

黄河流域的侵蚀与径流泥沙变化

石元康(主编) 魏贵祖 梁海山
景可 张亚莉 陈永贵 李世清

中国环境出版社

《黄河流域环境演变与水沙运行规律》

序 言

黄河是哺育中华民族灿烂文明的大河，也是一条灾害频繁治理艰难的多沙河流。黄河流域生态环境十分脆弱，中游的水土流失和风沙的危害，下游河床泥沙堆积和洪水的肆虐，都是中华民族的忧患，也是我国四化建设的“心腹之患”，它严重地威胁着流域境内经济建设的发展。然而，黄河流域土地资源、矿产资源和能源都十分丰富，是我国发展农林牧业、能源和重化工业的基地，在社会主义现代化建设中，占有重要的战略地位。

为了驯服黄河，除害兴利，新中国成立后，中国共产党和人民政府十分重视黄河的治理，治黄工作从此进入新的纪元。40多年来，对黄河的水利开发、河道整治以及水土保持做了卓有成效的工作，治黄取得了巨大成绩，安渡了数十年的伏秋大汛，保证了沿黄各省经济建设的顺利进行，工农业产值持续增长。可是，黄河流域的环境并没有得到根本改善，中游水土流失仍在继续，黄河决口改道的威胁依然存在。

近几十年来，学术界和工程技术界为治黄做了大量的研究工作，也取得了许多丰硕的成果。但黄河问题涉及很多的自然环境因素和社会经济发展因素，而且这些因素既相互联系、又相互制约，并随着人类活动加剧，而不断地发生变化。黄河及其流域环境的治理开发，还有许多关键性、综合性、基础性和系统性的科学问题有待深入进行研究。基于以上考虑，1986年中国科学院、国家计划委员会地理研究所，在中国科学院资源环境局委托支持下，把黄河治理开发作为重大基础科学研究项目，列入国家“七五”科技攻关计划。提出了《黄河流域环境演变与水沙运行规律》的研究课题，作为国家自然科学基金重大基础研究项目，并于1988年得到国家自然科学基金委员会的批准和资助，为本次多学科、多部门、联合攻关，深入开展研究工作创造了条件，也为黄河基础科学研究开创了新的局面。

本项目研究的主要宗旨为：“综合研究历史时期黄河流域环境变迁与水沙变化事实，流域侵蚀产沙规律及水利水保效益，黄河下游水沙变化与河床演变规律，提出黄河流域环境演变与水沙变化趋势及整治方向，为2000年以后国家治理黄河决策提供科学依据和基础资料。”重点回答：“减少入黄泥沙前景；干流水库和小浪底水库联合运用可行方案；探讨延长黄河下游河道寿命的途径，以及流域综合治理与开发方向”等目标。

根据上述项目研究宗旨和研究目标的要求，设置了下列四个层次方面和研究课题，其中，（1）历史时期流域环境变迁与水沙变化关系：宏观地再现秦汉以来环境变迁与水沙变化的事实，为深入分析现代黄土高原水土流失和下游河道堆积，洪泛状况、原因、强度提供历史背景值。（2）流域侵蚀产沙规律及水利水保减沙效益分析。（3）黄河下游水

沙变化与河床演变规律；这两个课题主要重点是分析中游侵蚀产沙和下游水沙变化的现状、原因、规律、发展趋势及其治理对策。（4）流域社会经济活动和自然环境演变趋势及治理方向：着重分析现代大型水利枢纽、人类活动和社会经济活动可能引起水沙及环境变化的趋势，提出方向性的综合治理开发意见。

4年多来，全体科技人员共同努力，基本上达到了“弄清事实，分析规律，预测趋势和提出治理方向”的预期目标，为今后黄河流域治理开发决策提供了新的科学依据和系列资料。

本项目研究工作，是由中国科学院、国家计划委员会地理研究所和水利部黄河水利委员会共同主持，参加单位有中国科学院水利部西北水土保持研究所、黄委会水利科学研究院、中国科学院海洋研究所、中国科学院山地灾害研究所、水利水电科学研究院泥沙研究所、黄委会宣传出版中心、黄委会水资源保护研究所、黄委会勘测规划设计院、黄委会水文局、清华大学水利水电系泥沙研究室、北京师范大学地理系、北京大学城市与环境系、陕西师范大学地理系、华北水利水电学院、社会科学院历史研究所、陕西省气象科学研究所和河南省气象科学研究所等19个单位。参加研究工作的科技工作者计有140多人。工作期间在国家自然科学基金委员会指导下，得到了中国科学院、黄河水利委员会以及沿黄地区各有关部门领导的大力支持和帮助。因此，本项目这次所取得的系列研究成果，是各方面大力协作和支持的结果，也是全体科技人员智慧的结晶，为献身治黄事业作出了积极努力。在项目完成之际，原项目负责人、著名地理学家左大康先生因病逝世。在他主持项目工作期间，不仅科学研究上治学严谨，细心安排各项工作，而且为了深入了解黄河的环境问题和水沙运行的规律，抱病亲临第一线调查。他的奉献精神和对地理学的贡献，将永远铭记在我们的心中。

项目学术领导小组

1992年12月

前 言

“黄河流域的侵蚀与径流泥沙变化”是承担国家自然科学基金重大项目课题的综合研究成果。重大项目的名称为“黄河流域环境演变与水沙运行规律”。课题名称为“流域侵蚀产沙规律与水利水保减沙效益分析”。

