

黄河

河流地貌过程

许炯心◎著

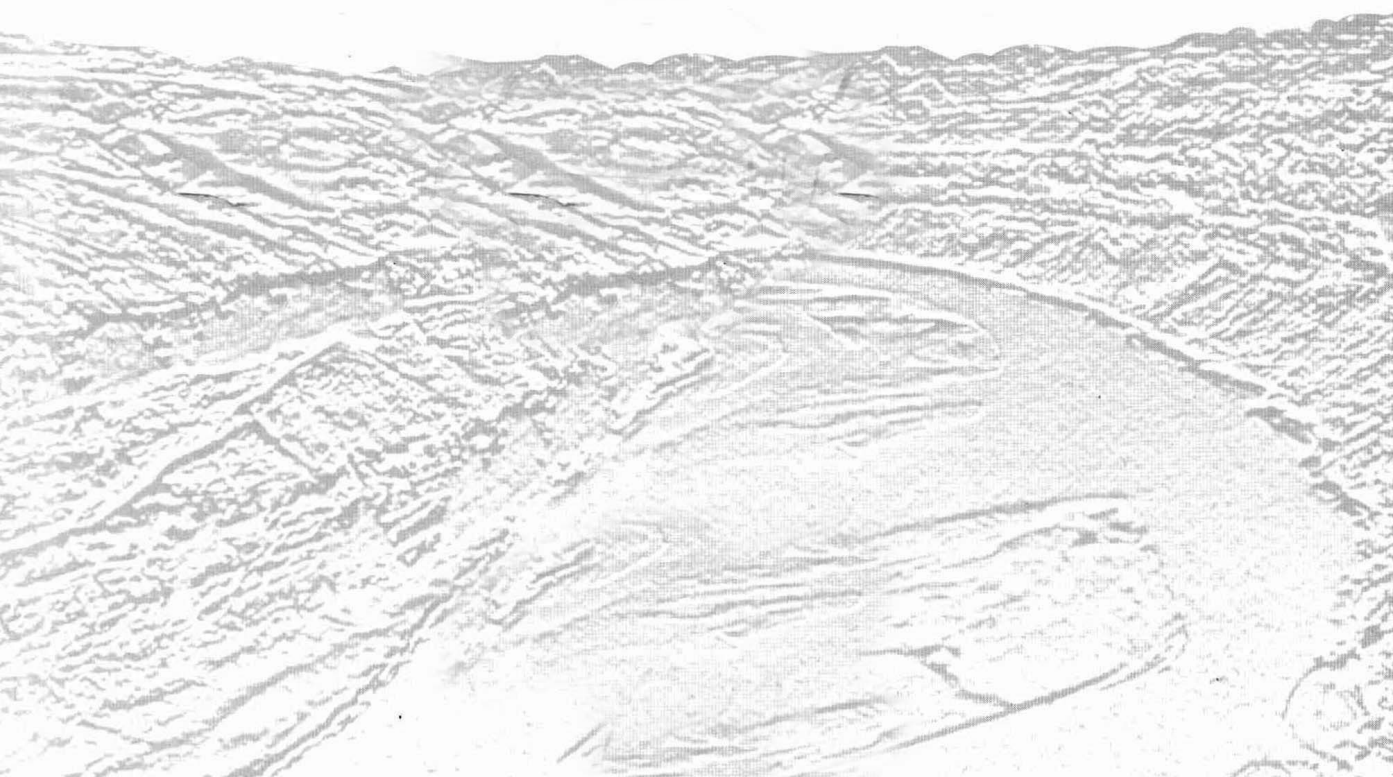


科学出版社

黄河

河流地貌过程

许炯心◎著



内 容 简 介

本书以作者对黄河地貌近 20 年的研究成果为基础,在河流地貌系统的理论框架中,系统地阐述了黄河河流地貌过程的各个方面,涉及泥沙从侵蚀源到沉积汇运动的全过程,即从坡面、沟道中的泥沙侵蚀,到泥沙在坡面、沟道、各级支流、干流中及河口三角洲输移、沉积的整个过程,以及河流地貌的塑造与演变的过程。本书的体系结构是按照流域地貌系统理论中的侵蚀带、输移带、沉积带来展开的,即以现代侵蚀产沙过程、泥沙输移过程、泥沙沉积过程三大部分为主线,同时还突出了黄河流域特有的地貌现象,如多营力侵蚀产沙过程、高含沙水流的侵蚀、输移和沉积过程、黄河下游河道演变特性、干支流河型特性及其成因、流域地貌系统中的耦合关系、入海水沙通量变化与三角洲发育演变等。与此同时,还指出了这些成果的应用意义,可以为黄河流域和河道的规划、治理和管理提供参考。

本书可供地貌、自然地理、地质、生态、水利和水土保持、环境保护等专业的科学研究人员、工程技术人员及大专院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

黄河河流地貌过程 / 许炯心著. —北京: 科学出版社, 2012

ISBN 978-7-03-030879-5

I. 黄… II. 许… III. 黄河—河流地貌学 IV. P942.407.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 073241 号

责任编辑: 李 敏 张 菊 / 责任校对: 刘小梅

责任印制: 钱玉芬 / 封面设计: 耕者设计工作室

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>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012 年 4 月第 一 版 开本: 787 × 1092 1/16

2012 年 4 月第一次印刷 印张: 33 1/4 插页: 2

字数: 790 000

定价: 128.00 元

如有印装质量问题, 我社负责调换

前言

黄河是世界上最重要的河流之一。她是一条金色的巨龙，以一往无前的磅礴气势，从巍峨雄伟的青藏高原一跃而下，越过坦荡如砥的内蒙古高原，切穿千沟万壑的黄土高原，流经广袤无际的华北平原，注入渤海；滋润着万里锦绣大地，孕育了五千年中华历史，与世世代代的华夏儿女血脉相连。

