

“十二五”国家重点图书出版规划项目

典型生态脆弱区退化生态系统恢复技术与模式丛书

黄土丘陵沟壑区生态 综合整治技术与模式

于洪波 陈利顶 蔡国军 等 著



科学出版社

“十二五”国家重点图书出版规划项目

典型生态脆弱区退化生态系统恢复技术与模式丛书

黄土丘陵沟壑区生态 综合整治技术与模式

于洪波 陈利顶 蔡国军 等 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书以黄土丘陵沟壑区小流域为研究对象,从流域的整体性出发,遵循统一规划、综合治理、综合开发的基本原则,通过空间结构优化配置,充分利用小流域的土地资源,促进小流域农林牧各业的协调发展,做到植物措施、工程措施与保土耕作措施相结合。在试验示范研究基础上,系统论述了适生乔灌木物种筛选与评价、土壤水分动态、植被恢复的水土保持效益、植被恢复的空间结构配置、流域土地利用结构优化、产业结构调整与水土保持综合防治的理论基础与方法。在此基础上,提出了黄土丘陵沟壑区坡面乔灌草空间配置模式、农林复合经营模式及流域水土流失综合治理技术和空间配置模式。

本书可为从事水土保持、生态恢复与重建等方面工作的科技人员提供参考。

图书在版编目(CIP)数据

黄土丘陵沟壑区生态综合整治技术与模式 / 于洪波, 陈利顶, 蔡国军等著. —北京: 科学出版社, 2011

(典型生态脆弱区退化生态系统恢复技术与模式丛书)

“十二五”国家重点图书出版规划项目

ISBN 978-7-03-031264-8

I: 黄… II. ①于… ②陈… ③蔡… III. 黄土高原—丘陵地—沟壑—生态环境—综合治理—研究 IV. X171.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 101163 号

责任编辑: 李 敏 张 菊 张 震 / 责任校对: 钟 洋

责任印制: 钱玉芬 / 封面设计: 王 浩

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>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011 年 7 月第 一 版 开本: 787 × 1092 1/16

2011 年 7 月第一次印刷 印张: 24 1/2 插页: 2

印数: 1—1 000 字数: 580 000

定价: 88.00 元

如有印装质量问题, 我社负责调换

《典型生态脆弱区退化生态系统恢复技术与模式丛书》

编 委 会

主 编 傅伯杰 欧阳志云

副 主 编 蔡运龙 王 磊 李秀彬

委 员 (以姓氏笔画为序)

于洪波 王开运 王顺兵 方江平

吕昌河 刘刚才 刘国华 刘晓冰

李生宝 吴 宁 张 健 张书军

张巧显 陆兆华 陈亚宁 金昌杰

郑 华 赵同谦 赵新全 高吉喜

蒋忠诚 谢世友 熊康宁

《黄土丘陵沟壑区生态综合整治技术与模式》

撰写成员

主 笔 于洪波 陈利顶 蔡国军

成 员 (以姓氏笔画为序)

卫 伟	于洪波	王子婷	刘国华	巩 杰
吴东平	吴祥林	邹天福	陈利顶	陈 瑾
周映梅	苗 鸿	莫保儒	柴春山	黄亦龙
黄志霖	戚登臣	彭鸿嘉	蔡国军	魏 强

总 序

我国是世界上生态环境比较脆弱的国家之一，由于气候、地貌等地理条件的影响，形成了西北干旱荒漠区、青藏高原高寒区、黄土高原区、西南岩溶区、西南山地区、西南干热河谷区、北方农牧交错区等不同类型的生态脆弱区。在长期高强度的人类活动影响下，这些区域的生态系统破坏和退化十分严重，导致水土流失、草地沙化、石漠化、泥石流等一系列生态问题，人与自然的矛盾非常突出，许多地区形成了生态退化与经济贫困化的恶性循环，严重制约了区域经济和社会发展，威胁国家生态安全与社会和谐发展。因此，在对我国生态脆弱区基本特征以及生态系统退化机理进行研究的基础上，系统研发生态脆弱区退化生态系统恢复与重建及生态综合治理技术和模式，不仅是我国目前正在实施的天然林保护、退耕还林还草、退牧还草、京津风沙源治理、三江源区综合整治以及石漠化地区综合整治等重大生态工程的需要，更是保障我国广大生态脆弱地区社会经济发展和全国生态安全的迫切需要。

面向国家重大战略需求，科学技术部自“十五”以来组织有关科研单位和高校科研人员，开展了我国典型生态脆弱区退化生态系统恢复重建及生态综合治理研究，开发了生态脆弱区退化生态系统恢复重建与生态综合治理的关键技术和模式，筛选集成了典型退化生态系统类型综合整治技术体系和生态系统可持续管理方法，建立了我国生态脆弱区退化生态系统综合整治的技术应用和推广机制，旨在为促进区域经济与生态环境保护的协调发展、提高退化生态系统综合整治成效、推进退化生态系统的恢复和生态脆弱区的生态综合治理提供系统的技术支撑和科学基础。

