

水 科 学 前 沿 学 术 丛 书

水资源综合评价模型 及其在黄河流域的应用

© 杨大文 楠田哲也 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

图书在版编目 (CIP) 数据

水资源综合评价模型及其在黄河流域的应用 / 杨大文,
(日) 楠田哲也编著. —北京: 中国水利水电出版社,
2005

(水科学前沿学术丛书)

ISBN 7-5084-2874-9

I. 水... II. ①杨...②楠... III. 黄河流域—水资源—综合评价 IV. TV213.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 040046 号

书 名	水科学前沿学术丛书 水资源综合评价模型及其在黄河流域的应用
作 者	杨大文 (日) 楠田哲也 编著
出版 发行	中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (营销中心)
经 售	全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	787mm×1092mm 16 开本 14.25 印张 338 千字
版 次	2005 年 5 月第 1 版 2005 年 5 月第 1 次印刷
印 数	0001—2000 册
定 价	38.00 元

凡购买我社图书, 如有缺页、倒页、脱页的, 本社营销中心负责调换
版权所有·侵权必究

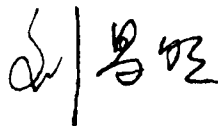
序 一

黄河是中华民族的母亲河，孕育了灿烂的华夏文明。与此同时，黄河水患也威胁着两岸人民的生命财产安全，中国几千年的历史有大量和连续的治理黄河记载。20 世纪以来，气候变化与社会经济的迅猛发展，使整个黄河流域的水资源状况发生了深刻的变化，水土流失、下游悬河、小水大灾、水质污染及水资源短缺成为黄河治理的重大问题。20 世纪 70 年代以来黄河断流的出现，更引起了世界范围的广泛关注。

黄河流域的水资源问题，可以概括为减淤、防洪、防治污染、合理调度四个主要问题。这些问题涉及产汇流与水资源转化消耗的机理、流域综合管理与水量调度、点源与非点源污染的模拟与防治、水土保持与河床演变等多学科研究。针对这些问题，有关部门开展了大量工作，黄河“973”等积累了丰富的实践经验；与此同时，国内学者也开展了大量的工作，取得了丰硕的研究成果。然而，黄河水资源问题本身的复杂性与新问题的不断出现，仍然需要开展更多的研究工作，这其中，当然也包括开展国际合作。由日本科学技术振兴机构（JST）资助的“黄河水资源利用、管理与可持续性研究”项目，集合了日本与中国的诸多科研机构与研究人员，参与到黄河水资源问题的研究中，这是国际合作研究黄河水资源问题的重要尝试。

经过中日学者的合作与努力，本书很好地反映了研究项目所取得的初步的成果，开发与引入了诸多与黄河水资源问题有关的模型并应用于黄河流域的不同区域，这些模型包括森林的水和能量均衡模型、干旱半干旱农田的水均衡模型、灌溉区水平衡模型、土壤侵蚀及泥沙输送模型、黄河流域的分布式水文模型（GBHM2）、分布式水文模型 BTOPMC、农田的水盐耦合输移模型、城市污染物负荷模型、水量水质综合模型、系统动力学模型、黄河水资源需求预测模型等。本书介绍了这些模型的原理及其在黄河流域的应用，相信这些研究成果及实践将为黄河水资源的合理开发、利用与保护提供有益的参考。

中国科学院院士



2005 年 3 月

序二

黄河，中华民族的摇篮；不仅为中国人民视为母亲河，而且在国际上也备受瞩目。20 世纪末以来，由于人类活动和气候变动的影响，黄河流域的水资源短缺和生态环境退化问题日益严重，特别是 20 世纪 90 年代发生的黄河下游断流的严重态势引起了国内外广泛关注。客观形势需要加强黄河流域水资源统一管理和调度，这在实际管理中得到体现。一些与黄河水资源管理密切相关的科学问题亟待解决或发展，例如：潜在水资源量的时空分布及其变动性，人类活动对水循环及水资源的影响，水量和水质的关系，缺水条件下的水资源利用的高效性和可持续性。

河川径流是气候、流域下垫面和人类活动和综合作用结果。气候是流域水循环的驱动力；下垫面是决定流域水文特性的关键因素；而人类活动则给流域水文循环带来了新的变化和不确定性。定量评估各种环境变化对水循环和水资源的影响是现代水资源管理的重要前提，这需要把握水文过程的机理及其在流域空间的变异特性。在人类活动十分频繁的黄河流域，需要研究人工水循环与自然水循环的耦合机理，特别是灌溉条件下水循环的变化规律。流域水资源综合管理涉及自然、工程和社会诸多方面，需要自然科学、工程科学和社会科学等跨学科的综合研究。

