



中国地质调查成果
CGS 2014-024

干旱半干旱地区 水资源及其环境问题

——陕北榆林能源化工基地例析

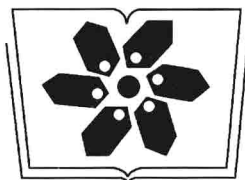
张茂省 党学亚 等著



科学出版社



中国地质调查“1212010535207”项目资助



中国科学院科学出版基金资助出版

干旱半干旱地区水资源及其环境问题

——陕北榆林能源化工基地例析

张茂省 党学亚 等著

科学出版社

北京

内 容 简 介

合理地开发利用水资源和矿产资源,保障资源供给,促进生态文明建设,是西北干旱半干旱地区大型能源基地建设和发展中面临的重大科学命题。本书以国家级能源化工基地——陕北榆林能源化工基地为例,阐述了水资源的形成、循环与赋存规律;揭示了干旱半干旱地区植被生态与地下水的依存关系,确定了影响植被生态的地下水位阈值,开展了地下水开发的植被生态敏感性区划,建立了地下水流与植被生态耦合模型,实现了资源开发可能引起的植被生态风险评价;从含水系统和水流系统两个方面进行了采煤对水资源影响的研究,提出了面向水资源保护和利用的煤炭资源开发方略;研发了以植被生态为约束条件的地下水资源优化开采模型和考虑煤采区疏排水的水资源配置模型,构建了面向多用户的水资源管理决策支持系统。

本书是地质调查与科学研究融合的成果,可作为陕北榆林能源基地规划建设的依据,为干旱半干旱地区水资源开发与环境保护提供思路和借鉴,并可供水文地质、环境地质、水文学及水资源、能源基地建设、城镇建设等领域的科研、教学和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

干旱半干旱地区水资源及其环境问题:陕北榆林能源化工基地例析/张茂省等著. —北京:科学出版社,2014.12

ISBN 978-7-03-042597-3

I. ①干… II. ①张… III. ①干旱区-水资源-研究-西北地区 IV. ①TV213.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 275710 号

责任编辑:张井飞 韩 鹏 李 娟/责任校对:李 影

责任印制:赵德静/封面设计:华路天然

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

*

2014年12月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2014年12月第一次印刷 印张:23

字数:550 000

定价:188.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

党中央一直强调人与自然和谐相处，强调建设生态文明，在能源资源的开发利用中尤其需要处理好采矿与水安全、采矿与环境安全、采矿与生物安全的关系以及保证地域经济社会可持续发展。这些问题虽然是人们早就关注的，但是，随着能源开发规模的扩展、深度的增大，加之开发地域的特殊条件，便出现了一系列需要研究解决的理论和实际问题。

张茂省研究员的研究团队，研究地域是面积广大的陕北榆林干旱半干旱地区。

这里地跨毛乌素沙漠和黄土高原北部广大地域，蕴藏着丰富的煤炭、石油、天然气、盐岩等能源和矿产资源。早在 1998 年就被批准为国家级能源基地，已成为我国西气东输、西煤东运、西电东送的重要源头。但是，该地区降水稀少，蒸发强烈，水资源短缺，生态环境十分脆弱，研究不够充分，底子不清，例如水资源有多少？能开采多少？开采后对水资源与生态环境有何影响，以及如何合理地开发利用水资源等现实问题一直困扰着基地建设和发展。这些现实问题涉及水资源的形成与富集规律、地下水开采的植被生态效应、煤炭开发的环境地质问题、疏排水资源浪费以及煤炭资源—水资源—生态环境协调发展等一系列关键科学问题。由此可见，如何保护生态环境，科学合理地开发利用水资源，推进能源基地可持续发展，已成为西北干旱半干旱地区大型能源基地建设和经济社会发展中不可逾越的必须解决的理论和实际问题。