在过去 10 年中，参与项目的科研人员针对我国青藏高寒区、西南岩溶地区、黄土高原区、干旱荒漠区、干热河谷区、西南山地区、北方沙化草地区、典型海岸带区等生态脆弱区退化生态系统恢复和生态综合治理的关键技术、整治模式与产业化机制，开展试验示范，重点开展了以下三个方面的研究。

一是退化生态系统恢复的关键技术与示范。重点针对我国典型生态脆弱区的退化生态系统，开展退化生态系统恢复重建的关键技术研究。主要包括：耐寒/耐高温、耐旱、耐

盐、耐瘠薄植物资源调查、引进、评价、培育和改良技术,极端环境条件下植被恢复关键技术,低效人工林改造技术、外来入侵物种防治技术、虫鼠害及毒杂草生物防治技术,多层次立体植被种植技术和林农果木等多形式配置经营模式、坡地农林复合经营技术,以及受损生态系统的自然修复和人工加速恢复技术。

二是典型生态脆弱区的生态综合治理集成技术与示范。在广泛收集现有生态综合治理技术、进行筛选评价的基础上,针对不同生态脆弱区退化生态系统特征和恢复重建目标以及存在的区域生态问题,研究典型脆弱区的生态综合治理技术集成与模式,并开展试验示范。主要包括:黄土高原地区水土流失防治集成技术,干旱半干旱地区沙漠化防治集成技术,石漠化综合治理集成技术,东北盐碱地综合改良技术,内陆河流域水资源调控机制和水资源高效综合利用技术等。

三是生态脆弱区生态系统管理模式与示范。生态环境脆弱、经济社会发展落后、管理方法不合理是造成我国生态脆弱区生态系统退化的根本原因,生态系统管理方法不当已经或正在导致脆弱生态系统的持续退化。根据生态系统演化规律,结合不同地区社会发展特点,开展了生态脆弱区典型生态系统综合管理模式研究与示范。主要包括:高寒草地和典型草原可持续管理模式,可持续农—林—牧系统调控模式,新农村建设与农村生态环境管理模式,生态重建与扶贫式开发模式,全民参与退化生态系统综合整治模式,生态移民与生态环境保护模式。

围绕上述研究目标与内容,在“十五”和“十一五”期间,典型生态脆弱区的生态综合治理和退化生态系统恢复重建研究项目分别设置了 11 个和 15 个研究课题,项目研究单位 81 个,参加研究人员 463 人。经过科研人员 10 年的努力,项目取得了一系列原创性成果:开发了一系列关键技术、技术体系和模式;揭示了我国生态脆弱区的空间格局与形成机制,完成了全国生态脆弱区区划,分析了不同生态脆弱区面临的生态环境问题,提出了生态恢复的目标与策略;评价了具有应用潜力的植物物种 500 多种,开发关键技术数百项,集成了生态恢复技术体系 100 多项,试验和示范了生态恢复模式近百个,建立了 39 个典型退化生态系统恢复与综合整治试验示范区。同时,通过本项目的实施,培养和锻炼了一大批生态环境治理的科技人员,建立了一批生态恢复研究试验示范基地。

为了系统总结项目研究成果,服务于国家与地方生态恢复技术需求,项目专家组组织编撰了《典型生态脆弱区退化生态系统恢复技术与模式丛书》。本丛书共 16 卷,包括《中国生态脆弱特征及生态恢复对策》、《中国生态区划研究》、《三江源区退化草地生态系统恢复与可持续管理》、《中国半干旱草原的恢复治理与可持续利用》、《半干旱黄土丘陵区退化生态系统恢复技术与模式》、《黄土丘陵沟壑区生态综合整治技术与模式》、《贵州喀斯特高原山区土地变化研究》、《喀斯特高原石漠化综合治理模式与技术集成》、《广西

岩溶山区石漠化及其综合治理研究》、《重庆岩溶环境与石漠化综合治理研究》、《西南山地退化生态系统评估与恢复重建技术》、《干热河谷退化生态系统典型恢复模式的生态响应与评价》、《基于生态承载力的空间决策支持系统开发与应用：上海市崇明岛案例》、《黄河三角洲退化湿地生态恢复——理论、方法与实践》、《青藏高原土地退化整治技术与模式》、《世界自然遗产地——九寨与黄龙的生态环境与可持续发展》。内容涵盖了我国三江源地区、黄土高原区、青藏高寒区、西南岩溶石漠化区、内蒙古退化草原区、黄河河口退化湿地等典型生态脆弱区退化生态系统的特征、变化趋势、生态恢复目标、关键技术和模式。我们希望通过本丛书的出版全面反映我国在退化生态系统恢复与重建及生态综合治理技术和模式方面的最新成果与进展。