由日本多所大学联合开展的“黄河水资源利用、管理与可持续性研究”项目、就黄河流域的水资源及其管理问题与我国多所大学和研究所进行了合作研究，从一个侧面就上述科学问题提供了新的研究进展。本书主要反映在该项目中以日本同行为主的研究成果：介绍了田间尺度的水—沙—能量过程模型，流域尺度的分布式水文模型，水量和水质的耦合模型，以及水资源利用的宏观经济模型等。该书的出版不仅可以帮助我们从不同的视角、用不同的方法来思考我国的水资源问题；同时也可以促进我国在水文水资源研究方面国际的合作和交流。它是中日友好与科学合作的见证。在此，我谨对所有关心和支持我国水文水资源事业的日本同行表示诚挚的谢意！

清华大学水利水电工程系教授

雷志栋

2005 年 3 月

前言

流域水资源管理是全世界所面临的一个重要课题。水环境治理、水资源利用、泥沙、航运、生态景观、环境保护和娱乐休闲等都越来越多地牵扯到这个问题。在进行水资源管理时，必须通盘考虑，尽可能地满足各方面的要求。

除了在赤道附近的国家和地区通年降水量充沛外，世界其他的地方即使降水较多，一般也都存在着季节变动。不少干旱、半干旱地区需要远距离调用。因此在这些地区就有必要建设相应的蓄水和引水设施。

水和粮食生产有着密切关系。从世界范围来看，农业用水量都占到总用水量的约7成左右，因此农业用水的管理就成为水资源管理的首要课题。就整个社会而言，不仅仅是农业产量，保证农业就业也很重要。因此在保证社会稳定的前提下，根据产业对水资源进行再分配是水资源管理的核心。

水的使用方式不同，用水量变化也不同。采用开放式农业的用水方式，最多能够减少水的蒸发量。城市和工业用水如果采用封闭循环式，则水质会有所降低，但水量不会减少。如果能多次重复利用的话，就可使得用水量减少。

靠近海的地方可以进行海水淡化来制造淡水。但制水成本高昂，发达国家方可承受得起。从削减地球环境负荷和化石燃料消耗来看，海水淡水制水并不是一个值得推荐的好方法。目前由于大量开采地下能源和水已造成地面沉降的严重问题，资源也面临枯竭。

水体受到污染后就不再是资源了。尽管目前污水处理技术可以去除所有污染物，但在经济可以承受的范围内，净化处理对水质的改善还是很有限的。由于污水处理和处理工艺的制约，在用水时就需要在如何减少和避免水的污染上多下工夫。

干旱半干旱地区土壤即使没有遭受明显的污染，也会由于水分蒸发而出现盐碱化灾害。虽然土壤盐碱化灾害在世界各地并不鲜见，但与农业用水方式有关，仍需不断改进。

不仅仅是我们人类，植物和动物这些和人类生存有重要关系的生物，它们的生长和繁育也离不开水。许多东西都可以用其经济价值来衡量，但在水资源管理中运用这些规律并非易事。水即使被使用了，它还是可以流动。最

起码这种流体可以用来输送泥沙。水的流态变化对生物和泥沙输送来说都是必要的，但同样流动着的水并不能说它好。

水资源管理的基本空间单位是流域。如果将农作物和产品内包含的水分以及物质利用过程也考虑在内，在水资源管理上全球也就可以视为一个整体对象。

在水资源缺乏的地方必须要明确水的最佳使用方法：怎么能够使水资源的亏缺程度尽可能降到最小，而不是如何去最大程度迎合社会要求。

黄河流域就是水资源不足的地区，同时也是社会、经济发展较为集中的地方。从中国历史来看，黄河流域的重要性无论如何都不会言过其实。该地区也是最值得在水资源管理上大力关注的地区。希望本书所提出的各种模型对黄河水资源管理能有所裨益。

在本书出版之际，谨对日本科学振兴事业团的支持表示衷心的感谢。在黄河水资源问题的研究过程中得到了中国同行的支持和协作，同时对在翻译和出版本书中倾注了大量精力的清华大学杨大文教授、项目组秘书叶佳子小姐表示深深的谢意。