然而，黄河具有两重性，既是中华文明的摇篮，又以闻名于世的洪水、泥沙灾害，成为“中国之忧患”。因此，开发黄河水利、治理黄河水患是两千年来黄河的关键词，也是一代又一代中国河流研究者与治河工作者为之殚精竭虑、终生奋斗的神圣使命。

与世界上其他河流相比，黄河具有很大的特殊性。水少沙多、水沙异源、空间分布不均、时间变异显著、水沙关系失衡，是黄河的显著特点。同时，黄河流经的黄土高原是世界上黄土沉积面积最大的区域，黄土厚度最大，切割密度和深度最大，土壤侵蚀和流域产沙的强度最大，高含沙水流的频率和含沙量的量级最大。所有这些，既是对于黄河研究者的巨大挑战，又为我们攻克世界多泥沙河流的研究难题、建立世界领先的多泥沙河流学科提供了机遇。

对于黄河泥沙和河道的研究，存在着两个主要研究方向，即水力学（河流动力学、泥沙运动力学）方向和地貌学方向。前者以力学分析为主要研究手段，研究较短时间尺度、较小空间尺度上河流的变化；后者以统计分析为主要研究手段，研究较短时间尺度、较小空间尺度上河流的变化。很显然，这两个方向具有很强的互补性。20世纪60年代，中国河流地貌学带头人沈玉昌教授和中国泥沙运动力学与河流动力学带头人钱宁教授，倡导两大学科互相融合，共同发展中国河流研究的新方向。经过半个世纪的努力，已取得很好的进展。流域自然地理因素和人类活动影响是极其复杂的，而且这两方面都随时间而变化，这使得河流研究者所面对的是一个十分复杂的研究对象，很多问题必须在流域系统的框架中才能够得到解决。可以认为，在流域系统理论框架中，将河流研究的水力学和地貌学两个方向结合起来，是使黄河研究提高到一个新水平的重要途径。

本书是一本以地貌学方法研究黄河的专著。近20年来，作者集中全部精力，在国家自然科学基金项目、国家科技攻关项目和科技支撑项目、国家重点基础研究发展计划（973）项目、中国科学院和中国科学院地理科学与资源研究所知识创新工程项目等15个项目的连续资助下，对于黄河河流地貌进行了系统的研究，涉及流域地貌系统的各个方面，发表了150余篇论文。本书就是在对这些成果进行系统总结的基础上完成的。河流地貌的研究可以分为历史过程的研究与现代过程的研究两个方面，前者研究河谷地貌及其发育历史，后者研究河床地貌以及与之相关的泥沙侵蚀、搬运、沉积过程。从20世纪70年代开始，我国河流地貌的研究实现了由前者向后者的转移，本书作者的研究也是围绕黄河河床地貌以及与之相关的泥沙侵蚀、搬运、沉积过程来展开的，力求在河流地貌系统的理论框架中，研究泥沙从侵蚀源到沉积汇运动的全过程，即从坡面、沟道中的泥沙侵蚀，到泥沙在坡面、沟道、各级支流、干流中以及河口三角洲输移和沉积的整个过程，以及这一过程中河流地貌的塑造与演

变的过程。因此，本书的体系结构是按照流域地貌系统理论中的侵蚀带、输移带、沉积带来展开的，即以现代侵蚀产沙过程（第二章）、泥沙输移过程（第四章）、泥沙沉积过程（第五章）三大部分为主线。在侵蚀过程方面，还辟出专门一章，介绍多营力侵蚀产沙过程（第三章）；在沉积过程方面，除了介绍黄河下游河道沉积外，还以专门一章，介绍与沉积密切相关的下游河床演变（第七章）。高含沙水流是黄河流域最有特色的现象，与泥沙的侵蚀、输移和沉积均有密切关系，故专门以一章进行介绍（第六章）。黄河干支流河型的形成，既与泥沙输移、沉积有关，又与高含沙水流的特殊能耗行为有关，也专门以一章来进行讨论（第八章）。此后，对于黄河流域地貌系统中的耦合关系进行了介绍（第九章）；最后则以对入海水沙通量变化与三角洲发育演变的讨论（第十章）结束全书。

本书的研究得到了国家自然科学基金项目、国家重点基础研究发展计划（973）项目、国家科技攻关项目和科技支撑项目、中国科学院以及中国科学院地理科学与资源研究所知识创新工程项目的资助。在研究工作和野外工作中，得到陆中臣、师长兴、王随继、陈浩、张欧阳、程东升、闫云霞、杨吉山、廖建华、信忠保、马元旭、颜明、王红兵等同仁的帮助、支持和协助，在书稿的整理中得到了庞远玉的协助，统此致谢。研究工作涉及的大量资料来自有关水文站、气象站和黄河水利委员会有关部门，没有这些单位的同志们数十年如一日的辛勤劳动，作者的研究工作是无法完成的，谨向他们表示衷心感谢和最崇高的敬意。由于资料 and 水平的限制，作者虽然尽了最大的努力来使材料的组织系统化、条理化，但尚未尽如人意。本书的不足和疏漏之处若能得到读者的指正，作者将十分感激。

2003 年，作者 55 岁生日时，曾作诗一首志感，谨附于此，以表达对于黄河的血脉深情。

五十五岁自寿

一个头发花白的老人
背靠着高高的河岸
静静地注视着河流
一张地图放在身边
河流伸进他的身体
融进他的血脉之间
满含哲思的斜阳余晖
在他的肩上一闪一闪
他的血管伸进地图
在那片心爱的黄色之中
长成蓝色河流
曲曲弯弯