典型生态脆弱区的生态综合治理和典型脆弱区退化生态系统恢复重建研究得到“十五”和“十一五”国家科技支撑计划重点项目的支持。科学技术部中国21世纪议程管理中心负责项目的组织和管理，对本项目的顺利执行和一系列创新成果的取得发挥了重要作用。在项目组织和执行过程中，中国科学院资源环境科学与技术局、青海、新疆、宁夏、甘肃、四川、广西、贵州、云南、上海、重庆、山东、内蒙古、黑龙江、西藏等省、自治区和直辖市科技厅做了大量卓有成效的协调工作。在本丛书出版之际，一并表示衷心的感谢。

科学出版社李敏、张菊编辑在本丛书的组织、编辑等方面做了大量工作，对本丛书的顺利出版发挥了关键作用，借此表示衷心的感谢。

由于本丛书涉及范围广、专业技术领域多，难免存在问题和错误，希望读者不吝指教，以共同促进我国的生态恢复与科技创新。

丛书编委会

2011年5月

目 录

总序

第1章 绪论	1
1.1 甘肃黄土高原自然概况	1
1.2 定西地区自然环境因子评价与分析	13
1.3 黄土高原生态修复与环境治理的历史实践	19
第2章 植被恢复与水土流失治理	25
2.1 植被恢复与水资源利用	25
2.2 植被恢复与生态需水	35
2.3 植被恢复的生态环境效应	38
第3章 土壤水分动态与水平衡	49
3.1 坡面土壤水分动态	49
3.2 沟道土壤水分平衡	62
3.3 土地利用与土壤水循环	69
3.4 土地利用与土壤水平衡	88
第4章 土地利用/覆被变化对生态环境的影响	98
4.1 土地利用/土地覆被对水土流失的影响	98
4.2 土地利用/土地覆被对土壤质量的影响	122
4.3 土地利用/土地覆被对水资源平衡的影响	135
第5章 适生乔灌木筛选与评价	160
5.1 乡土树种的种类与生理特征	160
5.2 引种的基本原则和程序	162
5.3 抗旱生理特征评价	164
5.4 主要适生物种选择与评价	168
第6章 黄土丘陵沟壑区坡面乔灌草空间配置技术与模式	232
6.1 现有坡面乔灌草空间配置模式评价	232
6.2 坡面乔灌草空间配置技术体系	238
6.3 乔灌草空间配置模式生态经济效益分析	242
第7章 黄土丘陵沟壑区农林复合经营技术与模式	259
7.1 农林复合经营的现状和特点	259
7.2 现有农林复合经营模式分类	263
7.3 农林复合经营模式优化设计	267

7.4	农林复合经营模式的经济效益分析	270
7.5	农林复合生态系统的物质和能量流分析	279
7.6	农林复合系统经营技术	316
第8章	水土流失治理模式空间适宜性分析	330
8.1	影响水土流失综合治理的自然因素	330
8.2	影响水土流失综合治理的社会经济因素	333
8.3	定西地区生态适宜性评价	335
8.4	植被恢复及生态空间适宜性评价	343
第9章	黄土丘陵沟壑区流域综合治理模式和方略	350
9.1	流域水土流失综合治理的基本方略	350
9.2	流域生态系统空间配置格局	354
9.3	生态经济效益评价指标体系	356
9.4	流域水土流失治理模式与评价	361
9.5	流域水土流失综合治理模式推广的技术路线	369
参考文献		373

第1章 绪 论

1.1 甘肃黄土高原自然概况

1.1.1 地理位置

甘肃黄土高原位于我国黄土高原西部，东起陕甘省界，西止甘青省界，北由乌鞘岭向东与甘宁省（自治区）界相连，南以积石山、西秦岭分水岭为界。其地理坐标为东经 $102^{\circ}36'$ ~ $108^{\circ}42'$ 、北纬 $34^{\circ}08'$ ~ $37^{\circ}37'$ ，总土地面积 11.3 万 km^2 ，占甘肃全省总面积的22%。在行政区划上包括庆阳、平凉、定西、兰州、白银、临夏等市（州）的全部，天水的武山、甘谷、秦安、清水、张家川5县的全部及秦城区、麦积区的秦岭以北部分，武威市的天祝、古浪两县的乌鞘岭以南至毛毛山以东地区。

1.1.2 自然地理概况

甘肃黄土高原处于我国东部湿润区向西北干旱区过渡的地带，同时又与青藏高原高寒区交汇，气候、土壤等既随纬度变化而呈水平地带性分布，又受到山系分布的深刻影响，随中、高山地海拔的差异而表现出垂直带谱的变化。

1.1.2.1 地貌

甘肃黄土高原在构造上属鄂尔多斯地台、祁连山褶皱系与西秦岭褶皱系的交接地段，中、新生代陷落为内陆盆地，沉积了厚逾千米的甘肃系红层，经喜马拉雅造山运动而隆起。第四纪中晚期，风成黄土堆积于红层之上。第三纪喜马拉雅期造山运动中隆起的接近南北走向的陇山（六盘山），把高原分为陇东黄土高原与陇中黄土高原（又称陇西黄土高原）两部分，并形成了明显不同的地貌，对气候、水文、土壤、植被均有深刻影响。