日本科学振兴事业团 战略性创造推进事业
“黄河水资源利用、管理与可持续”研究课题组

2004年10月11日

本书作者

第1章

大槻恭一 日本九州岛大学农学研究院 副教授

第2章

小林哲夫 日本九州岛大学农学研究院 副教授

岩永理佐 日本九州岛大学大学院生物资源环境学府 博士生

贺文君 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所旱作节水农业
实验室 副研究员

王维真 日本九州岛大学农学研究院 博士生

第3章

渡边绍裕 日本综合地球环境研究所 教授

星川圭介 日本综合地球环境研究所 博士后研究员

第4章

桥本晴行 日本九州岛大学工学研究院 副教授

高风广树 日本九州岛大学工学研究院 博士生

池松伸也 日本九州岛大学工学研究院 博士生

金炳漣 日本长崎大学教育学部 副教授

上野贤仁 日本崇城大学工学部 副教授

方红卫 清华大学水利水电工程系 教授

王兆印 清华大学水利水电工程系 教授

第5章

杨大文 原日本东京大学土木工程系 副教授，现清华大学水利水电工
程系 教授

李 翀 原日本科学技术振兴机构博士后研究员，现中国水利水电科
学研究院副研究员

第6章

杨大文 原日本东京大学土木工程系 副教授，现清华大学水利水电工
程系 教授

李 翀 原日本科学技术振兴机构 博士后研究员，现中国水利水电科
学研究院 副研究员

第7章

- 竹内邦良 日本山梨大学 21 世纪亚洲季风地区流域综合管理研究与教育杰出中心 教授
- 石平博 日本山梨大学 21 世纪亚洲季风区流域综合管理研究与教育杰出中心 副教授
- 教天其 原日本山梨大学 21 世纪亚洲季风地区流域综合管理研究与教育杰出中心 研究员, 现四川大学水利水电工程学院水文与水资源系 教授
- 周买春 日本山梨大学 21 世纪亚洲季风区流域综合管理研究与教育杰出中心 博士后研究员
- 马龙纯 日本山梨大学 21 世纪亚洲季风区流域综合管理研究与教育杰出中心 博士后研究员
- 哈普阿拉齐齐·普拉上萨 日本山梨大学 21 世纪亚洲季风区流域综合管理研究与教育杰出中心 博士生
- 克母·安瑟尼 日本山梨大学 21 世纪亚洲季风区流域综合管理研究与教育杰出中心 博士生

第8章

- 赤江刚夫 日本风山大学环境理工学部 教授

第9章

- 楠田哲也 日本九州大学大学院工学研究院 教授
- 东 修 日本科学技术振兴机构 研究员

第10章

- 楠田哲也 日本九州大学大学院工学研究院 教授
- 东 修 日本科学技术振兴机构 研究员

第11章

- 涂宗学 原日本山梨大学医学工学综合研究部 访问学者, 现北京师范大学 教授
- 竹内邦良 日本山梨大学医学工学综合研究部 教授
- 石平博 日本山梨大学医学工学综合研究部 副教授

第12章

- 井村秀文 日本名古屋大学大学院环境学研究科 教授
- 金子慎治 日本广岛大学大学院国际协力研究科 副教授

目 录

序一	
序二	
前言	
本书作者	

第 1 篇 典型植被条件下的水循环、土壤侵蚀及输沙模型

第 1 章 森林的水收支模型	3
1.1 前言	3
1.2 黄土高原的森林结构和树种分布	4
1.3 黄土高原的气象环境与森林结构	6
1.4 森林的水循环模型	7
1.5 结语	16
参考文献	17
第 2 章 BBH 模型及其在水平衡分析中的应用	20
2.1 前言	20
2.2 BBH 模型	21
2.3 草地水分平衡分析	23
2.4 2 层 BBH 模型	26
2.5 玉米田的水分平衡解析	27
2.6 结语	28
参考文献	29
第 3 章 灌溉区水平衡模型	30
3.1 农场、灌溉地区水平衡模型的作用与条件	30
3.2 现存农田水平衡模型	33
3.3 以最近的黄河流域为对象的灌区的模型开发	42
参考文献	49
第 4 章 黄河中游高含沙水流运动模型的建立	52
4.1 前言	52
4.2 窟野河与大理河的流域特性	53
4.3 窟野河与大理河的河道淤积泥沙的特性	54
4.4 高含沙水流的阻力特性实验	54