许炯心

谨识

2012 年 2 月 10 日

目 录

前言

第一章 绪论	1
第一节 黄河流域自然地理概况	1
第二节 河流地貌特征	9
第三节 黄河地貌的研究简史	17
第四节 本书的指导思想和任务来源	22
第二章 现代侵蚀产沙过程	26
第一节 中国宏观自然地理背景下的黄河流域侵蚀产沙特征	26
第二节 降水、植被、侵蚀耦合关系及其临界	32
第三节 侵蚀产沙变化对夏季风强度变化和人类活动的响应	39
第四节 水土流失治理对侵蚀产沙的影响	48
第五节 侵蚀产沙空间尺度效应	61
第六节 侵蚀产沙的时间尺度效应	69
第七节 基于遥感植被指标 NDVI 的流域侵蚀研究	73
第八节 多沙粗沙区侵蚀产沙的变化趋势	81
第三章 多营力侵蚀产沙过程	92
第一节 黄土高原地区沙尘暴形成的因素	92
第二节 风水两相侵蚀产沙过程	110
第三节 风水两相作用与不同粒径组泥沙的产出	117
第四节 风水两相作用对黄河支流悬移质粒度特征的影响	126
第五节 风水两相作用对侵蚀产沙地域分布的影响	131
第六节 人类活动对风水两相侵蚀的影响	139
第四章 泥沙输移过程	152
第一节 无定河流域泥沙收支平衡	152
第二节 黄河下游河道泥沙输移特征	167
第三节 洪水输沙效率与水沙组合和河床形态的关系	178
第四节 高效输沙洪水	184
第五节 黄河下游河道输沙功能	189

第五章 河道泥沙沉积过程	204
第一节 黄河小北干流的泥沙沉积	204
第二节 历史上黄河下游沉积速率的突变现象	217
第三节 黄河下游现代沉积的变化趋势	226
第四节 黄河下游泥沙沉积统计关系	236
第五节 黄河下游河道沉积的空间分布	240
第六节 黄河下游堤距对河道沉积过程的影响	254
第七节 黄河下游不同粒径组泥沙的沉积	259
第八节 黄河下游泥沙的存储与释放	267
第六章 流域地貌系统中的高含沙水流	275
第一节 黄土高原高含沙水流形成的自然地理因素	276
第二节 坡沟系统中高含沙水流的形成	282
第三节 高含沙水流悬移质泥沙的粒度组成	292
第四节 高含沙水流侵蚀	300
第五节 风水两相作用对高含沙水流的影响	307
第六节 冲淤双临界现象	313
第七节 不同来源水沙对高含沙水流的影响	317
第八节 人类活动对高含沙水流的影响	321
第九节 高含沙水流频率的时间变化	326
第七章 黄河下游河床演变	332
第一节 河道的复杂调整现象	332
第二节 黄河下游河道调整对三门峡水库清水下泄阶段的响应	336
第三节 平滩流量及其变化	343
第四节 游荡河段河床调整对水沙变化的响应	353
第五节 河道萎缩过程中的河床调整	361
第六节 黄河下游河床调整的特征时间尺度	389
第七节 黄淮海平原河流的纵剖面凹度特征	405
第八章 河型	413
第一节 高含沙型曲流河床及其形成机理	413
第二节 黄河游荡河型的自然地理因素	419
第三节 河型对含沙量空间变异的响应及其临界现象	424
第四节 基于来沙系数的冲积河流河型判别	430
第九章 流域地貌系统水产沙带与沉积带的耦合关系	438
第一节 黄河上中游水产沙系统与下游河道沉积系统的耦合关系	438

第二节 流域产水产沙耦合对黄河下游河道冲淤和输沙能力的影响	444
第十章 入海水沙通量与三角洲发育演变	455
第一节 入海径流通量及其变化	456
第二节 入海泥沙通量及其变化	461
第三节 不同来源区水沙变化对入海泥沙通量的影响	468
第四节 三角洲造陆临界	473
第五节 流域因素变化对三角洲造陆速率的影响	478
第六节 不同粒径组入海泥沙通量的变化及其对三角洲造陆的影响	482
第七节 夏季风强度变化对陆海相互作用的影响	490
第八节 三角洲造陆速率的历史变化	498
第九节 下游泥沙沉积汇对入海悬移质泥沙粒度的影响	505
参考文献	512

第一章 绪 论

第一节 黄河流域自然地理概况

黄河流域自然地理条件复杂，区域分异明显。在地貌上，黄河流域从西到东跨越我国地貌三大阶梯，包括青藏高原东北部、内蒙古高原、黄土高原、太行山山区和华北平原等地貌单元；在自然地理上，则包括半湿润、半干旱带、干旱带等，表现出鲜明的过渡性质，是中国和世界上有名的脆弱生态带之一。

一、气候特征

黄河处于我国的中纬度地带。上游流域中位于青藏高原的部分主要属于青海高原，具有高寒气候。上游流域中位于内蒙古高原的部分和中游位于黄土高原的部分，地处我国西北半干旱地区，属于大陆性季风气候。气候干燥、寒冷，冬季较长、多风沙，夏季短促、凉爽。黄河流域的年平均降水量为 467mm，是我国比较少雨的地区，其降水量在空间上的分布很不均匀，近海富含水分的海洋气团受西部中、高山的阻挡，不易深入中、上游地区，导致降水由东南向西北呈现递减的趋势。黄河下游郑州多年平均降水量为 640.9mm，而黄河上游银川仅为 202.8mm（表 1-1）。降水的分配在时间上也不均匀，主要集中在 7 月、8 月、9 月三个月，约占全年降水量的 70%。夏季暴雨多、强度大，所形成的洪水对下游的威胁很大。其中，中游暴雨对黄土高原土壤侵蚀和产沙有直接的影响，使大量泥沙进入黄河，成为下游“地上河”不断淤积抬高和洪患频发的“病根”。冬季寒冷造成干流河道结冰封冻，春季开河所造成的冰凌洪水，往往导致局部河段受到凌汛威胁（叶青超，1994）。表 1-1 ~ 表 1-3 列出了黄河上中游主要城市一些气候指标 30 年（1951 ~ 1980 年）的平均值，以供参考。