黄土高原侵蚀是黄河泥沙的来源。黄河的泥沙问题以往已有大量研究，其中有关流域环境演变对侵蚀产沙的影响，特别是人类活动对其影响的正反两方面作用，虽已引起重视，但仍为研究的薄弱环节。近年来已发表的有关论文，出现了较大的争议。例如自然侵蚀和人类加速侵蚀的评价问题；人类控制土壤侵蚀的可能程度及水土保持减少入黄泥沙效益问题；土壤侵蚀发展趋势及水保减沙效益预估等问题。这些问题都关系到黄土高原的治理和建设方针、治黄决策、区域环境保护和社会发展等一系列重大战略部署。本课题研究的主要目标就是为这些战略决策提供科学依据。在总结前人已有的工作基础上，我们在研究思路和研究方法上又有了一些新的开拓。明确以研究环境演变为中心，突出人类活动对侵蚀产沙的影响，在总项目主持下，组织多部门、多学科的综合基础性研究。学科领域包括自然地理、侵蚀地貌、气候、水文、土壤、土壤侵蚀、水利和水土保持等。共分五大部份：

- (1) 暴雨、径流、侵蚀三者关系及泥沙时空分布规律；
- (2) 粗泥沙来源及泥沙输移规律和典型小流域水土流失预报；
- (3) 自然侵蚀和人类加速侵蚀评价及人为破坏活动对增加入黄泥沙的影响；
- (4) 黄河中游大型煤田开发对侵蚀和产沙影响的研究；
- (5) 水利水保措施现状的减沙效益分析及趋势预估。

在进行研究时，采取了野外与室内、宏观与微观、定性定量相结合的技术路线。以黄河中游多沙粗沙区为重点研究地区，进行了野外考察结合航片、卫片的解译；在子午岭林区布设了林地与开垦地的径流场，进行定位观测试验；开展了室内和野外人工降雨试验；汇集历年有关资料，建立数据库，进行计算机处理分析；进行了大型煤田开发对侵蚀产沙影响的观测试验；进行了坝库工程拦泥效益的专题调查；在实验室进行了水、土样品的分析。通过以上工作使一些问题的研究在深度和广度上均有了新的开拓和提高；对有些争议较大的问题，提出了比较明确的回答，或提供了新的论证资料。

参加课题的主要研究单位有：中国科学院、水利部西北水土保持研究所，中国科学院、国家计委地理研究所，黄河水利委员会黄河水资源保护研究所，黄河水利委员会水利科学研究院等。

参加课题的研究技术人员共计五十多人：

第(1)部份：中国科学院、国家计委地理研究所：梁季阳、童鼎钊、姚承伟、程义、王广德、过常令、刘彩堂、李林、蔡强国、陈浩、沈建柱、沙万英；黄河水利委员会水

文局：唐君璧、冯相明。

第(2)部份：中国科学院、国家计委地理研究所：陈永宗、景可、蔡强国、朱同新、李凤新、陈浩、张勋冒、吴淑安；黄河水利委员会黄河水资源保护研究所：李世明、支俊峰、邱宝冲、杨汉顺；中国科学院、水利部成都山地灾害研究所：张信宝、谭万沛。

第(3)部份：中国科学院、水利部西北水土保持研究所：唐克丽、王斌科、郑粉莉、张科利、查轩、刘元保、白红英、王文龙、焦菊英、陈文亮、张平仓、史瑞云、蒋集华、蔡庆、周佩华、王占礼。

第(4)部份：黄河水利委员会水利科学研究院：张胜利、时明立、方学敏、高懿堂、左仲国、何晓茹。

第(5)部份：黄河水利委员会黄河水资源保护研究所：熊贵枢、李世明、徐建华、董雪娜、刘九玉、林银萍、王玲、顾弼生。

参加本论著编写的执笔人员主要有唐克丽、熊贵枢、梁季阳、景可、张胜利、陈永宗、李世明；还有王斌科、郑粉莉、徐建华、董雪娜等。全书由唐克丽、熊贵枢、陈永宗、李世明统稿、定稿。黄土高原环境演变对侵蚀产沙的影响是一项长期而艰巨的研究课题，不仅关系到黄土高原和黄河的治理，而且关系到我国全社会的发展、是“全球环境变化”组成部份。本书就此领域虽取得了一定的研究进展，尚有待继续深入和发展，有些问题的研究和分析也不够完善，敬请读者批评指正。

目 录

前言

第一章 绪论	1
第一节 侵蚀环境	1
一、自然环境	1
二、人文环境	9
第二节 侵蚀特征	12
一、侵蚀强度大	12
二、侵蚀类型复杂	13
三、发生强烈侵蚀的时间集中	15
四、发生强烈侵蚀的地区集中	17
五、现代侵蚀是古代侵蚀的延续和发展	19
第二章 黄土高原地区的暴雨径流与河道输沙	23
第一节 黄土高原的暴雨特征	23
一、暴雨与天气背景	23
二、典型流域暴雨时空分布特征	23
三、黄河中下游暴雨特征分析	25
第二节 暴雨、产流数学模型	29
一、径流泥沙特征	29
二、大理河产流计算模型	29
三、皇甫川暴雨径流模拟	34
第三节 小流域输沙率计算	41
一、相关分析法	41
二、线性离散系统输沙模型	42
三、计算实例	43
四、模拟结果分析	44
第四节 降雨、径流、输沙量的相互关系	45
一、模拟优选方法的步骤	46
二、年降雨量与年径流量的关系	47
三、年径流量与年输沙量的关系	50
结语	53