张茂省研究员带领团队，以承担的国土资源部和陕西省政府合作项目“陕北能源化工基地地下水勘查”为主体，结合联合国教科文组织、国家软科学研究计划、国家和陕西省自然科学基金、榆林市政府以及神华-陶氏大型企业等资助的 12 个项目，针对以上问题开展了扎实的地质勘查和科学研究工作，取得了一系列十分有价值的成果。不仅直接促进了地下水水源地的确定，而且提出了生态-水文地质研究与评价方法，定量揭示了该区地下水位埋深与植被生态间的依存关系，开创性地建立了地下水与植被生态耦合模型，对地下水开采可能引发的植被生态变化进行了风险评价；开展了采煤对水资源影响区划，提出了近期“保水采煤”和中远期“煤水共采”的煤炭-水资源协调开发对策；构建了基于生态的地下水优化开采模型和考虑矿区疏排水的水资源优化配置模型；提出了水资源可持续开发利用对策与优化配置方案；通过原位试验设计了

一套高泥沙河水资源化的人工渗滤系统等。本专著是扎实的地质调查成果和创新性科研成果的集成，体现了实用性与理论性的统一，具有很高的学术水平和应用价值。

我有幸参与了该项目的总体设计审查和各年度工作检查以及成果报告评审，赞赏这个研究团队扎实的理论联系实际学风和工作作风以及能从实践中发现关键科学问题，并为他们不断探索和创新的科研精神所鼓舞，愿为反映这些成果的专著作序。

中国工程院院士



2014年8月

前 言

水资源和生态问题是我国乃至全球干旱半干旱地区普遍面临的重大问题。我国西北地区大型盆地大都蕴藏着丰富的煤炭、石油、天然气等能源与矿产资源,是保障我国 21 世纪能源安全的战略要地,水资源和生态问题尤为突出。

为缓解能源基地水资源和生态问题,1999 年,新成立的中国地质调查局便部署实施了“鄂尔多斯盆地地下水勘查”工作。在此基础上,为了进一步探明陕北能源化工基地地下水资源,国土资源部中国地质调查局和陕西省人民政府于 2004 年签订协议,联合开展“鄂尔多斯盆地陕北能源化工基地地下水勘查”工作。陕北能源化工基地地下水勘查项目在中国地质调查局西安地质调查中心和陕西省国土资源厅的精心组织下,由中国地质调查局西安地质调查中心牵头,地矿、煤炭、建设、核工业等四部门专业勘察单位参加,中国地质大学(北京)、长安大学和北京大学等院所协作,经过近十年的齐心协作与共同努力,取得了丰硕的勘查与研究成果并及时得到了转化应用。归纳起来,主要有以下三个特点:

做好公益性地质调查工作是中国地质调查局大区中心最主要的本职工作。本研究团队围绕陕北榆林能源基地对水资源的需求,科学谋划,系统开展了 1:10 万区域水文地质修测、1:5 万流域水文地质调查和 1:1 万水源地勘探三个层次的水文地质勘查工作,系统查明了陕北能源化工基地水文地质条件,评价可采资源总量 $10.92 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,现状利用量 $2.80 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,可利用潜力 $7.41 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$;新发现水源地 29 处,新增加资源总量 $4.18 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,新探明水源地 38 处,新探明资源量 $6.75 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,核查水源地 18 处,核查资源量 $4.17 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$;勘查后已有 30 个水源地达到勘探精度要求,B 级可采资源量 $8.42 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$;26 个水源地达到详查精度要求,C 级可采资源量 $2.51 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。这些勘查成果为“以水定项目,以水定产”的陕北榆林能源化工基地规划、建设和发展提供了重要的科学依据。

地质调查的过程就是探索和研究的过程。本研究团队,在地质调查中能不断发现和凝练科学问题,申请并获批了多项科研项目经费资助,例如联合国教科文组织项目“Ethics in Water Resource Management: Lessons from Yulin, Shaanxi Province”,国家软科学研究项目“陕北能源化工基地水资源可持续利用对策研究”,国家自然科学基金项目“大型煤炭基地水资源优化调度研究和毛乌素沙漠地区植被生态对地下水循环影响研究”,陕西省自然科学基金项目“陕北能源化工基地资源开发的生态环境响应研究”“陕北能源化工基地水资源优化调控模式研究”“毛乌素沙地土壤水分热驱动入渗模式研究”等。通过研究,完善了生态水文地质学理论与水资源管理伦理学理论,研究了干旱半干旱的毛乌素沙漠和黄土高原地下水形成机理、赋存条件和富集规律;揭示了地下水文过程中植被生态演替规律,建立了地下水与植被生态耦合模型和生态-水文地质评价方法;探索了煤田采动条件下地下水含水系统和水流系统响应机制;研发了基于水资源管理伦理和植被生态为约束的