表 1-1 黄河上中游主要城市 1951 ~ 1980 年平均降水量和蒸发量（单位：mm）

地名	年降水量	最大 1 日 降水量	6 月 降水量	7 月 降水量	8 月 降水量	9 月 降水量	10 月 降水量	年平均 蒸发量
西宁	368.2	62.2	49.1	80.7	81.6	55.1	24.9	1762.8
兰州	327.7	96.8	32.5	63.8	85.3	49.1	24.7	1437.7
银川	202.8	66.8	19.9	43.6	55.9	27.3	14.0	1583.2
呼和浩特	417.5	210.1	45.7	102.1	126.4	45.9	24.4	1754.1
太原	459.5	183.5	52.5	118.3	103.6	64.3	30.8	1798.3
西安	580.2	92.3	52.2	99.4	71.7	98.3	62.4	1546.0
郑州	640.9	189.4	68.0	154.4	119.3	71.0	43.8	2013.3

资料来源：张家诚和林之光，1985

表 1-2 黄河上中游主要城市 1951 ~ 1980 年平均气温 (单位:℃)

地名	年均气温	气温年较差	1 月平均气温	7 月平均气温
西宁	5.7	25.6	-8.4	17.2
兰州	9.1	29.1	-6.9	22.2
银川	8.5	32.4	-9	23.4
呼和浩特	5.8	35	-13.1	21.9
太原	9.5	30.1	-6.6	23.5
西安	13.3	27.6	-1	26.6
郑州	14.2	27.6	-0.3	27.3

资料来源: 张家诚和林之光, 1985

表 1-3 黄河上中游各省会 1951 ~ 1980 年平均风速和沙尘暴日数

地名	1 月月均 风速/(m/s)	4 月月均 风速/(m/s)	7 月月均 风速/(m/s)	10 月月均 风速/(m/s)	年均风速 /(m/s)	最大风速 /(m/s)	年大风 日数/天	年沙尘暴 日数/天
西宁	1.5	2.6	1.9	1.7	2	15.7	32.3	8.1
兰州	0.5	1.5	1.4	0.7	1	17	6.3	3.9
银川	1.6	2.5	1.7	1.4	1.8	28	25.7	6.7
呼和浩特	1.6	2.7	1.4	1.5	1.8	28	35.8	8.4
太原	2.5	3.3	2	2	2.5	25	34.2	3.3
西安	1.7	2.4	2.2	1.7	2	19.1	8.4	1.6
郑州	3.5	3.7	2.6	2.6	3.1	20.3	23	7.2

资料来源: 张家诚和林之光, 1985

(一) 青海高原的气候特征

青海高原气候具有以下特点 (中国自然地理编写组, 1984): ①空气稀薄, 气压低, 含氧量少。由于地势高, 气压很低, 年平均大气压大都在 625mbar^① 以下, 仅及海平面气压的一半。空气密度小, 加剧了空气增温和降温的强度, 使气温日变化增大。②光照充足, 辐射量大。年总辐射绝大部分地区均超过 160kcal^②/cm², 全年日照时数为 200 ~ 3600h。③气温低, 温度年变化小, 日变化大。例如, 西宁市年均气温、1 月平均气温和 7 月平均气温分别为 5.7℃、-8.4℃和 17.2℃, 气温年较差为 25.6℃ (表 1-2)。气温还具有年变化小、日变化大的特点。④干湿季分明, 干季多大风。干季降水很少, 90% 以上的降水均集中于雨季。年降水量由西北向东南增大, 变化于 200 ~ 700mm, 降水的空间变化梯度较大。该区为全国大风最多的地区之一, 风季持续时间长, 基本上与干季吻合。例如, 西宁市年平均大风日数为 32.3 天、最大风速为 15.7m/s (表 1-3)。

① 1bar = 10⁵ Pa, 后同。

② 1cal = 4.1868J, 后同。

（二）内蒙古高原的气候特征

内蒙古高原属于温带半干旱气候，冬季寒冷而漫长，夏季温暖而短促，春季和秋季温度升高和降低急骤；降水少，变率大，分配不均；日照充足，年温差、日温差均较大；大风和沙尘暴很多。夏季该区大部分受蒙古低压控制，源于副热带高压的热带海洋性气团以东南季风的形式进入，带来水汽和降水。但海洋气团来得迟、退得早，故雨期短暂，一般自7月下旬至8月上旬，仅一个月左右。该区降水稀少，年降水量由西北向东南减少，变化于100~400mm。冬季漫长，长达半年以上，1月平均气温一般为 $-8\sim-20^{\circ}\text{C}$ ，由西南向东北递减。7月平均气温较高，如银川为 23.4°C 、呼和浩特为 21.9°C 。气温年较差很大。该区分布着大面积的沙漠和沙地，如腾格里沙漠、库布齐沙漠、乌兰布和沙漠以及毛乌素沙地等，冬季、春季大风日数多，风速大，沙尘暴发生的频率很高（中国自然地理编写组，1984）。在大风和沙尘暴的作用下，大量风成沙进入黄河干流和部分支流，成为粗泥沙的重要来源。

（三）黄土高原的气候特征

黄土高原是黄河流域的主体，也是黄河泥沙的主要来源区。黄土高原的气候与现代地貌过程有十分密切的关系。

黄土高原位于我国东部季风区的中纬度地带，属于高空盛行西风带的南部。近地面高低压系统活动频繁，环流形势季节变化明显。冬季受蒙古高压控制。当极地气团南下时，黄土高原首当其冲，盛行偏北风，风力强盛，气温降低。冷锋从10月至翌年5月皆可出现，但以冬季各月最盛。平均气温较同纬度其他地方低。夏季在大陆低气压范围内盛行偏东风，亚热带太平洋气团可直达该区，空气湿润，当受北方冷空气的扰动时，形成降水。春、秋两季是蒙古高压和太平洋高压过渡时期，为时甚短。

