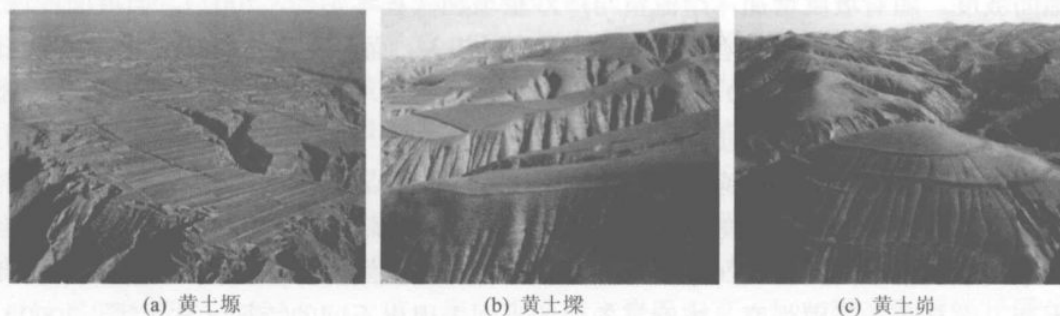


图 1.2 黄土沟间地貌

黄土潜蚀地貌是由地面径流沿着黄土中的裂隙和孔隙下渗进行潜蚀，破坏了黄土的原有结构或使土粒流失、产生洞穴，最后引起地面崩塌所形成，包括黄土碟、黄土陷穴、黄土柱。黄土碟为湿陷性黄土区碟形洼地。黄土陷穴为黄土区漏陷溶洞，由流水沿黄土层节理裂隙进行潜蚀作用而成，多分布在地表水容易汇集的沟间地边缘和谷坡；两个或几个陷穴由地下信道不断扩大，使信道上方的土体不断塌落，未崩塌的残留土体形如桥梁，称为黄土桥。黄土柱为黄土沟边的柱状残留土体，由流水不断沿黄土垂直节理进行侵蚀和潜蚀以及黄土的崩塌作用形成，有圆柱状、尖塔形，高度一般为几米到十几米。

1.2 黄土高原土壤侵蚀影响因素

土壤侵蚀过程主要受气候、地质地貌、土壤、植被、人类活动等因素的影响，为了正确认识和理解土壤侵蚀的影响因子，满足区域土壤侵蚀研究的需求，许多学者对影响区域土壤侵蚀的基本因子进行了比较系统的研究。黄土高原土壤侵蚀的影响因素主要为自然因素与人为因素，自然因素主要包括气候因素、地貌因素、土壤与地面组成物质以及植被因素；人为因素包括过度开垦加速土壤侵蚀、城市与工矿建设引发侵蚀问题以及人地系统失调引发的人为加速侵蚀。

在黄土高原，气候特别是降雨为影响土壤侵蚀的主要外营力，雨量、雨强及时空分布与土壤流失有直接关系，气候变暖通过影响植被生长和土壤含水量间接影响水文过程。研究表明：雨量变化 1%，会改变 2% 的土壤侵蚀以及 1.3% 的径流量；雨量每增加 1%，径流量增加 2.5%，产沙量增加 2.4% (Ma et al., 2016)。当降雨强度变大时产流时间变短，产流量和产沙量与雨强呈正比 (Huang et al., 2013; Zhao et al., 2013)。王占礼等 (2005) 通过对黄土高原裸坡降雨产流的研究，认为雨强对坡面径流深的影响高于

其他因子。此外,极端气候事件的发生加重了区域水土流失强度,黄河流域极端低温和极端高温天数分别呈减少和增加趋势,年极端强降雨总量的变化趋势存在着明显的区域差异,河源区增加最显著,而中游的黄土高原中、东部减少最显著(陈效速等,2011),尽管部分区域极端强降雨事件呈减少趋势,仍然可能引起黄河未来较大来沙量。

地形地貌对侵蚀影响的强弱,主要是通过坡度、坡长、沟壑密度、倾斜侵蚀面等对侵蚀产生作用。其中,坡度与坡长对侵蚀影响较大。坡度直接影响径流的冲刷能力,地表径流产生的能量是径流质量和流速的函数,而径流量的大小和流速主要取决于径流深与地面坡度。随着坡度增加,产流量与产沙量增加(程琴娟等,2007),但坡面侵蚀量并不随着坡度的增大而持续增加,两者并非绝对相关,而是存在一个侵蚀量发生变化的临界坡度(和继军等,2012)。该临界坡度仍未有定论,值得关注与研究。坡长和径流关系十分复杂,学者们对此进行了较为深入的研究。第一种观点认为,随着坡长的增加径流系数在逐渐减少,坡长越长径流量越小;第二种观点认为,在陡坡条件下,随着坡长的增加径流量没有明显的变化;第三种观点认为,径流与坡长的关系并不是简单的线性关系(于文华和闫训海,2012)。随着坡长增加,侵蚀量并不是简单地增加、减少或者不变,而是随着降雨强度、坡度等条件的不同表现出不同的特征(林军等,2009)。总之,地形因素对侵蚀的影响是复杂的,对侵蚀的作用机理还需要进行深入探索。