第三章 黄河中游侵蚀产沙、粗泥沙来源及泥沙输移	55
第一节 侵蚀产沙类型、强度及产沙模型	55
一、侵蚀产沙类型与方式	55
二、侵蚀产沙量的测算	58
三、典型小流域侵蚀产沙模型	63
第二节 粗泥沙的来源及分布	67
一、粗泥沙概念和产沙地层	67
二、粗泥沙来源及分布	71
三、基岩产沙量估算	76
第三节 泥沙输移规律	79
一、泥沙输移比概念	79
二、影响泥沙输移比的环境因素	80
三、泥沙输移比的判断标志	82
四、泥沙输移比的区域分异	84
结语	89
第四章 黄土高原土壤侵蚀与生态环境演变	91
第一节 自然侵蚀和人类加速侵蚀的演变	91
一、自然侵蚀的发生发展与生态环境演变	91
二、近万年来的气候变化及自然侵蚀和人类加速侵蚀的演变	97
三、人类加速侵蚀的发生发展和生态环境演变	99
第二节 子午岭林区自然侵蚀和人类加速侵蚀剖析	102
一、子午岭林区植被恢复前后土壤侵蚀的演变特征	102
二、人为破坏植被加速侵蚀的定位观测研究	108
三、林、草地与开垦地土壤侵蚀过程人工降雨试验研究	114
四、生态环境演变和土壤侵蚀机理	117
第三节 现代人类开荒对加速侵蚀的影响	121
一、研究区概况及研究方法	122
二、开荒的时、空特点	122
三、开荒的综合分区及区域特征	127
四、开荒与侵蚀的关系及整治对策	132
第四节 典型区人类耕垦加速侵蚀的定量评价	136
一、径流小区观测资料分析评价	136
二、典型小流域观测资料分析评价	141
三、黄河泥沙主要来源区植被覆盖率与侵蚀产沙关系	144
结语	146
第五章 黄河中游大型煤田开发对侵蚀和产沙影响的研究	149
第一节 煤田开发概况及自然特点	152

一、煤田概况	152
二、矿区自然环境特点	153
第二节 煤田开发对侵蚀和产沙的影响	153
一、对侵蚀的影响	153
二、对产沙的影响	162
第三节 煤田开发对水沙变化趋势的影响预测	169
一、煤田开发现状对水沙变化影响分析	169
二、煤田开发对水沙变化趋势的影响预测	174
结语	177
第六章 黄河流域的水利水土保持与水沙环境变化	179
第一节 多沙粗沙区农村经济概况	179
一、人口和土地利用	179
二、粮食生产和农民收入	182
第二节 多沙地区的暴雨、径流、泥沙特征	186
一、暴雨特征	186
二、径流特性	187
三、泥沙特征	191
四、侵蚀产沙特征	192
第三节 水利水土保持和水沙变化	195
一、水利和水土保持治理现状	195
二、水土保持工程拦沙机理	200
三、水沙变化与水利水土保持	215
第四节 水利水保措施减沙现状和趋势预估	220
一、水利水保减沙现状	220
二、水利水保措施减沙趋势预估	226
结语	230
第七章 黄土高原土壤侵蚀与环境治理对策	232
第一节 土壤侵蚀与环境治理的关系	232
一、土壤侵蚀与全球变化	232
二、黄土高原的人口、耕地变化与土壤侵蚀的发展演变	236
三、植被恢复和重建的可能性与环境治理	239
第二节 黄土高原的治理与开发	240
一、水土保持与发展农林牧副相结合	240
二、资源开发与环境治理	244

第一章 绪论

第一节 侵蚀环境

土壤侵蚀与环境的关系是紧密联系互为因果的。环境状况制约着土壤侵蚀的特点及其发生发展过程。譬如干旱区的自然侵蚀和人为加速侵蚀都与湿润区显著不同,这是环境差异的结果;人口稠密、开发历史悠久地区与那些自然条件与之相似而人口稀少的初垦区或处女地的侵蚀各不一样,也是侵蚀环境不同所致。相反,土壤侵蚀特点常常决定该地区的环境质量。土壤侵蚀强烈是黄土高原生态环境恶化的起因,黄河下游河流环境多灾,也与此息息相关。所以研究土壤侵蚀发生发展规律及治理途径,必须首先分析所在区的环境特点。

影响土壤侵蚀的环境包括自然环境和人文环境两个方面,它们的特点和对侵蚀的作用分述于下。

一、自然环境

(一) 气候

黄土高原属季风气候区。它的气候特点受环流形势控制,又受地形因子影响,冬季为西伯利亚——蒙古冷高压控制,常有干冷空气过境南流或者停驻,气候干冷;夏季冷高压势力减弱,东南湿热气流加强,受东南季风作用,气候温暖而多雨。但是,由于它东距海洋 500—800km,南面有海拔 2000—3000m 呈东西走向的秦岭山地和呈南北走向的太行山地,对暖气流形成屏障,进入高原内部后,又受南北向的吕梁山和六盘山的阻挡,加上高原的东西跨度很大(跨经度 14 度),西部偏居内陆,为东南季风的尾闾所在,所以西部少雨,大陆性强,东南部雨量较多,气候暖湿。在南北方向上,高原跨了纬度 7 度,太阳辐射量南北差异大,气温的差异也因此明显。

黄土高原的年平均气温 3.6—14.3℃,由南向北和由东向西逐渐降低。山西境内的五台山,耸立于黄土丘陵山地之上,虽距海较近,因地势较高(海拔 2500mm 以上),年平均气温为全区最低(-4.2℃);六盘山的纬度虽较低,也因地势高而成低温区。渭河下游平原和晋东南盆地均为全区气温最高的地区,年均温 10—13.3℃。全区最冷月(一月)的平均气温都在 0℃ 以下,五台山最低,达 -19℃;七月平均温度大都在 22℃ 以上,东南部汾渭平原最高,达到 25℃ 以上。由于冬季气温较低,各地普遍形成季节性冻土,冻结深度因地而异,晋北地区达 150cm 以上,湟水谷地约 120—140cm,陕北长城沿线和晋西北为 100—120cm,其余大部分地区在 40—80cm,渭河下游谷地只有 20cm 左右。