黄土高原东西跨约11个经度，南北跨约6个纬度。地势由东南向西北升高，气温呈现递减的趋势。西部及高原内部的较高山体在一定程度上又破坏了温度分布的纬向地带规律，显示出垂直变化。由于距水汽源地远近不同，东西之间降水有较大差异。高原内部及东侧太行山、南侧秦岭都成为水汽运行的障碍，往往在迎风坡形成降水，而背风坡形成雨影区，使黄土高原的干湿状况趋于复杂。

黄土高原太阳辐射强，日照时间长，区内年总辐射值为 $500\sim670\text{kJ}/\text{cm}^2$ ，其中西部和西北部最高达 $580\sim670\text{kJ}/\text{cm}^2$ ，较同纬度华北地区多 $80\sim130\text{J}/\text{cm}^2$ 。全年日照时数为2000~3100h，北部2800h以上（杨勤业和袁宝印，1991）。

1. 气温

黄土高原各地的年平均气温变化于 $3.6\sim4.3^{\circ}\text{C}$ ，从南向北、从东向西逐渐递减。例如，西安年平均气温为 13.3°C ，兰州为 9.1°C ，榆林为 8.0°C ，右玉仅 3.6°C 。晋东南、吕梁山地等温线呈弧形向南凸出，汾河谷地、黄河北干流（山西、陕西间的黄河峡谷）等温线呈弧形向北凸出，六盘山、黄龙山等地等温线呈闭合状，均反映出地形差异的影响。汾河、渭河下游谷盆地为黄土高原的高温区，年平均气温超过 13°C 。其余地区一般在 $6\sim$

10℃。最冷月（1月）平均气温，各地大体都在0℃以下。最热月一般为7月，平均气温大多超过22℃，渭河谷地7月平均气温高于25℃。这与盆地地貌和秦岭北坡的焚风影响有关。上述温度状况反映出黄土高原具有大陆性季风气候即冬季寒冷、夏季暖热的特点。黄土高原各地温度年较差为26~36℃。

2. 降水

黄土高原各地降水偏少，存在明显的地区差异和年季变化。多数地区年平均降水量变化于300~650mm。因地形抬升作用，山地降水多于平原。例如，六盘山降水量达550~680mm，比附近地区高200~500mm。

降水的时间分配极不均匀。各地降水过程始于3月，6月下旬以后才得到加强，7月、8月、9月3个月降水量之和约占全年降水总量的60%，冬季降水量仅占全年降水量的5%左右。降水年际变化大，丰水年和干旱年降水量可相差2~5倍。年相对变率为20%~30%，尤以春季为甚。降水集中，强度大。榆林、兰州等地最大月降水量都超过200mm，占年平均降水量的70%以上。

黄土高原各地的干燥度变化于1.5~4.0，空间变化趋势与年平均降水量相类似，由东南向西北增高。

3. 风

黄土高原是全国大风、沙尘暴较多的地区之一。冬季盛行偏北风，这与冷空气频频南下有密切关系。夏季偏南风常长驱直入，虽已接近尾间，但仍影响本区。由于各地位置不同，地形复杂，局部风向常因此而发生变化。年平均风速为2~4m/s，通常山区较小，塬面和丘陵沟壑较大。一年之中，春季风速最大，此时多数地方平均风速都超过2m/s，如定边为3.9m/s，平鲁为4.9m/s。除南部平原、盆地外，年大风≥8级日数均变化于10~15天，尤以西北部较多。山西河曲、静乐，甘肃会宁，陕西绥德8级以上大风日数均超过100天。最大风速在陕西北部榆林有23.0m/s的记录（1969年3月15日），南部西安也有25.2m/s的记录（1965年7月7日）。

二、植被特征

（一）青海高原植被特征

黄河河源区平均海拔在4500m左右，多年平均降水量416mm。现代冰川较为发育，分布有众多的湖泊、沼泽，大部分地区为天然草场，植被以高寒草甸、高寒草原为主，还有高寒沼泽植被、天然灌丛、天然森林等。在海拔4000~4700m分布着以高山蒿草、矮蒿草、线叶蒿草、藏蒿草为主的高寒草甸，在海拔4000m以下的阳坡、半阳坡发育着以紫花针茅、异针茅、芨芨草、冷地早熟禾、白草为优势种的高寒草原；在海拔3900~4600m的阴坡分布着以山生柳、高山绣线菊、西藏忍冬、杜鹃、沙棘、金露梅、鬼箭锦鸡儿为建群种的高寒灌丛；在海拔4200~4700m的滩地和草甸镶嵌分布着以藏蒿草为优势种的沼泽草

场。森林呈间隔性片状分布于玛沁县、同德县、兴海县，以青海云杉、祁连圆柏成熟林为优势（周兴民等，1987；中国林业科学院，2002）。

河源区以东属于青海高原向黄土高原过渡的部分，既有黄土高原的地貌特征，又有青藏高原草地的地貌特征，海拔由高到低地貌依次为高原草场、中低山黄土丘陵和河谷川台地。在海拔 4000m 以上为高山流石坡稀疏植被带和永久积雪带；在海拔 3600 ~ 4000m 分布着以金露梅为优势种的高寒灌丛；在海拔 3000 ~ 3600m 大面积分布着以矮蒿草草甸和长茅草、紫花针茅为优势种的草原；在海拔 3000 ~ 3600m 的山地阴坡发育着以青海云杉、青杨为主的乔木林（周兴民等，1987；中国林业科学院，2002）。