植被对土壤侵蚀的影响主要表现在地上植株对降雨的截留作用、枯枝落叶层对径流流速和地表径流的削弱作用,以及植物根系对土壤结构稳定性和土壤抗蚀、抗冲性增强作用。黄土高原植被冠层截留率达4.92%,截留雨量为22.68mm(宋文龙等,2014)。植被冠层还能削弱雨滴动能,防止土壤溅蚀。冠层下的枯枝落叶层将透过林冠层或冠草层的雨滴动能削弱,形成土壤天然保护层。此外,地表形成的生物结皮能够增强土壤的稳定性(Patrick,2002),缓解雨滴对土壤的剥蚀作用。随着植被自然恢复,土壤结构得到显著改善,土壤入渗能力增加,土壤抗蚀性随之增强(Gasch et al.,2014)。植被覆盖程度大小,可以不同程度地减弱、改变或阻碍地表径流,从而起到保护土壤,少受或免受径流冲刷作用。放水冲刷试验证明,随草被覆盖增大,坡面流的延滞作用愈来愈显著(李勉等,2007);人工模拟降雨试验证明,径流含沙量随草被覆盖度的增大而减小(王栋栋等,2017)。覆盖度增加,径流泥沙量减少已成为广大学者的公认,但植被对坡面产流过程的作用机理及临界覆盖度仍未有定论。

土壤及其母质或其他地面组成物质是侵蚀的主体,是决定侵蚀过程和侵蚀强度的内在因素。土壤物理特性直接影响着水力和风力的侵蚀程度。土壤可蚀性成为评价土壤侵蚀能力的重要指标。土壤可蚀性指标评价主要包含土壤机械组成、土壤有机质含量及水稳性团粒结构含量等。研究表明,土壤可蚀性值与土壤团聚体含量、颗粒状况、结构系数、持水能力、透水性能以及全氮含量等具有明显的负相关关系。提高土壤有机碳含量,可以起到改良土壤团聚体结构和状况,能够改善土壤持水和透水性能,削弱土壤侵蚀作用。此外,土壤可蚀性大小不仅取决于土壤自身的属性,还受气候因素、地形条件、植被状况以及人为活动等多重因素的影响(王媛等,2014;邱陆旸等,2016)。气候条件如湿度和温度通过影响岩石风化、成土过程和植被生长等影响土壤性质,进而间接地影响着土壤可蚀性的变化。植被恢复能提高土壤有机质含量和水稳性团聚体含量,改善土

壤结构,降低土壤容重,从而改变土壤入渗性能,提高土壤蓄水、保水能力,使土壤崩解速率降低,土壤可蚀性减小(宋阳等,2006;魏慧等,2017)。

人类活动对自然植被的破坏是影响土壤侵蚀最主要的人为因素,从狩猎、游牧、刀耕火种到大规模开垦,均以破坏自然植被为代价,导致自然生态平衡失调,自然侵蚀转化为人为加速侵蚀。据统计,全世界因土壤侵蚀每年从耕地流失的土壤约250亿t。中国有将近五千年的耕垦历史,由于人口增长迅速、滥垦等导致生态环境严重破坏,土壤侵蚀急剧发展。近年来,城镇、工矿建设飞速发展,未及时采取相应的环境保护措施,从而引发新的水土流失问题。黄土高原土壤侵蚀的人为因素主要包括以下几方面:①人地系统失调引发的人为加速侵蚀;黄土高原据历史考证大部分地区应是森林、森林草原及灌木草原的植被景观,当今黄土高原严重的水土流失是由于植被遭到人为破坏和不合理开垦引起的。②过度开垦尤其陡坡开垦加速土壤侵蚀;黄土高原地区坡耕地占耕地总面积的50%以上,而在丘陵沟壑区占70%~90%,其中大于25°的坡耕地占比高达20%。③城市、工矿建设引发的侵蚀问题;黄土高原城市建设迅速,造成的侵蚀也十分惊人,如延安市因人类活动增加固体松散物1072.57万m³,这些堆积物一旦形成人为堆积地貌,其侵蚀强度比荒坡地高10~12倍;黄土高原矿产资源丰富,这些矿产资源的开采对发展国民经济建设和改变水土流失区面貌有重大的影响和作用,但由于在开采过程中忽视环境保护和水土保持,引发了新的土壤侵蚀和环境问题。