位于六盘山（陇山）以东的陇东黄土高原，地势大致由东、北、西三面向中南部缓慢倾斜，呈向南开口的簸箕状盆地。黄土沉积深厚，多在几十米至百米以上，绝大部分地区海拔为 $1000 \sim 1700$ m，主要河流为泾河及其支流马莲河、蒲河等。该区有以下4个地貌单元。

1) 东部子午岭黄土丘陵区。该区为子午岭西坡，主要地貌为黄土丘陵沟壑，其西部分布有残塬沟壑。沟道分布较密，多为小川道。海拔为 $1117 \sim 1756$ m，相对高差 200 m左右。该区为次生林区。

2) 南部泾河中游高原沟壑区。该区因泾河水系的长期侵蚀,形成黄土塬、梁、峁与川、滩、沟壑等多级阶状地貌,黄土塬保存比较完整。该区为重要的农业耕作区。

3) 北部泾河支流上游残塬与丘陵沟壑区。该区主要地形为残塬丘陵与山地丘陵、掌地和峁峁。残塬主要分布在环江两侧,数量较多,但面积较小。山地丘陵分布于东北部,西北部主要由长梁和梁间平坦宽阔的掌地等组成,掌地是该区的主要农业用地。

4) 陇山(六盘山)中山区。陇山为石质山区。甘肃境内的陇山南延余脉,海拔多在2600 m左右,其东侧的太统山、崆峒山海拔为2200 m左右。山区普遍有次生林分布,基本属于森林景观。

位于陇山以西的陇中黄土高原,地势西南高、东北低,呈北开口的菱形盆地,黄土分布的高度与厚度超过陇东黄土高原,一般厚200 m左右,局部超过300 m,兰州九州台厚达330 m,黄河南岸晏家坪后缘西津村四级河谷阶地,黄土厚达413 m。该区是我国黄土高原最西部分,如老虎山、哈思山、屈吴山、马啣山等,被红层与黄土分割包围,犹如“黄土海”上的“岩石岛”。南部的西秦岭、太子山等为石质山地。河流有黄河及其支流渭河、洮河、祖厉河、大通河等。该区大致有以下3个地貌单元。

1) 陇中中部、南部黄土梁状丘陵沟壑区。该区为陇中主要地貌单元,而华家岭又将其分成南北两部分。该区梁岭起伏连绵,沟壑纵横交错。渭河谷地横贯该区南部。全区海拔大多为1200~2000 m,相对高差可达600 m。该区西南部海拔较高,河谷海拔多在1900 m以上。

2) 黄河中游黄土梁峁与河谷盆地地区。黄河由西南至东北横贯该区,受其干流及支流的影响,地形主要为半山梁峁和河谷相间分布,河流地形较为突出,形成峡谷、盆地相间的葫芦状地貌。较大的冲积盆地有兰州、靖远盆地,是重要的农业和工业区。

3) 陇中北部黄土丘陵与丘间盆地地区。该区为祁连山东延余脉与黄土丘陵穿插地貌,主要为低矮的黄土梁峁状丘陵、河谷、丘间盆地及滩地,较大的丘间盆地有秦王川、景泰川等,地势平坦,而山地多为荒漠景观。

1.1.2.2 气候

甘肃黄土高原属温带季风气候,具有明显的向大陆性气候过渡的特征。各气候要素呈现从东南向西北递减或递增的规律性变化,同时兼有垂直带气候变化的特点。由于南有东西走向的秦岭山脉、中有南北走向的六盘山山系,对夏季风的北上和西移,冬季风的南下均有明显的屏障作用,并由此引起陇东和陇中在气候上的明显差异,使陇东水、热条件优于陇中。

(1) 光照

该区日照充足,太阳年总辐射 $460.5 \sim 586.2 \text{ kJ/cm}^2$, $\geq 0^\circ\text{C}$ 期间的有效生理辐射 $188.4 \sim 221.9 \text{ kJ/cm}^2$,年日照时数1600~2700 h,作物生长期日照时数1300~2100 h,日照分布特征由东南向西北递增,高山林区日照时数偏少,但均能充分满足林木生长发育的需要。

(2) 温度

受高原地形的影响,该区年平均气温大多在 $4.0 \sim 11.0^\circ\text{C}$,随海拔升高而降低,递减

率为每百米下降 $0.4 \sim 0.6^{\circ}\text{C}$ ，海拔 1600 m 以下的地方年平均气温在 8.0°C 以上，海拔 2500 m 以上的地方年平均气温在 4.0°C 以下， $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 活动积温为 $1300 \sim 3000^{\circ}\text{C}$ ，分布特征由河谷、川道地区向中、高山高海拔地区递减，垂直递减率每百米下降 $120 \sim 170^{\circ}\text{C}$ ，一般递减率干旱区比半干旱区、半湿润区大，阳坡比阴坡大。大部分地区年 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 活动积温在 3000°C 以下，仅部分河谷地带如泾河、渭河、黄河河谷地带可达 $3200 \sim 3400^{\circ}\text{C}$ 。从纬度上看，该区应属暖温带，但由于地面海拔高，大部分地区实际上为中温带，地形破坏了等温线的纬向分布规律。