（二）内蒙古高原植被特征

在内蒙古温带半干旱大陆性气候条件下，比较适宜草类的生长繁殖，形成了温带草原景观。内蒙古草原是欧亚大陆草原带东端的一部分，是森林草原向内陆干旱荒漠的过渡类型。以多年生旱生草本植物占优势，植物区系成分以蒙古 - 亚洲中部的种属占绝对优势，阴山以北以蒙古植被成分为主，阴山以南以中国中部植被成分为主。从东到西，随着降水的减少、干旱程度的增强，由干草原向荒漠草原、荒漠递变。荒漠草原植被位于内蒙古高原的中、西部和鄂尔多斯高原的西部，呈东北 - 西南向的条带状分布，是草原与荒漠之间的过渡地带。与内蒙古高原东部的干草原相比，植物种类更加趋于旱化，克氏针茅代替了东部干草原的大针茅和碱草；旱生和超旱生的小半灌木成分增加，并逐渐占据主导地位；植物种属成分减少，草丛高度、盖度和产草量均变小（中国自然地理编写组，1984）。

（三）黄土高原植被特征

就植被地带性而言，除东南部和一些中低山外，黄土高原的大部分地域隶属于暖温带草原的一部分。尽管目前学术界对森林分布的北界、森林草原的性质和归属还存在不同的看法，但多数学者认为，无论是在区系组成方面，还是在分布面积方面，森林草原和干草原都占据绝对优势。

黄土高原的森林植被极为有限。根据 20 世纪 80 年代中期调查的资料显示，各类林地面积之和约占总土地面积的 15.03%，主要分布在东南部及森林草原带的沟谷、山地阴坡和半阴坡。由于人类活动的频繁干扰，目前大面积纯林不多，而以小面积的块状林为主。主要类型有属于落叶阔叶林的辽东栎林及落叶阔叶杂木林，属于温性针叶林的油松林、侧柏林等。

草原植被分布非常广泛。在典型草原带，有丛生禾草草原及矮半灌木、丛生禾草草原两大类。在森林草原带，则有禾草、杂类草草原。

区内较高山体，植被都有一定的垂直分异。但不同的山体因其所处水平地带的差异，植物垂直带的基带、带谱结构和类型以及垂直分带数目的繁简存在不小的差异。区内不少山体为南北走向，因此即使同一山脉，其南北之间的植被垂直分异也很显著。例如，六盘山有 2 ~ 4 个垂直分带，在其中段的华亭—庄浪一线，海拔 1800m 以下为人工经济林、杂木林及农作带；1800 ~ 2300m 的阳坡和 1800 ~ 2100m 的阴坡为以辽东栎、山杨、白桦、槭、椴为主的落叶阔叶林；2100 ~ 2500m 的阴坡为以红桦、华山松为代表的针阔混交林；2300 ~

2400m 的阳坡和 2500 ~ 2600m 的阴坡为由陇山柳、绣线菊等组成的灌木林带；阳坡 2400m 以上和阴坡 2600m 以上为山地草甸草原带。又如，吕梁山北段的黑驼山，海拔 1400 ~ 2000m 为干草原带，2000m 以上为落叶阔叶林带，带谱比较简单；稍往南的云中山，海拔 1400 ~ 2000m 为落叶阔叶林带，2000 ~ 2700m 为山地暗针叶林带，2700m 以上为亚高山灌丛草甸带；再往南至吕梁山主峰关帝山，海拔 1300m 以下为禾草、杂类草草原及有刺灌丛带，该带内许多地方被垦为农田，1300 ~ 2000m 为落叶阔叶林和针叶林带，阴阳坡的差异十分明显，2000 ~ 2700m 为针叶林带，2700m 以上为草甸灌丛带。

依据植被地带性分异，结合各地植被类型的差异性和相似性，黄土高原植被可划分为 13 个植被区：①晋东南、关中落叶阔叶林区；②晋中落叶阔叶林区；③渭河上游、洮河森林草原区；④陕北南部、晋西森林草原区；⑤陕北北部、晋西北森林草原区；⑥陇东干草原区；⑦陇中南部干草原区；⑧陇中北部荒漠草原区；⑨内陆荒漠化草原区；⑩长城沿线干草原区；⑪吕梁山森林草原区；⑫六盘山灌丛草原区；⑬秦岭北坡森林区（杨勤业和袁宝印，1991）。

三、地面组成物质

黄河流域的地面组成物质主要可以分为基岩、风成沙、黄土、黄土以外的土状堆积物、河湖相沉积物五大类，其分布与宏观地貌类型有密切的关系。

（一）基岩

基岩按其抗蚀性的不同，可以分为坚硬基岩、半坚硬和松软基岩。

1. 半坚硬和松软基岩

这包括古近系—新近系砂岩、泥岩岩系和中生代砂岩、泥页岩和强烈构造破碎的前古近系岩系。古近系—新近系砂岩、泥岩岩系，是一套半成岩的红色、杂色砂岩及粉砂岩和泥岩，广泛分布于黄土高原西部。分布于陕西北部 and 邻近的内蒙古地区的中生代沙泥岩，被当地称为“砒砂岩”，成岩程度低、沙粒间的胶结程度低、结构强度低，极易风化，抗蚀力很弱，是黄河中游粗泥沙的主要来源之一。强烈构造破碎的前古近系岩层，工程地质性能也较差，易发生滑坡、崩塌等现象。在秦岭—祁连山北侧大断裂延伸于六盘山以西的部分，此种岩类较发育，常形成宽达数千米的破碎带（唐克丽，1991）。

2. 坚硬基岩

未遭受强烈构造破碎的前古近系岩层（中生代砒砂岩除外），包括各类岩浆岩、沉积岩和变质岩，大部分均为坚硬基岩。以古生代层状、块状的坚硬、半坚硬结晶岩类为主，如石英岩、大理岩、花岗岩、片岩、板岩、片麻岩、石灰岩、砂砾岩、砂岩等。坚硬岩层成岩程度高，工程地质性能较好，所组成的斜坡稳定性强，不易发生重力侵蚀。黄河上游、中游的峡谷地区，河流深切，出露坚硬基岩，抗蚀性很强，形成雄伟的高山、中山峡谷地貌。在黄土高原内部的一些山地，如吕梁山、黄龙山、子午岭、六盘山以及黄土高原