地下水优化开采和水资源优化配置模型；试验并总结了适宜生态脆弱区的地下水高效率取水模式等原创性成果。这些创新性成果，改变了很多传统的观念和思维模式，对于陕北榆林能源基地乃至干旱半干旱地区合理开发利用水资源和保护生态环境提供了理论和技术支撑。

成果转化与社会服务是地质调查和科学研究的目的。在鄂尔多斯盆地地下水勘查（1：25万）的基础上，由国土资源部和陕西省人民政府共同出资，开展了区域水文地质调查（1：5万）和水源地勘查（1：1万）工作，带动榆林市政府出资逾亿元进一步开展了东线调水地下水勘查和榆林南部地下水勘查等工作，这项工作获得了四项重要新发现，研发了八类新技术新方法，在榆林市水资源规划、榆林市矿产资源规划、中国神华和美国陶氏公司榆林煤化工项目选址与地下水环评、华奥盐业水资源调查与咨询等七个方面及时得到了推广应用，起到了国家公益性与地方及商业性投入相结合，公益先行，拉动地方和企业投入的作用。

本专著是张茂省研究员所带团队，以国土资源部中国地质调查局和陕西省人民政府合作项目陕北能源化工基地地下水勘查成果为主体，融合多项科研和榆林市政府资助项目成果，经综合研究、集成创新而成，是地质调查和科学研究紧密结合的成果，探索出了一条成功的省部合作项目管理模式，对陕北能源化工基地规划建设具有重要的实用价值，还将对于干旱半干旱地区水文地质环境地质工作具有指导意义和示范作用。本书由张茂省负责，党学亚、董英、王化齐协助完成，刘洁负责了部分插图的清绘工作。

省部合作项目由项目负责人张茂省组织，副项目负责党学亚、魏雄斌、王雁林协助完成。参加项目和报告编写的主要人员有：杜中宁、董英、顾小凡、常亮、卢娜、张戈、刘洁、李小等、贺帅军、李清、李林、王晓勇、曾磊等。在项目论证过程中段永侯、方长生、赵振宏、赵如新等参加了野外踏勘，杨六岗、陶正平、王力、马思锦等参与了项目的前期论证，侯妙娟作了大量的协调管理工作。省部合作项目由陕西省国土资源厅和西安地质调查中心共同组织实施，项目办公室的领导和成员对项目顺利实施付出的艰辛劳动，在此对他们表示衷心的感谢。尤其是李文渊、王德潜、侯光才、俞尧龙等领导和专家给予了细致的指导，在此表示诚挚的谢意。

由于作者水平有限，加之时间仓促，书中难免存在不足之处，恳请广大读者批评指正。

目 录

序	
前言	
第 1 章 绪论	1
1.1 干旱半干旱地区水资源特点	1
1.2 大型能源基地建设面临的问题	4
1.3 研究内容及主要成果	6
第一篇 水资源形成条件	
第 2 章 自然地理条件	15
2.1 地形	15
2.2 地貌	15
2.3 气候	17
2.4 水文	25
2.5 生态环境	27
第 3 章 地质环境条件	28
3.1 地层岩性	28
3.2 地质构造	31
第二篇 水资源特征及水资源评价	
第 4 章 地表水资源特征及资源评价	39
4.1 流域分区	39
4.2 地表水径流特征	40
4.3 地表水水质特征及功能区划	45
4.4 地表水资源评价	47
第 5 章 地下水资源特征及资源评价	51
5.1 地下水系统划分	51
5.2 岩溶水文地质特征及资源评价	61
5.3 白垩系地下水特征及资源评价	75
5.4 第四系萨拉乌苏组地下水特征及资源评价	90
5.5 第四系河谷冲积层地下水特征及资源评价	106
5.6 石炭-侏罗系与上覆松散层地下水	113