(3) 降水

该区年降水量为 $184.0 \sim 637.0\text{ mm}$ （南部局部山地可达 900 mm ），变动幅度较大，其空间分布的变化规律为由东南向西北递减，沿河谷、川道向山地随海拔升高而递增。年均相对湿度为 $46\% \sim 71\%$ ，其变化规律与年降水量的变化规律基本一致，而干燥度则是由东南向西北递增，变动为 $0.7 \sim 3.0$ 。

根据以上地带性气候变化规律，可将全区由南向北、由东向西划分为半湿润、半干旱和干旱三个气候分区。

该区气候有如下特点。

1) 大部分地区气候干燥，旱灾出现频率较高（表 1-1）。特别是陇中，由于特殊地形条件的影响，形成了一条较我国北方其他同纬度地区如晋北、陕北、祁连山东段更为严重的干旱少雨带。

表 1-1 甘肃中部各地不同时期干旱出现频率

（单位：%）

干旱类型	靖远	兰州	定西	通渭	静宁	天水	环县	西峰	灵台	崇信
春旱	52	50	48	57	43	21	63	16	41	38
春末夏初旱	67	70	52	52	48	36	38	42	27	56
伏旱	50	43	42	35	48	64	58	37	41	14

2) 降水变率大，有效利用率低。该区降水在时间分布上有两个特点：一是年内降水分布不均，冬季降水量很少，仅占年降水量的 $1\% \sim 3\%$ ，而 $7 \sim 9$ 月降水量占到 $51\% \sim 68\%$ ；二是年际降水变率大，历年最大降水量为最小降水量的 $2.1 \sim 3.7$ 倍（即降水变化商为 $2.1 \sim 3.7$ ）。该区降水过程也有两个特点：一是小雨多，累计降水量不少，但很快被蒸发，成为无效降水；二是历时短强度大的暴雨频率虽小，但所占降水量比例较大（如庆阳单日最大降水量达 190 mm ，占当年降水量的 34.5% ；华池 143.5 mm ，占 28.6% ；临洮 143.8 mm ，占 25.4% ；兰州 96.6 mm ，占 29.5% ；景泰 57.1 mm ，占 30.9% ）。这种暴雨超过黄土渗透率，在裸露地表形成径流，很快流走。由此，自然降水利用率很低。

3) 垂直气候差异显著。尤其是陇中山地，由于海拔高低悬殊（马啣山海拔 3670 m 与海拔 1100 m 左右的渭河河谷相差 2500 m ），因而热量的纬向分布不明显，主要随海拔增高而降低。河谷浅山层热量丰富、光照充足、日较差大，但干旱缺水。高山降水较多，但阴湿冷凉。

1.1.2.3 植被

该区植被主要为草原。由南向北、由东向西随气候的变化植被呈现出森林草原带、典型草原（干草原）地带和荒漠草原地带。

(1) 森林草原带

森林草原带主要分布在临夏、渭源、秦安及平凉、庆城一线以南，属暖温带落叶阔叶林向温带草原过渡地带。落叶阔叶林主要分布于湿润的梁峁阴坡和石质山地，如陇东东部的子午岭、中部的关山，陇中南部的西秦岭、太子山等。其中主要森林类型有辽东栎（*Quercus liaotungensis*）林、山杨（*Populus davidiana*）林、白桦（*Betula platyphylla*）林和油松（*Pinus tabulaeformis*）林、侧柏（*Platycladus orientalis*）林等，杜梨（*Pyrus betulaefolia*）、山杏（*Armeniaca vulgaris* var. *ansu*）、华榲（*Tilia chinensis*）、华山松（*Pinus armandii*）、栓皮栎（*Quercus variabilis*）、黄蔷薇（*Rosa hugonis*）、珍珠梅（*Amygdalus triloba*）、水栒子（*Cotoneaster multiflora*）、多花胡枝子（*Lespedeza floribunda*）、中国沙棘（*Hippophae subsp. sinensis*）、虎榛子（*Ostryopsis davidiana*）及多种绣线菊（*Spiraea* spp.）、灌木柳（*Salix* spp.）等为主要建群种。其森林类型属于原始林被破坏后演替而成的天然次生林。在干暖的梁峁阳坡、半阳坡或梁峁脊部的缓坡上，主要是中国沙棘、狼牙刺（*Sophora viciifolia*）、酸枣（*Ziziphus jujuba* var. *spinosa*）、黄蔷薇、扁核木（*Prinsepia uniflora*）、黄背草（*Themeda japonica*）、白羊草（*Bothriochloa ischcemum*）为主的灌丛草原或黄背草、本氏针茅（*Stipa bungeana*）、大油芒（*Spodiopogon sibiricus*）为主的典型草原。森林与草原多呈复合分布，在一些人为利用和干扰影响严重的地方，已呈现荒山秃岭的景观（龚得福，1998）。