南侧的秦岭,均分布有坚硬基岩,在地貌上表现为高度不等的山体。

(二) 风成沙

黄河中游风成沙分布在黄土高原北缘的长城沿线以北、阴山以南、贺兰山以东、右玉—偏关以西的区域内。风沙面积大约 15 万 km^2 。区内的沙漠包括毛乌素沙地、库布齐沙地、乌兰布和沙漠、河东沙地、腾格里沙漠等,面积约 6.6 万 km^2 ,约占风沙区面积的 44%,其余都是片状沙地。黄河干流沙坡头至河曲河段,风沙活动对于黄河泥沙有明显影响。在风的直接、间接作用下,风成沙进入黄河有 3 种方式:①在风沙流的直接搬运下进入黄河;②河岸上的沙丘向着河道移动,最后进入黄河;③由于黄河河道的摆动,由风沙堆积而成的河岸发生坍塌,使风成沙进入黄河。除了黄河干流两岸有风成沙分布外,在其支流秃尾河、无定河、佳芦河、窟野河等支流的上游也有大片风沙分布,风成沙也会通过上述方式进入河道(唐克丽,1991)。

(三) 黄土

黄土高原西起青海日月山,东至太行山,南接秦岭,北抵鄂尔多斯高原,海拔 1000 ~ 2000m,是世界上最大的黄土分布区,在厚层黄土上发育了黄土塬、梁、峁、沟壑和黄土丘陵等黄土地貌类型。中国是世界上黄土分布面积最大的国家,黄土总面积为 380 840 km^2 。中国黄土的分布面积以黄河中游地区最大,面积为 27.56 万 km^2 ,约占中国黄土总面积的 72.3% (刘东生等,1964)。

我国黄土最厚的地方黄土厚达 180 ~ 200m,分布在泾河与洛河流域的中下游地区,其他地区从十几米到几十米不等。黄土地层可以划分为早更新世的午城黄土、中更新世的离石黄土和晚更新世的马兰黄土。晚更新世黄土的厚度较早、中更新世的为薄,位于六盘山以西的渭河上游和祖厉河上游以及六盘山以东的泾河上游,厚度为 30 ~ 50m,其他地区只有 10 ~ 20m。中更新世黄土和早更新世黄土在陕西泾河和洛河流域厚度可达 175m,到延安、靖边一带,厚 100 ~ 125m,山西南部也近百米,其他地区只有数十米。中更新世黄土厚度最大,它构成了黄土高原的骨架(刘东生等,1964)。

黄土的化学成分以 SiO_2 为主,占 60% ~ 72%,其次是 Al_2O_3 、 CaO 。黄土中可溶性盐含量高,碳酸盐含量一般为 7% ~ 13%,容易遭受溶蚀而形成陷穴,对黄土地貌发育有重要的影响。黄土的矿物成分主要为石英、长石、方解石和黏土矿物。黏土矿物以伊利石为主,含有少量蒙脱石、高岭土。黄土的颗粒成分以粉沙为主,在黄土中粉沙(粒径 0.05 ~ 0.005mm)含量占 40%。黄土中普遍含有沙粒,但以极细沙(0.1 ~ 0.05mm)居多,细沙含量很少,一般颗粒均 $< 0.25\text{mm}$ 。黏土含量一般为 20%。马兰黄土的结构为支架—大孔结构和镶嵌—微孔结构;离石黄土的结构为支架—大孔半胶结结构和镶嵌—微孔半胶结结构;午城黄土的结构为絮凝胶结结构和凝块胶结结构。黄土的垂直节理发育,具有湿陷性,遇水浸泡容易崩解(唐克丽,1991)。

作为一种风成堆积物,黄土的粒度分布表现出明显的地域分异规律,并与风成沙的分布有密切联系。黄土的物质来源于中亚沙漠地区,在风力作用下由西北向东南搬运,随着风力的减弱而发生沉积分选现象,因而黄土分布于沙漠地区的东南侧,其粒度由西北向东

南变细（图 1-1）（刘东生等，1964）。按照图中显示的黄土中值粒径（ D_{50} ）等值线，可以将黄土分为 3 种类型： $D_{50} > 0.035\text{mm}$ ，为沙黄土； $0.015\text{mm} < D_{50} < 0.035\text{mm}$ ，为黄土（又称为典型黄土）； $D_{50} < 0.015\text{mm}$ ，为黏黄土。据此，可依据图中的 D_{50} 等值线将黄土高原的黄土分为上黄土带、典型黄土带和黏黄土带，而风沙带则位于沙黄土带的西北侧。黄土粒度的上述地域分异，对于侵蚀产沙过程和河流泥沙有十分深远的影响。图 1-2 绘出黄土高原 6 条代表性河流的悬沙粒度分配曲线。可以看到，从左到右分别为黄甫川、窟野河、佳芦河、无定河、延水、渭河，按照这一顺序，悬沙粒径逐渐变细，而这一顺序在空间上也是从北向南的顺序，与黄土粒径变细的方向正好吻合。