4.5 窟野河的高含沙洪水的水流运动与阻力特性·····	59
4.6 结语·····	62
参考文献·····	63

第2篇 流域水循环模型及水资源评价

第5章 黄河流域的分布式水文模型(GBHM2)及其在水资源评价中的应用·····	67
5.1 概述·····	67
5.2 黄河流域的地理信息资源·····	68
5.3 分布式水文模型的建立·····	69
5.4 水文过程的数学描述·····	72
5.5 水文模拟及模型验证·····	74
5.6 黄河水资源在过去50年的变化分析·····	77
5.7 结语·····	83
参考文献·····	84
第6章 分布式水文模型在水资源管理中的应用·····	86
6.1 流域水资源管理中的水文学问题·····	86
6.2 灌溉及水库调节的模拟·····	87
6.3 水循环综合模拟模型的构筑·····	89
6.4 黄河流域灌溉用水量的模拟结果及分析·····	91
6.5 结语·····	94
参考文献·····	95
第7章 分布式水文模型系统YHyM在黄河流域上的应用·····	97
7.1 大流域中的水文模拟·····	97
7.2 山梨大学分布式水文模型系统:YHyM·····	98
7.3 YHyM在黄河流域上的应用·····	101
7.4 结语·····	104
参考文献·····	105

第3篇 水质模拟模型

第8章 田间的水盐循环及其模型·····	111
8.1 干旱地区灌溉农业的可持续性和盐分累积·····	111
8.2 河套灌区的概况·····	111
8.3 河套灌区的水盐动态·····	112
8.4 耕地的盐分动态变化·····	113
8.5 田间的水盐运移和计算模型·····	121
参考文献·····	123
第9章 城市污染物负荷模型——西安市污染物负荷模型及计算案例·····	125
9.1 前言·····	125

9.2 皂河流域的现场水质观测	126
9.3 建立皂河流域污染物负荷过程分析模型	126
9.4 介绍几个模型分析案例	136
9.5 导入节水型城市系统后的效果研究	138
9.6 结语	139
参考文献	139
第 10 章 渭河流域水量水质综合模型的建立及节水研究	141
10.1 前言	141
10.2 渭河流域现场水质观测	141
10.3 水量水质耦合模型的建立	142
10.4 模拟结果	156
10.5 未来需水量的预测	159
10.6 节水研究	162
10.7 结语	163
参考文献	163

第 4 篇 水资源利用模型

第 11 章 系统动力学模型在黄河流域的应用	167
11.1 前言	167
11.2 黄河流域水资源概况	168
11.3 黄河流域需水量预测模型	168
11.4 黄河流域可供水量预测	171
11.5 黄河流域水资源系统评价模型	171
11.6 黄河水资源系统动力学模型	172
11.7 黄河流域水资源系统分析	173
11.8 黄河流域水资源供需风险率分析	175
11.9 水资源系统可持续性分析	177
11.10 结语	178
参考文献	178
第 12 章 关于黄河流域开发与水资源需求的预测模型和计算实例	180
12.1 前言	180
12.2 水资源供需预测模型	182
12.3 模拟结果及总结	208
附录	211
参考文献	213

第 1 篇

典型植被条件下的水循环、 土壤侵蚀及输沙模型

第 1 章 森林的水收支模型

大槻恭一

日本九州大学农学研究院 副教授

1.1 前言

中国黄河流域水丰土肥，从公元前 5000 年开始出现农耕，是中华文明的发源地。另一方面黄河流域的居民自古以来就饱受水害。现在，“黄河中的泥沙有 90% 是来自于黄土高原的土壤侵蚀^[1]”。正如所说的那样，过度地砍伐森林和开垦土地是引起大规模水土流失的主要原因。黄土高原的水土流失面积为 45.4 万 km²，约占其总面积 64.2 万 km² 的 71%。近些年来，缺水现象愈发严重，自 1972 年以来黄河下游几乎每年都发生断流^[2]。