(2) 典型草原（干草原）地带

典型草原地带主要分布在森林草原地带以北，兰州、环县以南。代表性植被，陇东北部黄土区以大针茅（*Stipa grandis*）、短花针茅（*S. breviflora*）、本氏针茅、白草（*Pennisetum flaccidum*）等为主的群落；陇中黄土区则以本氏针茅、百里香（*Thymus mongolicus*）及蒿类（*Artemisia* spp.）植物等为主组成的群落，残存灌木有中国沙棘、中国枸杞（*Lycium chinense*）等；华家岭、车道岭以北则以本氏针茅、短花针茅、灌木亚菊（*Ajania fruticulosa*）、阿尔泰狗娃花（*Aster altaicus*）等为主，零星分布有中国枸杞、唐古特白刺（*Nitraria tangutorum*）、红砂（*Reaumuria soongorica*）等；石质山地如马啣山、兴隆山等，由于海拔较高、气候湿润，分布有以山杨、辽东栎为主的落叶阔叶林及由青杆（*Picea wilsonii*）等组成的针叶林。灌木树种种类较多。

(3) 荒漠草原地带

荒漠草原地带分布于典型草原地带以北，古浪、景泰一条山一线以南，境内属中温带干旱性气候，植被稀疏，覆盖率在10%以下。荒漠草原地带大体以狄家台为界，其南部为半荒漠化草原，代表性植被以红砂、短花针茅、灌木亚菊、驴驴蒿（*Artemisia dalailamae*）、阿尔泰狗娃花等为主；其北部为荒漠化草原，代表性植被为红砂、珍珠猪毛菜（*Salsola passerina*）、盐爪爪（*Kalidium foliatum*）、合头草（*Sympegma regelii*）、戈壁针茅（*Stipa gobica*）、沙生针茅（*S. glareosa*）等。该区石质山地如屈吴山、哈思山等，分布有小面积天

然林,并形成一定的垂直分布带;基带为荒漠草原,其上为山地典型草原。在海拔2200 m以上分布有油松林,局部地段有山杨、白桦等为主的次生林,海拔2500 m以上则分布有青海云杉(*Picea crassifolia*)。

1.1.2.4 土壤

由于受气候、植被和复杂多变的地形地貌的综合影响,该区土壤分布也呈复杂变化。但土壤水平地带性分布和垂直分布都比较明显。由南向北地带性土壤主要有黑垆土、黄绵土、灰钙土和棕钙土等。

(1) 黑垆土

黑垆土既是古老的耕作土类,又是黄土高原一种地带性土壤,处于南部褐土和北部灰钙土之间。在陇东黄土高原,土壤侵蚀较弱,在人为培肥条件下,土体上层形成厚30~50 cm的耕作覆盖层。陇中黄土丘陵区,土壤侵蚀流失比较严重,表层不能形成耕作覆盖层,仅在丘陵缓坡保留有较为完整的剖面。腐殖质层厚0.8~2.0 m,有机质含量为1.0%~2.0%,C/N值为7~12,通体呈弱碱性至碱性反应。黑垆土有以下4个亚类:①黏黑垆土,分布在正宁、泾川、秦安、武山一线以南,为黑垆土与褐土间的过渡土壤,既具有黑垆土厚腐殖质层的特征,又具有褐土的黏化特征。②黑垆土,分布在陇东黄土高原塬面上,土体上层有厚40~50 cm近代黄土沉积与人类增施有机肥形成的覆盖层,肥力较高。有机质含量为1.0%~1.5%、全氮含量为0.03%~0.10%、全磷含量为0.15%~0.17%,但多为难溶的磷酸钙,含钾丰富。③黑麻土,分布在六盘山以西黄土丘陵上部,地势较陇东黄土塬面高700~1000 m,腐殖质层厚1 m左右,有机质含量一般在1.5%左右。④淡黑垆土,分布在环县、静宁、会宁等县北部,为黑垆土向灰钙土过渡的土壤。母质较粗,多为黄沙土,质地疏松、耕作层薄、肥力偏低。

(2) 黄绵土

黄绵土为黄土性幼年土类,在水土流失严重的黄土丘陵地区分布最广,所占面积达40%~60%,常与黑垆土交错出现,是在大面积侵蚀和局部堆积的黄土母质上,经人为耕作和土壤熟化过程共同作用下发育起来的。土壤熟化程度低,没有明显的剖面发育层次,仅有耕作层与母质之分。耕作层厚16~30 cm,有机质含量为0.6%~0.7%、全氮为0.039%~0.056%、全磷为0.125%~0.134%,pH为8.0~8.4,呈碱性反应。母质层厚70~80 cm,有机质含量小于0.5%。