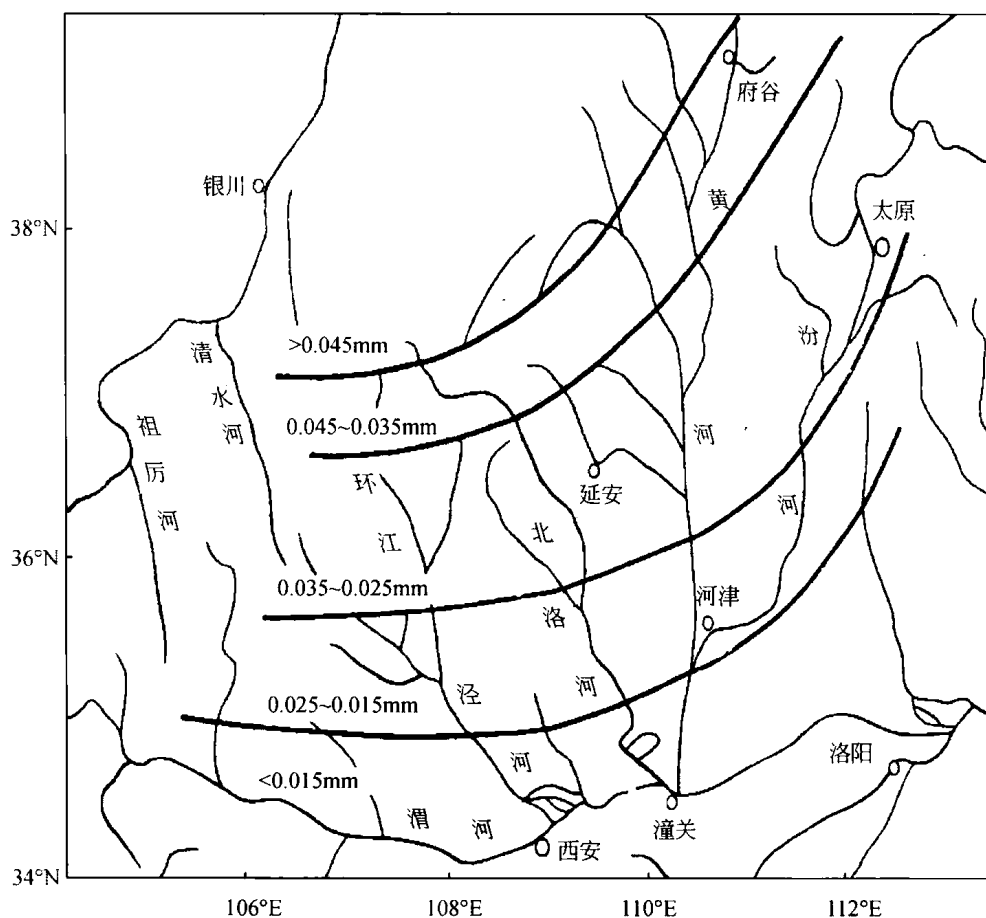


图 1-1 黄河中游新黄土（马兰黄土）中值粒径分布（刘东生等，1964）

（四）黄土以外的土状堆积物

黄土以外的土状堆积物主要为黄土下伏地层，形成于古近纪—新近纪，因黄土遭受侵蚀、切割而出露，多见于冲沟沟壁。主要包括古近系—新近系甘肃系红层和古近系—新近系三趾马红土，分别分布于六盘山以西和以东地区。甘肃系红层是一套由砂砾、粉砂及红黏土组成的土状半胶结沉积物，抗蚀性很差。三趾马红土多为黄土的下伏地层，呈红色或紫红色，含有丰富的钙质结核，常出露于沟壁，稳定坡度小于 40° ，土体结构松散，其表

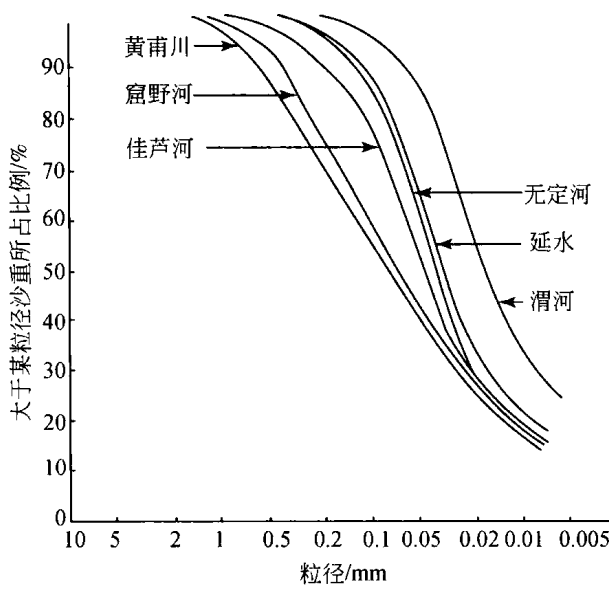


图 1-2 黄土高原 6 条代表性河流的悬沙粒度分配曲线（赵文林，1996）

层因干湿、冷热交替影响而发生膨胀与收缩的交替，产生强烈的风化剥蚀作用，导致了活跃的泻溜侵蚀。三趾马红土黏粒含量高，不易透水，常常形成与上覆黄土层之间的不透水层，形成滑动层，使得滑坡、滑塌等重力侵蚀现象很容易发生（唐克丽，1991）。

（五）河湖相沉积物

黄河流域中存在着 3 个宏观尺度上的沉积带，即宁夏 - 内蒙古平原、汾渭地堑、黄河下游平原。这 3 个沉积带均为地壳拗陷带，形成了厚度很大的第四系沉积物。3 个沉积汇在地貌上表现为冲积平原、河漫滩和河床，地面组成物质为中沙、细沙、粉沙和黏土等冲积物，同时还广泛分布着粉沙、黏土等湖相沉积物。

第二节 河流地貌特征

一、河流地貌概况

黄河是我国第二大河，长度为 5464km，流域面积为 752 443km²（图 1-3）。黄河流域地势西高东低，在大地构造的控制下，形成了三大地貌阶梯。大致在兰州以西为青藏高原，海拔 3500m 以上，主要为中生代褶皱带，并有大面积的三叠纪海相地层，是古近纪—新近纪以来上升的高原，为黄河第一阶梯。其北面为昆仑山脉，南面为巴颜喀拉山脉，与长江水系分野。在兰州以东至孟津，黄河位于秦岭和阴山两大东西走向的褶皱带之间，主要表现为中生代以来形成的断块山地和黄土台地，海拔 1000 ~ 3500m，为黄河第二阶梯。孟津以东为广阔的华北大平原，海拔 1000m 以下，主要表现为中生代以来沉降的拗陷盆地，形成地势低平的冲积平原，并分布有大面积的第四纪河湖相和海相地层，是古近纪—