1.3 黄土高原土壤侵蚀分区

黄土高原具有明显的地域特征和地带分异规律。从东南向西北,气候依次为暖温带半湿润气候、半干旱气候和干旱气候。植被依次出现森林草原、草原和风沙草原。土壤依次为褐土、垆土、黄绵土和灰钙土。黄土中粗粉砂含量由西北向东南递减,黏土的含量却从西北向东南递增。按地形差别由西北向东南可分为陇中高原、陕北高原、山西高原和豫西山地区等区。受自然条件地带性影响,人类生产活动亦呈由南向北由耕作种植向放牧的趋势,依次分别为毁林开荒、陡坡耕种、过度放牧。这些因素致使不同区域土壤侵蚀类型、程度、强度、方式各不相同,影响因素亦不相同,采取的综合治理措施也均不相同(舒若杰等,2006;张青峰和吴发启,2009)。为了使黄土高原生态环境恶化得到遏制,农业生产结构得到合理调整,有效治理土壤侵蚀和水土流失,因地制宜拟定水土保持综合防治措施,需要有针对性地进行侵蚀分区和提出分区防治对策。黄土高原土壤侵蚀分区主要反映不同区域土壤侵蚀特征及其差异性,同一类型区的自然条件、土壤侵蚀类型和防治措施基本相同,而不同类型区之间则有较大差别(唐克丽,2004;张洪江,2008)。

我国的土壤侵蚀分区工作实际上是从黄土高原开始的。自20世纪50年代初,对黄土高原的水土流失组织了3次大规模勘察,对于黄土高原的土壤侵蚀类型和分区进行了许多开创性的研究。1953年黄秉维(1955)首次编制成1:400万黄河中游土壤侵蚀分区图,按3级系统划分为类、区和副区,奠定了侵蚀分区研究的基础。朱显谟(1958)在研究黄河中游土壤侵蚀区划问题时提出划分5级区分制,即地带、区带、复区、区和

分区, 侵蚀地带以主要侵蚀类型为划分标准并和气候结合。罗来兴和朱震达(1965)主编了黄土高原水土流失和水土保持图, 从水土保持的角度指出哪些地区急需治理, 哪些地区不急需治理; 在急需治理的地区中, 哪些类型地区可以沟谷治理为主、坡面治理为辅, 哪些类型地区必须沟谷治理与坡面治理并重。1990年唐克丽、陈永宗主编的《黄土高原地区土壤侵蚀区域特征及其治理途径》(中国科学院黄土高原综合科学考察队, 1991), 依据土壤侵蚀营力、类型、强度发展趋势以及治理途径在一定区域内的相似性和区域间的差异性来划分土壤侵蚀分区, 采用两级分区, 即土壤侵蚀地区和土壤侵蚀区。

1.3.1 黄秉维的土壤侵蚀分区

黄秉维、朱显谟、罗来兴、黄义端等学者对黄土高原土壤侵蚀分区进行了研究并提出了不同分区方案, 其中影响较大的是黄秉维先生的分区方案(表 1.1), 他们依据土壤侵蚀营力、类型、发展趋势以及治理途径在一定区域内的相似性(或一致性)和区域间的差异性, 将黄土高原地区分为 3 个一级区, 25 个二级区和 10 个亚区。按侵蚀类型的组合不同, 再分为第三级区(亚区)。

I. 鄂尔多斯高原风蚀区

本地区属于长城沿线以北的鄂尔多斯高原, 东以和林格尔、东胜、榆林一线为界, 西至贺兰山, 北达阴山山脉。区内气候干旱, 蒸发强烈, 春季多风沙天气, 伴随有沙尘暴天气出现。区域内植被以干旱草原和荒漠草原为主, 沙生植物和耐旱植物广布, 但植株低矮, 覆盖度低。同时超载放牧现象严重, 草原退化, 风蚀和土地沙化扩展。景观以沙漠景观为主, 主要地貌类型有沙丘沙地、湖盆滩地、冲积洪积平原和土石丘陵山地。土壤腐殖质层浅薄, 有机质含量低, 沙性大, 易受风蚀。这一地区由于地面平缓, 雨量稀少, 水蚀轻微, 水蚀模数多为 $500 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 个别大于 $1500 \sim 3000 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

根据风蚀强度和特点本区可划分为 6 个二级侵蚀区。

I_1 、 I_2 、 I_3 属于微度至中度风蚀区, 地处贺兰山、河套平原、阴山一带。 I_1 、 I_2 由于植被覆盖好, 加之 I_2 区为灌溉农业区, 土壤具有良好的结构性, 作物对地面覆盖良好, 风蚀不强烈; I_3 区的干旱荒漠草原灌丛对地面覆盖较差, 地表土层浅薄, 风蚀不显著。

I_4 、 I_6 两个区地处腾格里沙漠、库布奇沙漠和毛乌素沙地的边缘地带, 受沙漠景观影响严重。区内土壤砂粒含量高, 气候干旱, 荒漠植被广布但覆盖差, 加之沙漠扩张, 土地沙化严重, 风蚀强烈。

I_5 区风蚀强烈的主要因素是由于超载放牧严重, 加之无节制开垦荒地, 草场退化, 沙漠扩张。

II. 黄土高原北部风蚀水蚀区

本区大致位于神池、灵武、兴县、绥德、庆阳、固原、定西、东乡一线以北, 长城沿线以南的地区, 主要为黄土梁峁丘陵沟壑地貌类型。坡陡沟深, 地形破碎, 长城沿线附近有片沙覆盖。本区属半干旱草原地带, 植被稀疏覆盖度低, 草地面积不少但不成片, 多与农田镶嵌分布, 加之撂荒轮垦, 草地多被破坏面积缩小。目前植被覆盖度较低, 草