(3) 灰钙土

灰钙土为草原带到荒漠带的过渡性土壤,分布在华家岭以北,永登、白银、靖远一线以南。灰钙土是由黄土母质或黄土状沉积物在弱腐殖化的共同作用下形成的。腐殖质层薄、有机质少,并与钙积层有明显的差异,而钙积层多较坚实。兰州南山丘陵坡地腐殖质层厚30~40 cm,有机质含量1.5%左右,C/N值为6.5~8.8,碳酸钙含量为14.5%,全氮量为0.07%,pH为8.7,钙积层在40 cm以下。黄河以北,腐殖质层减薄到20~30 cm,有机质含量减少到0.6%~1.2%,碳酸盐、硫酸盐含量增高。灰钙土有三个亚类:①暗灰钙土。分布在黄河以南海拔2100 m以下的山地阴坡,腐殖质层厚50~70 cm,有机质含量为1.5%左右。②灰钙土。分布于兰州、会宁、皋兰一带,腐殖质层厚40~50 cm、有机

质含量 1.0% 左右。③淡灰钙土。分布于皋兰石洞寺、永登秦王川一带, 植被上荒漠植物占优势, 腐殖质层厚 20 ~ 30 cm, 有机质含量小于 1.0%。

(4) 棕钙土

棕钙土形成于温带荒漠草原环境, 主导成土过程仍为弱腐殖化过程和强石灰聚积过程。而荒漠环境土壤的积盐过程和石膏化过程也表现得比较突出, 土壤剖面分化比较明显。腐殖质层厚 15 ~ 25 cm、有机质含量为 0.5% ~ 1.0%、C/N 值为 7 ~ 12, 棕钙土机械组成较粗, 砂粒含量 68% ~ 90%, 因而土壤质地以砂土、沙壤土为主。棕钙土有两个亚类: ①棕钙土。分布在景泰县中部、南部, 靖远、白银一带的北部。腐殖质层厚 20 ~ 25 cm, 地表无盐化现象。②淡棕钙土。分布在景泰县北部。土壤沙砾化程度高, 腐殖质层厚仅 10 ~ 20 cm, 有机质含量为 0.5% 左右。钙积层距地表为 10 ~ 15 cm, 硫酸盐层位升高, 地表普遍累积白色盐霜。

(5) 灰褐土

在垂直带谱中灰褐土也是该区的一个重要土类。灰褐土是半干旱、干旱地区山地森林及山地灌丛下发育的土壤。成土母质为伟晶花岗岩、砂岩、板岩风化的堆积残积物, 平缓的坡地有黄土状沉积物, 是在中性和微碱性森林灌丛环境下由腐殖质累积过程、弱黏化过程、石灰淋溶和淀积过程共同作用下形成的, 剖面分化明显。林地下腐殖质层有机质含量高达 5.5% ~ 7.5%、全氮量为 0.22% ~ 0.38%, C/N 值为 10 ~ 13。灰褐土有 4 个亚类: ①淋溶山地灰褐土; ②山地灰褐土; ③碳酸盐灰褐土; ④草甸山地灰褐土。

此外, 该区分布的较为重要的土类还有栗钙土。

我国地学界明确肯定了黄土的风成性质, 即在冰期干燥寒冷气候条件下、在荒漠和草原环境下, 由强大的发源于西伯利亚的冬季风, 从沙漠中带出以粉砂为主的土状堆积物堆积而成。其土壤质地有明显的地带性。例如, 在黄土高原西北边沿沉积颗粒较粗的“沙黄土”, 其中粗粉砂占 30% 以上, 黄土中富含碳酸钙和硫酸钙。由此往南大部分地区为典型黄土带, 黄土颗粒变细, 粗粉砂降到 30% 以下, 黏粒增多, 无硫酸钙聚集而多碳酸钙。黄土高原东南部(陕西关中平原南部)则为“黏黄土”分布区。据此, 按黄土高原由北向南顺序可划分为沙壤带、轻壤带、中壤带和重壤带。甘肃黄土高原兰州、环县一线以北属轻壤带, 定西、庆阳一带以北属中壤 I 带 (<0.01 mm 的颗粒小于 40%), 陇西、通渭、秦安、天水、泾川、宁县一带属中壤 II 带 (<0.01 mm 的颗粒大于 40%)。但黄土高原的土壤质地颗粒组成上又有明显的一致性, 表现在: ①整个黄土高原属壤质土类型, 轻-中壤质土占全部面积的 90%; ②粉粒 (0.001 ~ 0.05 mm) 含量高, 大部分土壤占 60% ~ 75%, 并且在广大面积上变幅小, 其中 0.01 ~ 0.05 mm 粉粒占 50% 左右; ③除南部塬土(陕西境内)有下伏黏化层外, 该区内土壤剖面质地没有明显差异。