黄土高原的年降水量变化于 200—700mm，具有由东南向西北和由南向北递减的特点。渭河下游谷地为全区降水量最多地区（宝鸡 701mm，西安 604.2mm），同心、靖远、景泰等地最少，仅 200—300mm。全区以五台山降水最多（963.0mm），最少为景泰（199.5mm）。降水的区域分布特点如图 1-1。由图可知，晋西、陕北、陇东、陇中、宁南等土壤侵蚀活跃地区，降雨量多在 450—550mm 之间。黄土高原降水的季节变化很大，各地冬季降水量仅占年总量的 1% 左右，春季占 13—23%，夏季占 50—60%，秋季占 25—30%。大部分地区 5—9 月的降水量占年总量的 70% 以上，其中又以 7、8 月份降雨量最多，可占年总量一半左右。降水时间集中的特点，使区内年径流量的时间分配不均，河川径流的丰枯季节十分鲜明，并使水力土壤侵蚀发生的时间集中，河流输沙量的年内变化与之相应。本区冬季降雪量普遍不大，大部分地区的积雪深度在 10—20cm 之间（石质山地超过此值），因而春季融雪径流侵蚀几乎可以忽视。

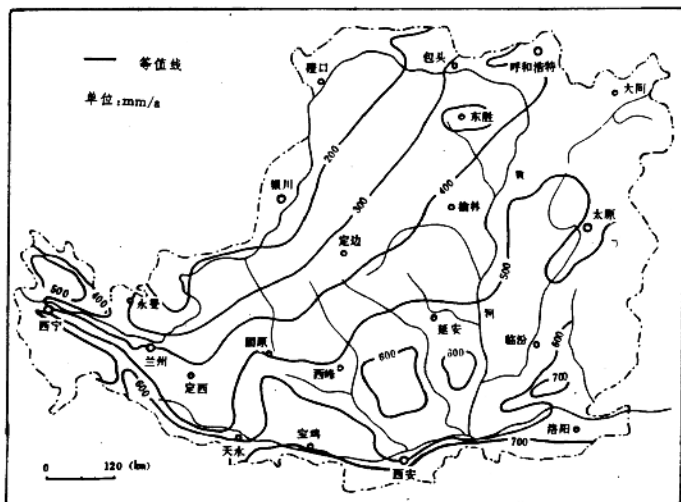


图 1-1 黄土高原多年平均降水量等值线图

降雨特征中以降雨强度与侵蚀的关系最密切。野外观测表明，当降雨强度小于 0.3mm/min 时，雨滴溅蚀作用十分微弱，在地表土壤有结皮生成情况下，此种雨强的持续时间如果达到 10 分钟以上，在 20 度的坡耕地上则会产生径流冲刷。所以，对土壤侵

蚀而言,分析暴雨特点十分重要。按照张汉雄拟定的黄土高原暴雨标准^[1]统计区内13个观测站多年资料,求出各地暴雨发生频率,列于表1-1。由表可知,大部分地区的年平均暴雨次数只有2-4次,最多年也只有12次,这和我南方相比,是比较少的;暴雨历时普遍较短,小于或等于60分钟暴雨多数地区占50%以上,大于或等于180分钟占70%以上。暴雨多发生在6-8月,空间分布有由东南向西北递减特点。这些特点对土壤侵蚀特征的时空变化产生了深刻影响。

表 1-1 黄土高原暴雨频数

测站	资料年代	暴雨总次数	其 中		年平均次数	最多年次数	无暴雨年次数	各历时占%	
			6-8月	占%				≤60分钟	≤180分钟
西宁	28	37	35	95.0	1.32	3	1	70.3	86.5
兰州	28	37	31	83.8	1.32	5	8	64.9	78.4
临洮	25	70	59	84.3	2.80	6	6	57.3	66.7
固原	24	57	52	91.2	2.38	10	3	50.9	71.9
西峰镇	24	96	87	90.6	4.00	9	0	49.0	72.3
天水	26	65	58	89.2	2.50	6	1	66.2	87.7
榆林	26	94	82	93.2	3.62	9	0	44.0	78.9
延安	25	132	112	84.8	5.48	11	0	50.0	74.6
西安	28	102	84	82.3	3.64	8	2	41.5	70.8
大同	24	91	82	90.1	3.79	7	2	60.4	82.4
兴县	24	115	98	85.2	4.79	12	0	58.4	71.3
介休	26	125	105	84.0	4.81	11	1	51.6	70.3
长治	25	160	140	83.8	6.40	12	0	48.8	66.8

气候因素中风与土壤侵蚀的关系十分密切。黄土高原大部分地区的年平均风速约1.1—2.0m/s,春季大于平均风速,冬季风速多在2.0m/s以下。少数山口和风线地带风速较大,如甘肃华家岭年平均风速4.6m/s,春季平均风速接近6.0m/s,冬季也达4.0m/s;山西五台山年平均风速为9.0m/s,冬季大于12—13m/s,夏季也有7—8m/s。对土壤侵蚀而言,作用最大的是风力在8级(风速≥17.2m/s)以上的大风。黄土高原的大风,春季出现次数最多,夏季次之,秋季最少,3—6月的大风日数几乎占全年的一半以上。此时表土干燥,加上受冬春冻融作用影响,表层结构疏松,地面光裸,风蚀十分活跃,据调查,甘肃靖远县兴堡子川年风蚀模数达3400t/km²·a,宁南各县为1300—6500t/km²·a,榆林、神木、定边、横山等地为2700—6750t/km²·a^[2]晋西北右玉县川阴梁农耕地风蚀量平均(1984—1988年)达到12780t/km²·a^[3]。