关于水土保持，与环境相关的法律（森林法、水土保持法、环境保护法等）中有各种各样的规定，其中森林保护与植树造林被作为重中之重广泛推广^[3,4,5]。因此，森林面积持续增加，1949 年黄土高原的森林覆盖率不超过 6.2%^[6]，现大约增至 7.2%^[7]（表 1-1）。1998 年公布了《全国生态环境建设规划》，计划将全国的森林覆盖率（树冠的郁闭度为 30% 时计算出来的值，FAO 中为 20%）由 1998 年的 16.55% 增至 2010 年的 19% 以上，到 2030 年为止增至 24% 以上，2050 年为止增至 26% 以上（表 1-2）。在 1999~2010 年的短期目标中包括：新增森林面积 3900 万 hm²，倾斜度为 25° 以上的农耕地全部转换为森林，建造“退耕还林”地 500 万 hm²。这样的森林保护，植树造林政策的实施可以有效地抑制洪水，减少水土流失，逐渐净化水源^[4]。由此，今后森林、草地的面积就能得到切实扩大，期望起到抑制水土流失的作用。

表 1-1 黄土高原森林覆盖率的变迁^[6,7]

时 代	森林覆盖率 (%)	时 代	森林覆盖率 (%)
西周 ^①	53	清朝 ^①	15
秦朝，汉朝，南北朝 ^①	40	1949 ^①	6.2
唐朝，宋朝，明朝 ^①	33	1998 ^②	7.2

① Liu and Ni^[6]。

② 程国民等^[7]。

然而，另一方森林面积的扩大，也会导致蒸散发量的增加及流量的减少^[8,9,10,11]，因而有可能造成局部地区缺水现象的频发甚至黄河断流问题的深化^[2,6]。但是有的研究认为森林面积扩大造成蒸散发量增加的同时，也会增大降水量^[12,13]，关于森林与水循环和水

资源之间的关系的争论正在持续展开。这样，就形成了关于黄土高原生态环境管理的森林蒸发量的动态理论。依据从 1960 年中国就开始进行的森林蒸散发的研究，中国的森林降水量的 40%~80% 是蒸散发^[4]。在干旱半干旱气候的黄土高原，森林水平平衡中大半为蒸散发。因此，本文在整理黄土高原的森林特征资料的同时，对以蒸散发为焦点的森林水循环模型就进行了研究。

表 1-2 中国全国森林资源调查结果与建设规划^[3]

期 间	森林面积	森林覆盖率	蓄 积	期 间	森林面积	森林覆盖率	蓄 积
	(亿 hm ²)	(%)	(亿 m ³)		(亿 hm ²)	(%)	(亿 m ³)
1948		8.6		1988~1993	1.34	13.92	101
1973~1976	1.22	12.7	87	1994~1998	1.59	16.55	113
1977~1981	1.15	12	90	1999~2010 *		19.0 以上	
1984~1988	1.25	12.98	91	2011~2030 *		24.2 以上	

* 《全国生态环境建设规划》(1998)。

1.2 黄土高原的森林结构和树种分布

尽管世界上关于气候及植被的指标多种多样，但本质上都是降水量与可能蒸散发量的比，作为气候指数评价指标的气温及放射量，也可以认为是可能蒸发量的间接表示^[14]。FAO (1974)^[15]建议采用简便的放射法和温度法来估计潜在蒸散发量。实际上，潜在蒸散发量与放射量大致呈线性相关^[16,17]，而且积温也与净放射量大致呈线性相关^[18]。

使用降水量与净放射量来表示的气候指数——放射干燥度^[19]，是一个相当有用的指标。放射干燥度是纯放射量与降水被全部蒸发所必需的潜热的比，用式 (1-1) 表示

$$RDI = R_n / lP \tag{1-1}$$

式中： R_n 为净放射量； l 为水的蒸发潜热； P 为降水量。

如图 1-1 所示，森林占优势的区域，放射干燥度的值在 0.3~1.1 之间。该值以下为冻土带，该值以上依次为草原，半沙漠，沙漠。森林依据净放射量的值分为热带雨林，常绿阔叶林，落叶阔叶林，针叶林，硬阔叶林，森林草原，草原，干性草原。

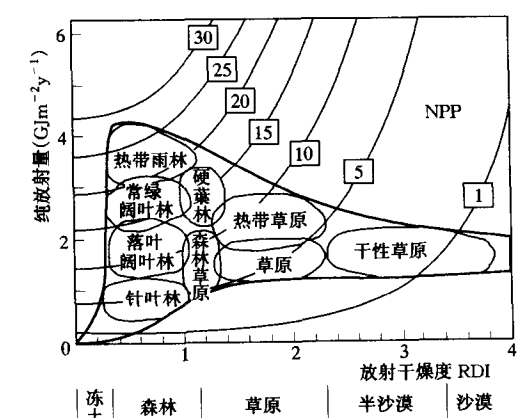


图 1-1 放射干燥度，纯放射量与植被，气候的关系^[20]