第6章 三水转化及水资源量	119
6.1 黄土沟壑区三水转化关系分析	119
6.2 风沙滩地区三水转化关系分析	119
6.3 重复资源量	120
6.4 水资源总量	121

第三篇 地下水开发的植被生态响应与风险评价

第7章 植被生态时空特征及影响因素	125
7.1 植被生态空间秩序	125
7.2 植被生态时间序列分析	131
7.3 影响植被生态的主要因素	135
第8章 面向植被生态的地下水位阈值及生态敏感性区划	145
8.1 植物类型与潜水埋深关系	145
8.2 植物根系与潜水埋深关系	146
8.3 植物长势与潜水埋深关系	148
8.4 植被指数与潜水埋深关系	155
8.5 植被生态与潜水埋深阈值	156
8.6 地下水开发的植被生态敏感性区划	158
第9章 地下水开发的植被生态预测与风险评价	160
9.1 地下水与植被生态耦合模型	160
9.2 风沙滩地区地下水开采引起的植被风险评价	166

第四篇 采煤的地下水系统响应与对策

第10章 煤炭资源赋存及勘查开发规划	175
10.1 煤炭资源赋存概况	175
10.2 煤炭资源勘查现状与勘查规划	176
第11章 采煤引起的环境问题现状	184
11.1 采煤引起的地质环境效应现状	184
11.2 采煤引起的生态环境效应现状	193
11.3 采煤引起水资源及水环境效应	199
第12章 采煤引起的水资源与生态环境效应区划	206
12.1 煤田水文地质特征	206
12.2 煤田工程地质特征	211
12.3 “三带”安全高度预测	213
12.4 采煤引起的水资源与生态环境效应区划	220

第 13 章 采煤对水资源影响及矿坑涌水量预测	225
13.1 采煤对水源地影响预测	225
13.2 采煤规划对地下水资源影响预测	226
13.3 井田开采对水资源影响及矿坑涌水量预测	228
第 14 章 面向水资源与生态环境的防控对策	233
14.1 煤炭资源开发规划建议	233
14.2 采煤引起的植被生态预测及风险评价	237

第五篇 其他环境水文地质问题

第 15 章 地表水与地下水污染	245
15.1 地表水污染	245
15.2 地下水污染	254
第 16 章 湖泊、湿地及大泉的形成与变化趋势	264
16.1 湖泊、湿地的形成及变化趋势	264
16.2 大泉的分布、形成与动态变化	271
第 17 章 地方病分布及演变趋势	277
17.1 氟中毒病	277
17.2 地方性甲状腺肿	279
17.3 大骨节病	282

第六篇 地下水资源优化开采与水资源优化管理

第 18 章 萨拉乌苏组地下水优化开采模型	287
18.1 优化模型框架	287
18.2 植被生态约束条件	288
18.3 优化工具	289
18.4 优化结果	289
18.5 地下水优化开采方案风险评价	292
第 19 章 水资源联合调度与优化配置管理模型	293
19.1 考虑疏排水的多水源开发利用模式分析	293
19.2 基于水伦理学的优化配置原则	293
19.3 供需水预测分析	294
19.4 基于多规则的重点工业区水资源配置	298
19.5 地表水、地下水与矿区疏排水联合优化配置模型	302
19.6 水资源开发利用建议	306
第 20 章 水资源管理决策支持系统	325
20.1 需求分析	325

20.2	主体架构	326
20.3	水资源管理系统数据库构建	330
20.4	地下水资源动态监测子系统	333
20.5	空间数据网络发布	336
20.6	地下水资源动态评价子系统	336
20.7	地表水资源动态监测子系统	343
20.8	水文预报子系统	346
参考文献		349
后记		353
附表		355