(二) 地质地貌

黄土高原的地质构造体系大致以六盘山为界分为东西两部分，以东属华北陆台的一部分，其中又分为鄂尔多斯台向斜和山西台背斜，并有汾渭断陷和银川—呼和浩特断陷；六盘山以西属秦岭—祁连地槽的东延部分，中生代和新生代构成陇西盆地。这两个大地构造单元的形成演化特点以及其中的沉积建造，都对区域现代自然环境特点产生深刻影响，其中以新构造运动特点和第四纪黄土堆积的影响最大。

黄土高原新构造运动的继承性特点明显，陆台区和陇西盆地以大面积间歇抬升为主，断陷谷地继续下沉。黄土高原第四纪抬升总量达200—300m，六盘山地区抬升量较大，超过300m，近期仍以每年20mm速度上升，它是黄土高原的抬升中心之一；另外几个抬升中心是华家岭、白于山地区和渭北山地。总的来说，六盘山以西地区抬升量普遍大于以东地区，根据水准测量资料计算，1934—1955年期间陇西和渭源等地的抬升量为0.66m，年平均达到30mm以上。白于山是无定河、延河、北洛河等的发源地，其南坡河流深深切入基岩达100m以上，地势高差300m以上，北坡与鄂尔多斯高原相对高差较小，构成北缓南陡的形势。汾渭盆地是黄土高原的主要下沉区。渭河盆地第四纪下沉量在西安附近约1000m，固市附近为1300m，一般都在800m左右，由于地壳下沉，黄河禹门口至潼关河段以及渭河下游每年都有0.2—0.4亿t泥沙堆积；汾河谷地的第四纪下沉量以太谷盆地最大，达500m，临汾盆地约300m，运城盆地约400m。

地震是新构造运动的表现之一，黄土高原是我国地震活动频繁地区之一，而且强震较多。据统计，汾渭谷地自公元512年至1979年的1467年中，共发生4—6级地震79次，6—7级地震14次，7—8级地震5次，大于8级地震3次；银川—呼和浩特断陷自公元876年至1979年的1103年中，共发生4—6级地震47次，6—7级地震4次，8级以上地震1次；贺兰—六盘山断裂和陇中地区大于6级地震34次。每次破坏性地震一方面诱发重力侵蚀，另一方面破坏黄土地层的整体结构，产生许多压力裂隙，为流水侵蚀提供方便。1920年12月16日宁夏海原发生8.5级地震，同年12月25日泾原发生7级地震，都发生了大量重力侵蚀，仅西吉县境就诱发了650处滑坡和崩塌，夏家大路至兴平之间在65km²区域内，滑坡和崩塌面积占了48%。1556年1月23日陕西华县大地震（8级）和1927年5月23日甘肃古浪的8级地震，都造成了显著的地面形变，渭北高原和晋东南台塬上的沟谷呈NW—SE走向，与地壳应力场分布方向一致，是构造应力对侵蚀产生影响的表现。

厚层黄土堆积是黄土高原自然环境的最大特点，其分布面积约275000km²，也就是说全区约有2/3的面积为黄土覆盖。黄土的厚度一般为100—200m，兰州市九州台最厚达336m，其区域变化是六盘山以东的厚度普遍大于以西地区，以西是兰州附近较厚，向北则减薄；以东有两厚度中心，一个在董志塬和洛川塬区，达150—170m，另一个在吴旗、环县一带，厚度为150—170m，其余多为100—150m。窟野河、皇甫川流域的大部分地区黄土较薄，只有20—50m。不同时代的黄土地层中，中更新世离石黄土的厚度最大，达

100m 以上,晚更新世马兰黄土的厚度最小,只有 10—30m。但是,马兰黄土的分布范围最广,它超覆于老黄土层之上。全新世黄土的厚度只有 1—4m,目前正在堆积发育之中。黄土的岩性及其与侵蚀的关系将在土壤和地面物质组成一节详述。由于厚层黄土堆积,在本区发育了世界上最典型的黄土地貌,不仅影响了本区的自然过程,在一定程度上影响了人文过程。黄河流域成为中华民族的发祥地,从新石器时代至汉唐,这个地区始终是一派昌盛景象,以及世界四大古代文明地区中唯有黄河流域至今尚未衰落,也都与厚层黄土分布有关。

黄土高原的海拔高度多数地区是 1000—2000m,相对高差 100—300m,地势由西北向东南缓缓倾斜,这种格局决定了黄河及主要支流的流向,使汾渭谷地成为地方侵蚀基准。黄土高原的地貌以黄土地貌为主,兼有石质中山和低山。黄土地貌的最大特点是地面崎岖起伏,千沟万壑,支离破碎,地貌的现代过程强烈。黄土高原的沟壑密度多在 3—4km/km² 以上,最高的地区达到 10km/km² 以上。沟壑密度有明显的区域差异,六盘山以东普遍大于以西地区。六盘山以东地区又有南北差异,一般是北部大于南部,黄河晋陕峡谷区为沟壑密度的高值区。六盘山以西的沟壑密度多在 3—4km/km² 以下,也有南北差异,其特点与以东地区相反,南部大于北部。支离破碎特点用地面破裂度表示,其值一般在 40—50% 之间,黄河晋陕峡谷两侧最高,可以达到 60% 以上,六盘山以西地区、各支流的河源地区、黄土塬区相对较低,无定河以北地面有固定和半固定沙丘覆盖的地区破裂度最低,只有 30% 左右。