在日本，年降水量为 800~4000mm (全国平均值约为 1800mm)，年纯放射量^[21]为 1.5~3.0GJm⁻²y⁻¹，放射干燥度 1.0 以下，全国均属森林带。由于少雨区域的年降水量也约为 1000mm，植被分布不受其限制，而主要依赖于纯放射量及积温。日本一般根据称为暖度指数 WI ^[22] 的积温指标来进行植被分布的划分。

$$WI = \sum_{i=1}^{12} (T - 5) T \geq 5^{\circ}C \tag{1-2}$$

式中： T 为月平均气温，℃；暖度指数 WI 为

一年中月平均气温大于 5℃ 的各月平均气温减去 5℃ 后累加。由于气温随纬度及海拔的增高而降低，日本的森林结构随纬度及海拔的变化而变化，从温暖的亚热带雨林至寒冷的常绿针叶树林广泛分布着各种各样的森林。2002 年，日本的森林占有率为 66%，其中 53% 为天然林，41% 为人工林。

相对应的，黄土高原的年平均降水量为 200~700mm，年净放射量^[21] 为 2.0~2.5GJm⁻²，放射干燥度为 1.2~7.0，属半湿润干燥地。因此植被分布主要受降水量的影响。植被也是从森林至沙漠多种多样。中国一般用干燥度 Ka （中国科学院，1959）来进行植被区划。

$$Ka = \frac{PET}{\sum_{i=1}^{365} P_{T \geq 10^{\circ}C}} = \frac{1.6 \sum_{i=1}^{365} T_{T \geq 10^{\circ}C}}{\sum_{i=1}^{365} P_{T \geq 10^{\circ}C}} \quad (1-3)$$

式中： PET 是可能蒸发量； P 是日降水量，mm； T 是日平均气温，℃，带下标的 $T \geq 10^{\circ}C$ 是表示日平均气温 10℃ 以上的日期。另外，干燥度 Ka 与放射干燥度 RDI 呈线性关系， Ka 约为 RDI 的 50%。

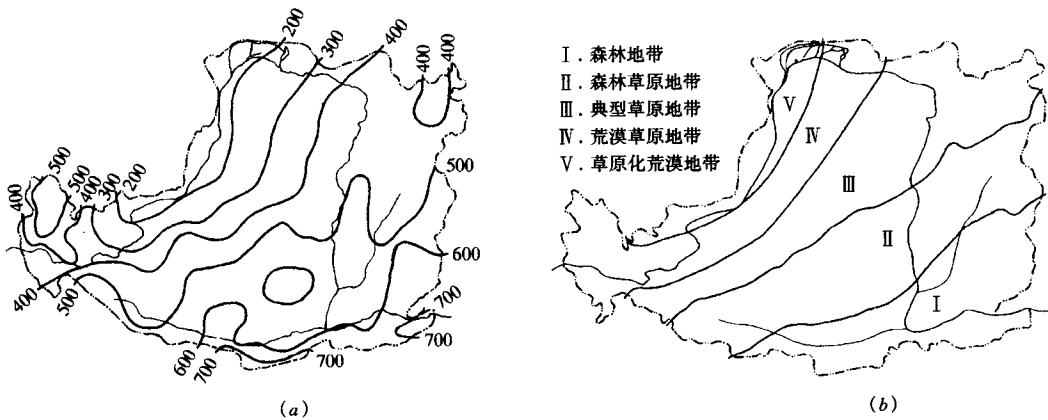


图 1-2 黄土高原的年降水量分布与植被（依据程等^[7]的图而改画）
(a) 年降水量 (mm) 分布图；(b) 植被地带

如图 1-2 所示，黄土高原的森林成东北—西南走向，以年降水量 450mm 为界，东南是森林地带，呈带状，属温带半湿润气候，标高在海拔 800~2200m，年平均降水量为 500~650mm，年平均气温为 11~14℃，干燥度为 1.3~1.5；对侧是森林草原地带，属半湿润半干燥气候，标高在海拔 1000~1600m，年平均降水量为 450~550mm，年平均气温为 8~10℃，干燥度为 1.4~1.8。