此外, 该区由于受降水制约, 土壤大多水分不足, 常呈干旱状态。在年降水量为 300 ~ 400 mm 的地方, 降水年渗深多为 120 ~ 250 cm, 很少超过蒸发蒸腾作用层, 导致土壤水分渗入层(活动层)之下形成一个永久干层。土壤有机质含量低, 致使基础肥力差, 土壤结构性差。地力瘠薄又限制了土壤保水供水能力。黄土母质富含碳酸钙, 且淀积在不深处形成钙积层, 这是草原土壤特征之一, 也是影响植物生长的障碍性因素(高世铭, 2003)。

1.1.3 立地分区

根据甘肃地貌、气候、土壤和植被等方面的研究结果,兼顾地块的完整性,可将甘肃黄土高原划分为3条森林植物地带、7个类型区(李嘉珏,1990)。森林植物地带采用四级命名法,即“热量带+干湿状况+地带性土壤+地带性植被”。类型区采用“地理位置+地貌类型”命名法(邹年根和罗伟祥,1997),具体分区如下。

1.1.3.1 中温带半湿润区黑垆土、黄绵土森林草原地带(I)

该区简称半湿润地区,其范围包括陕甘南部边界、北秦岭、太子山一线以北,华池县城南、镇原孟坝、华家岭、临洮辛甸、东乡县城一线以南。由东向西根据3种主要地貌类型将该地带分为3个类型区。

(1) I-1 陇东南部黄土高原沟壑类型区

该区位于东经 $106^{\circ}50'$ ~ $108^{\circ}42'$ 、北纬 $34^{\circ}53'$ ~ $36^{\circ}25'$,包括正宁、宁县、合水、灵台、崇信、华亭等县的全部及华池、庆城、镇原、崆峒等县(区)的大部分,面积 2.13 万 km^2 。该区年平均气温为 $8\sim 12^{\circ}\text{C}$,1月平均气温为 $-7.1\sim -4.0^{\circ}\text{C}$,极端最低气温 $-25.4\sim -19.7^{\circ}\text{C}$, $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 活动积温 $2700\sim 3330^{\circ}\text{C}$,无霜期 $160\sim 190$ d,年均降水量 $500\sim 700$ mm,年均蒸发量 $1386\sim 1592$ mm,年相对湿度 $62\%\sim 70\%$,干燥度 $0.95\sim 1.50$ 。

该区东部为子午岭山地,西南部关山等为石质山地,中部塬区为该区主要地貌类型。较大的塬有董志塬、早胜塬、宫河塬、荔堡塬、高平塬、什字塬等。董志塬为甘肃最大的黄土塬,面积约 910 km^2 ,塬面地势平坦,坡度一般为 $0^{\circ}\sim 6^{\circ}$,海拔为 $1100\sim 1300$ m。各塬区边缘为残塬沟壑地貌类型,沟壑切割较深,相对高差为 $150\sim 250$ m,沟壑密度为 $2\sim 3$ km/km^2 。泾河河谷有多级阶地,海拔为 $1000\sim 1200$ m,主要河流为泾河及其支流马莲河、蒲河、汭河、黑河等。年侵蚀模数为 $2\ 000\sim 10\ 000$ t/km^2 。土壤以黑垆土为主,分布于塬面和川台地;其次为黄绵土,分布于梁峁、侵蚀坡地;部分川道河滩有潮土,地势较低的河滩有草甸土,侵蚀严重的沟壑底部有红土裸露。该区天然林主要分布于子午岭、关山一带。子午岭森林断续地分布在温湿的梁峁阴坡、半阴坡,干暖的梁峁阳坡、半阳坡,干旱风大的梁峁顶部则为草原,从而组成该地山地植被垂直带的基带——森林草原带,其上为已不明显的山地森林带,大部分地段为次生灌丛或次生草甸。主要树种在阴坡、半阴坡有油松、辽东栎、山杨、白桦,阳坡、半阳坡有侧柏及散生的杜梨、山杏、春榆(*Ulmus propinqua*)等。灌木有狼牙刺、虎榛子、黄蔷薇、胡颓子(*Elaeagnus pungens*)及文冠果(*Xanthoceras sorbifolia*)等。关山森林植被有明显的垂直分布:海拔 $1400\sim 1600$ m为森林草原,阴坡为森林,主要树种为辽东栎、山杨、白桦等;阳坡为草原,分布有山桃(*Amygdalus davidiana*)、中国沙棘、狼牙刺等树种。但阴坡森林多被破坏,代之以次生灌丛,主要种类有中国沙棘、山桃、灰栒子(*Cotoneaster acutifolia*)、水栒子、山柳(*Salix characta*)、甘肃山楂(*Crataegus kansuensis*)、珍珠梅等,这些灌丛分布高度可达海拔 2600 m,并且各个坡向均有。海拔 $1600\sim 2600$ m为山地落叶阔叶林带,主要建群种有辽东栎、山杨、白桦、红桦(*Betula albo-sinensis*)、黄花柳(*Salix caprea*)、伴生树种有华山松、鹅