黄土地貌类型主要有黄土塬、黄土梁、黄土峁和各类沟谷。在陕北或陇东作南北向剖面,可以清楚地看到黄土地貌类型的分布有明显的区域变化特点:北部为峁状丘陵地区,向南渐变为梁状丘陵为主,至延安一带,梁状丘陵的面积增加,再往南再次出现梁状丘陵为主,然后是黄土塬区:铜川市稍南,黄土塬为黄土台塬代替,最后进入渭河谷地河谷平原阶地区。陇东也有类似变化。六盘山以西黄土地貌的区域变化与以东不同,黄土塬出现在北部地区(白草塬),中部多峁状丘陵,南部多长梁丘陵。黄土塬、梁、峁的区域分布特点,是黄土下伏基岩古地貌特征对黄土地貌发育影响的反映。古地貌波状起伏区,发育梁状为主的黄土丘陵;古地貌为宽浅盆地或缓倾斜平原区,则以黄土塬为主。

黄土高原的沟谷类型有浅沟、切沟、悬沟、冲沟、塄沟(干沟)和河沟等,前三种多分布在梁状坡面和谷缘线上,属于现代侵蚀沟;后两种为古代侵蚀沟,又称为承袭沟,其发育历史可追溯到中更新世,小流域则可追溯到更新世初期或更早。老冲沟是晚更新世末的产物;新冲沟是全新世以至近期形成。

地貌与侵蚀的关系十分密切,其作用表现在两个方面,一是地貌类型区域变化影响侵蚀特点的宏观差异,二是地貌形态特征(坡度、坡长、坡向等)制约着侵蚀过程的强弱变化。在以黄土塬为主的地貌类型区,土壤侵蚀方式以沟蚀为主,沟蚀量可占小流域侵蚀总量 80% 以上。在以黄土梁为主的黄土丘陵区中,晋西、陕北等地坡面侵蚀和沟谷侵蚀都很重要,但沟谷地的产沙量仍占主要。陇中地区谷间地面积较大,坡度较小,坡

长较大,土壤侵蚀方式以坡面侵蚀为主。长城沿线和高原北部地区,间地、支地、掌地、尚地等地貌类型分布广泛,它们目前正受沟谷溯源侵蚀影响,形成以破间为主的独特现代侵蚀类型区。无定河上游及其以北的黄土丘陵区,地表有零星沙丘覆盖,沟谷中广泛出露中生代长石砂岩和泥页岩,目前的风蚀、水蚀和重力侵蚀都很活跃。

坡度陡峻是黄土高原地貌的又一重要特点。根据在1:5万地形图上抽样量算地面坡度组成的结果^[4],本区坡度组成的特点如表1—2所示。该表说明,除豫西、晋东南、晋西北、汾渭谷地等地区以外,其余地区大于15°的坡地面积多占土地总面积的40%以上,晋西、陕北、陇东南部大于25°面积所占比例高达30%以上。坡度的陡缓不仅决定土壤侵蚀的强弱,而且影响土壤侵蚀方式,典型小流域的调查表明,坡度小于30°的梁峁坡面,暴雨径流以面状侵蚀为主(兼有浅沟和切沟侵蚀),超过此坡度则重力侵蚀活跃,发生滑坡、滑坍、泻溜侵蚀,泻溜的坡度最大峰值域为45°—50°,30°—60°左右为本区的滑坡临界坡角;泻溜随坡度的变化发生频率为正态曲线分布;崩坍随坡度增加的出现频率按幂函数曲线递增,其下限临界坡角约为60°。

表 1—2

黄土高原地面坡度组成* (引自文献4)

单位:万亩

土地类型	地 区	豫西晋东南		晋西北		汾渭谷地		晋陕蒙接壤区		晋西陕北		陇东陕西南部		两西、天水		兰州	
	坡度(度)	面积	%	面积	%	面积	%	面积	%	面积	%	面积	%	面积	%	面积	%
黄土丘陵与平地	<3	1994.5	22.9	1991.9	30.3	5502.4	40.8	1691.0	21.9	1015.4	9.8	1489.6	18.5	1080.6	13.5	1221.4	21.2
	3—7	790.7	9.1	766.5	11.7	867.8	6.4	956.3	12.4	394.2	3.8	190.0	2.4	419.0	5.2	423.4	7.4
	7—15	718.1	8.2	303.6	4.6	854.7	6.3	1458.1	18.8	1257.3	12.2	962.3	12.0	2612.8	32.6	1226.6	21.3
	15—25	146.6	1.7	103.3	1.6	1294.8	9.6	1276.7	16.5	2700.5	26.2	2858.4	35.6	2245.5	28.0	1256.1	21.8
	>25	53.8	0.6	0.72	0.01	460.2	3.4	112.6	1.5	3669.4	35.6	2472.3	30.8	965.5	12.0	844.9	14.7
土石山地	<3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.6	0.02	19.0	0.3
	3—7	68.9	0.8	124.6	1.9	29.7	0.2	0.5	0.01	1.7	0.02	0.5	0.01	10.2	0.1	0.9	0.02
	7—15	1360.3	15.6	1076.8	16.4	820.1	6.1	71.5	0.9	148.1	1.4	5.5	0.07	97.5	1.2	187.7	3.3
	15—25	2006.7	23.0	819.1	12.5	1828.8	13.6	243.3	3.1	398.5	3.9	20.9	0.3	270.7	3.4	129.4	2.3
	>25	1507.1	17.3	1367.7	20.8	1701.1	12.6	41.7	0.5	347.3	3.4	18.9	0.2	317.5	4.0	408.2	7.0
沙地		11.8	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	1824.3	23.6	358.1	3.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
湖、库、双线河		63.4	0.7	19.2	0.3	139.6	1.1	61.3	0.8	25.7	0.3	18.0	0.2	5.5	0.07	39.1	0.7
合 计		8727.8	100.0	6573.8	100.0	13499.2	100.0	7737.3	100.0	10316.0	100.0	8035.3	100.0	8026.4	100.0	5756.7	100.0