黄土高原天然林的树种有：①寒带常绿针叶树；②寒带落叶针叶树；③温带常绿针叶树；④温带落叶阔叶树^[7,23]。主要的寒带常绿针叶树为青杆 (*Picea wilsonii*)，白杆 (*Picea asperata*) 等，主要分布于高地。主要的寒带落叶针叶树为华北落叶松 (*Larix principis-rupprechtii*)，分布于海拔为 1600~2700m 的高地。主要的温带常绿针叶树为油松 (*Pinus tabulaeformis*)，侧柏 (*Platycladus orientalis*)，白皮松 (*Pinus bungeana*)，华山松 (*Pinus*

armandii), 主要的温带落叶阔叶树为山杨 (Populus davidiana), 辽东栎 (Quercus laitun-
gensis), 蒙古栎 (Quercus mongolica), 白桦 (Betula platyphylla), 红桦 (Betula albo-
sinensis), 华椴 (Tila chinansis) 等。人工林的树种主要是杨属树及原产美国的刺槐
(Robinia pseudoacacia), 特别是作为防沙林的刺槐, 被广泛地应用于造林。

黄土高原的主要灌木有沙棘 (Hippophae rhamnoides), 柠条 (Caragana korshinskii),
文冠果 (Xanthoceras sorbifolia), 二色胡枝子 (Lespedeza bicolor), 灰栒子 (Contoneaster
acutifolias), 蒙古绣线菊 (Spiraea mongolica), 虎榛子 (Ostryopsis davidiana), 扁核木
(Prinsepia aniflora), 山桃 (Prunus davidiana), 山杏 (Prunus asusu)^[7]。

如图 1-2 所示, 黄土高原的极相大致为森林及森林草原地域各半。西周时代森林覆
盖率约为 53%, 以后逐渐减少。至 1949 年减少到 6.2%, “文化大革命”期间森林破坏更
甚^[6]。至 1998 年, 黄土高原的森林覆盖率增至 7.2%, 依然比全国平均覆盖率 16.55% 低
9.35%。人均森林面积, 材积均显著低于全国平均水平 (表 1-3)。

表 1-3 世界森林资源主要指标 (1995 年)

国家 (地区)	总面积 (万 hm ²)	森林面积 (万 hm ²)	蓄 积 (亿 m ³)	森林覆盖率 (%)	森林单位面积 蓄积 (m ³ /hm ²)	人均森林面积 (hm ² /人)	人均蓄积 (m ³ /人)
俄罗斯 ^①	171000	76400	807	45.2	106	5.2	543.43
巴 西 ^①	84565	56601	651	67.0	116	3.76	425.41
加拿大 ^①	92150	24716	287	27.0	116	9.32	1093.48
美 国 ^①	91366	20957	247	23.0	118	0.84	98.54
中 国 ^①	96027	15894	113	16.6	78.06	0.128	9.048
中国黄土 高原 ^②	6420	450	—	7.2	41.6	0.055	2.7
日 本 ^①	3646	2416	29	66.0	118	0.2	22.99
世 界 ^①	1293600	345400	3837	27.0	114	0.6	72

① 芦等^[3]。

② 程国民等^[7]。

1.3 黄土高原的气象环境与森林结构

图 1-3 所示为位于森林草原地域的延安
市 1982~2003 年的降水量, 气温, 饱和差的
经年变化。平均年降水量为 514mm, 其中大
约有 79% 来自 5~9 月的降雨。雨期与蒸散发
旺盛的高温多照期的一致使得这一时期的树
木生长旺盛。但是, 从秋到春, 雨量的减少,
使植物深受早春干旱严酷环境的灾害。

图 1-4 是延安市公路山地的人工刺槐林

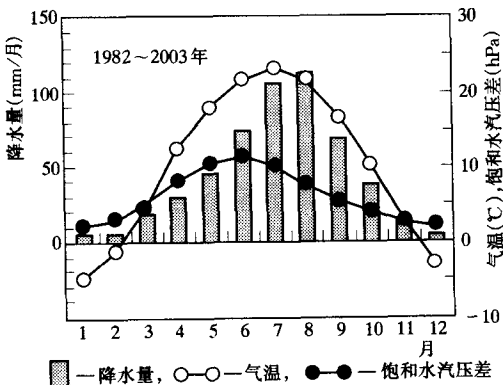


图 1-3 延安市的平均降水量, 气温饱和
水汽压差的经年变化