第 1 章 绪论

1.1 干旱半干旱地区水资源特点

1.1.1 世界干旱半干旱地区水资源

水是生命之源、生产之要、生态之基，事关人类生存、经济发展和社会进步（王浩、王建华，2012）。随着经济发展和社会进步，水已逐步从农业的命脉发展成为工业、城市和整个国民经济建设与生态环境建设的命脉，深刻地影响着社会经济生活的各个方面，直接关系到经济安全、社会稳定和社会经济的可持续发展。水资源短缺是全球干旱半干旱地区普遍存在和最显著的共性问题，也是当今世界普遍关注的问题。1973 年 3 月联合国水环境会议曾向世界发出郑重警告：“水，不久将成为一个深刻的社会危机，石油危机之后的下一个危机是水”。

世界上干旱半干旱地区面积占全球陆地总面积的 45%（图 1.1），分布遍及五十多个国家和地区，涉及世界总人口的 38%。澳大利亚是世界上最干旱的大陆，干旱区面积占其总面积的 75%；其次是非洲（66%）和亚洲（46%）。在欧洲、北美洲和南美洲，干旱区约占其总面积的 1/3。但从绝对数字看，最大的干旱区分布在非洲和亚洲，其面积之和约占世界干旱半干旱地区的 64%（艾东，1992）。辽阔的干旱半干旱地区是水资源系统和生态系统最脆弱的地区之一，水资源短缺和生态系统退化已经严重地威胁着人类的生存环境，同时它为人类的生产和生活提供了广阔的生存空间和巨大的物质生产能力，特别是绵亘在西南亚和北非的荒漠地带，不但占有十分重要的战略地位，而且还是全世界石油资源最丰富的蕴藏地，更引起了国际上对干旱半干旱地区研究的热情。

干旱半干旱地区光热、土地资源丰富，有一定数量的水资源，是灌溉农业发展较早的地区，农业在开发利用自然资源过程中积累了丰富的经验，创造过举世闻名的古代文明，繁衍生息着一支又一支民族，取得了巨大的经济效益。但是，一些地区由于长期不合理地滥用资源，产生了不良后果，遭到了自然的惩罚。诸如曾经创造过发达农业的埃及尼罗河流域，印度恒河流域，巴比伦美索不达米亚平原的幼发拉底河的格里斯河流域等，现在不少地方已经沙漠化了。美索不达米亚平原文明的毁灭，常被世人作为干旱半干旱地区不合理开发利用资源的典型例子。近代美国、原苏联在干旱半干旱地区的大规模垦殖，也曾引起过震惊世界的“黑风暴”。

人类虽然从远古时代就开始用水，但将水作为一种重要的资源来使用和管理却是最近几十年的事。随着人口的增长和经济的发展，人类对资源的需求越来越大，对资源的消耗也越来越大。从 19 世纪开始，人们为了满足经济的发展、消费的增长，过度地开采了自

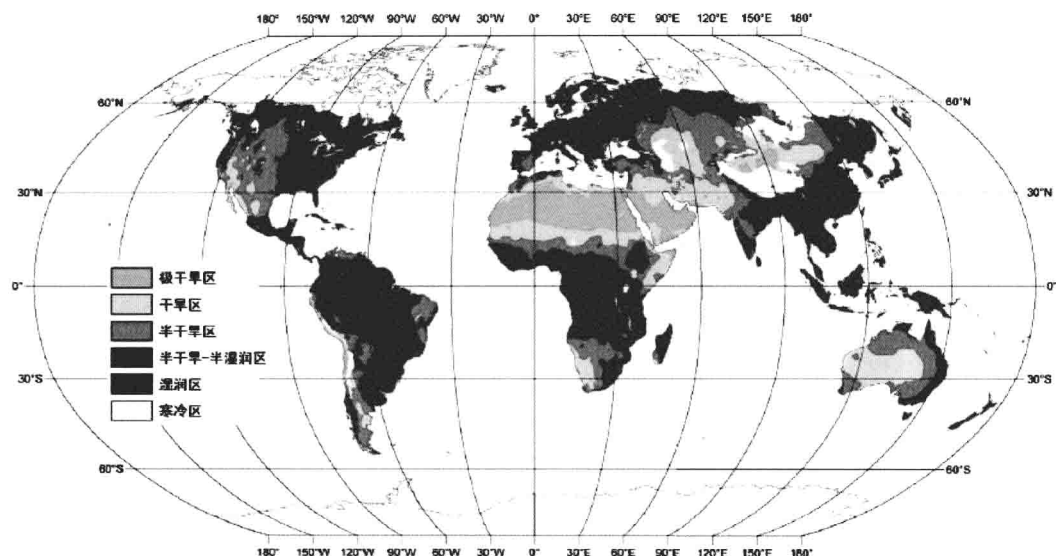


图 1.1 全球湿度指数图
(据全球信息数据库 (GRID) 和联合国环境规划署 (UNEP), 亚利桑那州大学旱地研究办公室)