* 量算的范围与本文所指范围不完全一致,两西指定西和两吉、海原、固原地区。

(三) 土壤和地面物质组成

黄土高原有地带性和非地带性两类土壤。前者有褐土、黑垆土、栗钙土和灰钙土；后者主要有黄绵土、风沙土、盐土、碱土等。褐土目前主要分布在秦岭北坡、六盘山的低山丘陵、以及太行山和中条山等地。分布在汾渭平原超河漫滩地和台塬上的褐土，经过人为长期耕种熟化和施肥覆盖，已形成质地优良的农业土壤——栗土。

黑垆土在黄土高原分布很广，东起太行山，西至青藏高原东缘，以陇东、陇中、陕北和晋西等地最发育。由于受黄土高原长期土壤侵蚀的影响，目前除在一些地势平缓、土壤侵蚀从来就较轻微的地区（如董志塬和洛川塬的塬面）尚保存较好外，广大黄土丘陵区已流失殆尽，仅在一些局部地形低洼处或分水鞍处残存。黑垆土实际上是一种埋藏古土壤，其上常有厚度不等的全新世风积黄土覆盖。董志塬面上在 2.0m 左右厚度的全新世黄土层中，夹有两层黑垆土，其 ^{14}C 年代介于距今 3000—9000 年之间，孢粉组合也与现代植被不完全一致，因此有人认为它对现代自然环境没有指示意义。

栗钙土和灰钙土是黄土高原主要的草原和干草原向荒漠草原过渡地区的土壤，分布在高原西北部 and 北部边缘地带，是土地荒漠化严重地区的土壤。它们在本区的分布面积虽然不广，却对环境特征起指示作用，因为在这类土壤分布区，旱作农业已很难维持，牧业也切忌过渡。

在广大黄土高原地区分布最广的黄绵土，常与黑垆土呈复区分布。它是本区最主要的耕作土，是在黄土母质上发育而成。黄绵土的形成过程一方面是黄土耕种熟化过程，另一方面又是以侵蚀为主的地质地貌过程。如果某一地区是以前一过程为主，则黄绵土被逐渐熟化，肥力提高；相反，如果是以后一过程为主，黄绵土始终处于生土状态。目前除了少数地势平坦、侵蚀微弱的地点外，黄土高原绝大部分地区都属于侵蚀性黄绵土。

风沙土和盐土、碱土仅见于黄土高原北部和西北部的局部地区，在高原的土被组成中居次要地位，所指示的也主要是局部环境状况。其中风沙土与侵蚀的关系较为密切，因为风沙物质是黄河粗泥沙的重要来源之一。根据杨根生等人的资料，黄河中游流域风沙入河沙量约为 1.6 亿 t（直接进入黄河干流的约 0.5 亿 t，进入各支流的 1.1 亿 t），占黄河年平均输沙量的 1/10，约占粗泥沙总量的 1/4^[5]。

上述各类土壤的成土母质，主要是黄土，其次有第四纪其它松散沉积物和第三纪红土、甘肃系地层和第三纪以前的各类岩石。这些物质共同构成了黄土高原遭受侵蚀的对象，它们的抗蚀性状况，直接关系到侵蚀产沙的强弱。

黄土是一种质地均匀，结构疏松，钙质含量丰富，具大孔隙的第四纪风成堆积物。其粒度组成以粉沙为主，具有明显的水平分带特征。刘东生等根据马兰期黄土粒度组成的区域变化将黄土高原土由北而南依次划分为砂黄土带、绵黄土带和粘黄土带^[6]。这一划分不仅为黄土风成说提供了证据，也为研究该区侵蚀产沙规律和水土保持措施配置提供了依据。黄土的粒度组成不同，与侵蚀有关的物理力学性质也不同。

马兰黄土的物理力学性存在由西北向东南变化，马兰黄土中的骨架颗粒以 0.25—

0.005mm 粒级为主,在黄土结构中起骨架支撑作用。由于大于 0.05mm 颗粒在黄土中的含量由西北向东南逐渐减少,粘粒逐渐增多,所以粒间的胶结形式由西北部的接触式逐渐变为接触—基底式和基底式。在西北部,胶结物呈薄膜状,骨架颗粒连接不牢固,至延安和离石一带,胶结物以镶嵌状穿插在骨架颗粒之间,连结紧密程度加强;南部渭南西安一带骨架颗粒间的薄膜加厚,形成较牢固的团聚状胶结关系。而且,由西北向东南马兰黄土的粒间孔隙率逐渐变小,天然容重、天然含水量、塑性指数和粘滞力也随之逐渐增加,内摩擦角相应减小。马兰黄土物理力学性质的区域变化,对它的自重湿陷影响极大,砂黄土带的湿陷系数为 0.011—0.59,粘黄土带为 0.005—0.076,相差 2—7 倍,这不仅影响工程地质条件,也影响土的抗蚀强度。实验研究表明,黄土岩性区域变化对侵蚀强度的影响极大(表 1—3),砂黄土地区,每 100mm 径流深度的侵蚀深度(相对可蚀性)为 24.81—27.55mm,粘黄土带为 8.87mm,相差将近 3 倍。

表 1—3 不同地区马兰黄土的相对可蚀性

地点	坡度 (度)	坡长 (m)	物质	土地利用	降雨量 (mm)	径 流		侵蚀深度 (mm)	相对可蚀性 (mm/100mm)
						深度 (mm)	系数 (%)		
榆林	23	20	砂黄土	农地	147.6	20.65	13.9	5.69	27.55
靖边	19	20	砂黄土	农地	63.5	3.68	5.8	0.91	24.81
绥德	22	20	砂黄土和粘黄土	农地	191.1	31.85	14.7	3.44	10.80
延安	20	20	绵黄土	农地	241.1	61.13	25.4	5.88	9.62
彬县	18	20	粘黄土	农地	110.2	34.73	31.5	3.08	8.87

土的渗透性和崩解性是判断其抗蚀能力的重要指标。黄土中 0.5—0.05mm 颗粒含量越高,其渗透率越大,黄土高原大部分地区的稳渗率都在 0.5—1.5mm/min 之间,这对于减少径流冲刷是很有利的。但是,由于黄土崩解性很强,加上其它不利条件(地貌、植被等)突出,侵蚀仍然十分强烈。据唐克丽等人将 4×4×4cm 原状土置于静水中观测,砂黄土崩解为散粒所需时间为 0.5—1.0min,绵黄土为 1—2min,粘黄土为 1.5—3.0min,相差约 3 倍^[2]。黄土高原北部的土壤侵蚀强度远大于南部,这是重要原因之一。

黄土下覆基岩的抗蚀性一般都大大强于黄土,其中只有皇甫川、窟野河流域一带广泛出露的中生代砂岩和泥岩例外,当地群众将这些岩石称为砒砂石和羊肝石。砒砂石和羊肝石的抗蚀力极低,极易风化破碎为碎粒,常以泻溜方式堆积在谷底,成为黄河粗泥沙($d \geq 0.05\text{mm}$)的重要来源。

(四) 植被

在我国热量带和干湿区的划分中,黄土高原大部分地区处于暖温带半湿润、半干旱气候区,一部分地区位于中温带半干旱气候区,高原西北部为中温带干旱气候区。相应

的自然植被带有森林带、森林草原带、草原带和荒漠草原带。

森林带的位置大致在山西吉县—蒲县—汾西—灵石—榆社—和顺以南的汾河下游流域和陕西陇县—彬县—宜君—黄龙以南的渭河下游流域及洛河下游,包括太行山南端、吕梁山南端、中条山、秦岭和关中北山。森林草原带是森林地带和草原带之间的过渡地带,其北界大致在山西广灵、宁武、临县、陕西绥德、志丹和甘肃华池、宁夏固原一带,包括汾河中游流域、洛河和泾河中游、渭河上游流域,其西北为典型草原地带;宁夏清水河中游、甘肃祖厉河下游、青海湟水流域等地为荒漠草原地带。此外,在区内各山地(如中条山、六盘山等)都构成了典型的植被垂直地带分布。

黄土高原的植被种类较多,已发现草本植物 500 余种,木本植物 250 余种,资源植物 3000 余种,但各类植物的资源量不大,而且目前到处是光山秃岭,植被覆盖度极低,即使是盛夏植物生长茂盛季节,大地仍是一片黄色。全区的森林覆盖率仅 7.1%,比全国平均数约少 6 个百分点。现有的森林主要分布在高原东南部 and 岩石或土石山区,广大面积的黄土丘陵区 and 黄土塬区仅在村镇附近有零星的树木,非耕地上只有稀疏草灌。子午岭是黄土高原上黄土覆盖区森林植被保存较好的唯一地区,近几十年来同样遭到严重破坏,目前其林区范围缩小了将近 20 公里,森林边界线平均每年退缩 0.5km。森林是大地的绿色卫士,是平衡生态的重要支柱。全区森林植被如此匮乏,土壤侵蚀剧烈发展就是不可避免的了。

除森林植被外,草灌也同样能起到保护土壤免遭侵蚀功效。可是,本区的草灌的覆盖度同样很低,天然草场的覆盖度只有 25—65%,其中山区草地的覆盖度较高,黄土丘陵和黄土塬区较低。由于过度放牧和滥垦、滥伐、滥挖(挖药材)等影响,大部分草场都在向沙漠化方向发展。人工造林种草,虽然早已提倡,但到目前还未达到表征环境特征,影响环境质量的程度。

二、人文环境

黄土高原跨青海、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西和河南七个省(区),其面积按自然地理单元计算为 39.1 万 km²,如果从资源开发 and 环境治理地区完整性出发,将它的范围向北扩展到阴山、贺兰山,称之为“黄土高原地区”,则面积为 62.4 万 km²。在这个地区居住着汉、蒙、回、藏等 10 多个民族,人口将近 1 亿。自古以来,黄土高原就是中华民族的聚居地,享有“中华民族摇篮”和“华夏文化发祥地”的美称。本区远在六七十万年前就有了人类活动足迹,新石器时代的人类活动已十分频繁,原始农业和手工业生产已经发展到相当规模,为创造中华民族灿烂的古代文化作出了突出贡献。自夏、商、西周直至唐代,在将近 3000 年的时间里,这一地区一直是我国的政治与文化中心,农牧业生产的重要基地,手工业发达,不仅是国内交通的枢纽,而且长安还是国际交通贸易线——丝绸之路的起点。唐代以后,黄土高原在国内的重要地位有所下降,这一方面与政治