然资源，打破了原来的平衡，造成了环境恶化，导致了土地沙漠化、土地盐碱化、湖泊退缩和水污染等种种后果。到了 20 世纪 90 年代，环境问题变得更为严重，人们意识到环境的重要性，逐渐形成了可持续发展的概念，认识到经济的发展必须与环境协调发展。所谓可持续发展就是既满足当代人的要求又不损害未来子孙的要求向前发展。在水资源方面，由于具有可更新性，人们以前一直错误地认为水是取之不尽、用之不竭的，对水资源的开发和管理重视不够，造成了水资源浪费和损害，直到 20 世纪 70 年代后期，由于用水猛增和水污染，全球能直接利用的水资源大大减少，出现水危机，人们对水资源的开发利用和管理才日益重视起来。

目前，世界上有 1/4 的人饮水没有保障，地球上已有 60% 的陆地面积，遍及 63 个国家和地区面临缺水。水资源数量不足及水环境质量不断恶化已成为许多国家经济增长和社会发展的严重障碍。因此，合理开发、利用、管理水资源，提高其利用效率，保护生态环境是保证社会可持续发展的重要课题。

1.1.2 中国西北干旱半干旱地区水资源

中国西北干旱半干旱地区 (图 1.2)，被几条巨大的山系分割成许多山间盆地，诸如伊犁河谷、塔里木盆地、柴达木盆地、河西走廊、鄂尔多斯盆地等，这些盆地或河谷呈现自高山区到盆地景观分带性。尽管这和世界其他干旱半干旱地区有所不同，一些高大山体顶峰终年积雪和巨大冰川存在，为盆地地表径流与地下径流提供了较充足的补给来源，成为天然的调节水库，这是世界上其他干旱半干旱地区所不具备的，但是，仍未改变中国西北干旱半干旱地区水资源短缺这一显著的特点。

西北地区开发利用水资源最早可追溯到 2000 多年前。其间修建的著名水资源开发利

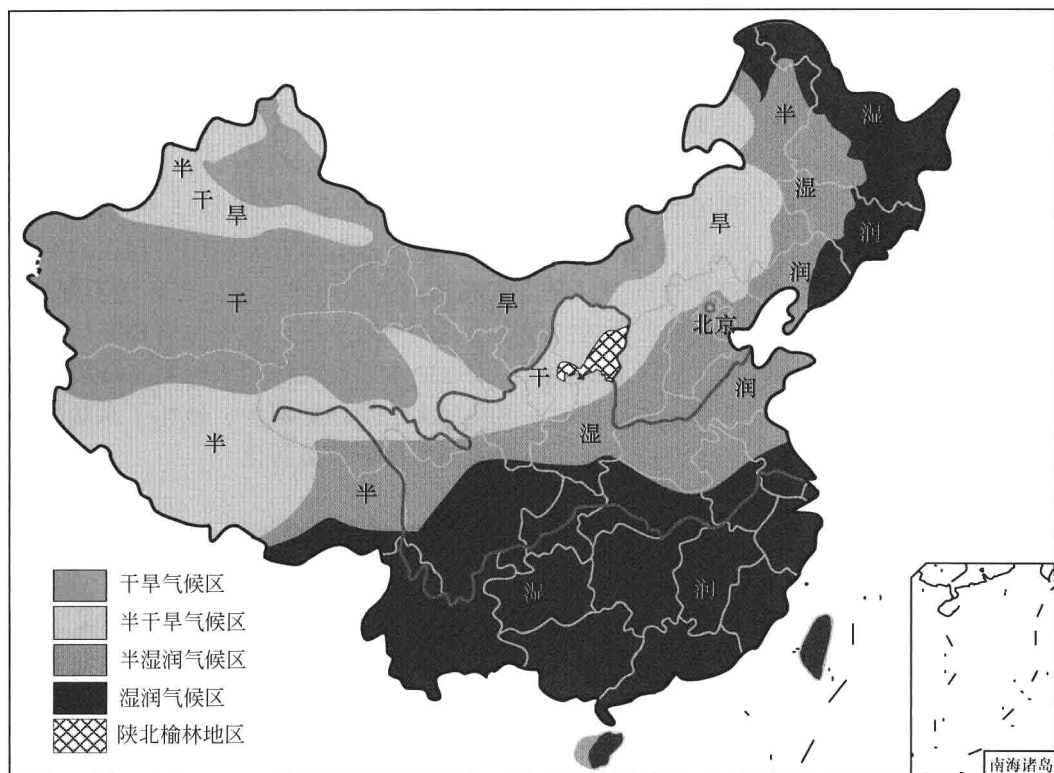


图 1.2 中国陆域干湿地区划分图

用工程颇多，如创建于汉武帝元朔至元狩年间（公元前 128 年至公元前 116 年）的龙首渠，是陕西古代引北洛水的灌溉工程；分布于吐鲁番盆地和哈密一带的坎儿井，可以汇集渗入山麓砂砾带的高山融雪水，并引水灌溉（张会言等，2002）。截至 1997 年年底，西北地区共建成大中小型水库 3120 座，总库容 $444 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，兴利库容 $333 \times 10^8 \text{ m}^3$ ；建成引水工程 8051 处；建成提水工程 11908 处；建成机电井工程 23.22 万眼。此外，还建成了少量污水回用工程和雨水利用工程。这些水利工程承担着 600 多万公顷农田灌溉供水和西北地区的城市、工业及生活供水的任务。

在我国的西北干旱半干旱地区，按照水资源的开发历史和现状，可划分为两个阶段：一是地表水开发利用阶段，二是地表水和地下水联合开发利用阶段（张志忠等，2001）。西北干旱半干旱地区水资源的开发，最初是利用河水和溢出带的泉水；自 20 世纪 50 年代开始，为了充分利用来自山区充沛的地表径流，陆续在河流的上游地区修建了大量水库，不少地区地表水的开发程度已达到 70% 以上。自 20 世纪 70 年代以来，随着经济的发展和人口的增加，少数内陆河流域诸如石羊河流域和乌鲁木齐河流域等，在利用地表水的同时，又大力开发了地下水资源，即联合开发利用地表水和地下水；由于水资源的开发缺乏统一规划和科学管理，一些流域上下游水资源得不到合理分配，造成流域上游水资源过量消耗，下游盆地水资源补给量逐年减少，下游盆地的天然生态环境平衡遭到破坏。西北干旱地区上下游水资源分配失衡是造成生态环境恶化的主要原因（陈梦熊，2001），如河西

走廊的黑河、石羊河源于祁连山，流经中游盆地水资源被大量利用，进入最下游地区的水资源量越来越少，生态环境问题日趋严重。因此，西北地区应在保证生态环境建设和社会经济的合理用水时，必须保证水资源的可持续利用，并留有适当余地。为此，不但要统筹兼顾河流的上中下游，而且还要充分考虑地表水和地下水的复杂转化，以及地下水的可持续利用（钱正英，2003）。

西北地区水资源的开发利用潜力为 $295.71 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，其中黄河流域为 $15.98 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，内陆河地区为 $279.73 \times 10^8 \text{ m}^3$ （张会言等，2002）。西北地区水资源开发利用中存在的突出问题是部分地区水资源开发超过承载能力；经济发展挤占生态用水，使生态环境不断恶化；缺少控制性调蓄工程，部分地区粮食不能实现自给；用水效率低，水资源管理滞后，难以适应水资源可持续利用的要求。从用水结构看，问题的本质是经济用水与生态环境用水比例失衡以及上下游之间水资源分配失衡导致下游地区来水量逐年减少，破坏了水盐平衡和区域地下水动态平衡，地下水位持续下降，引起大面积生态环境恶化。

1.2 大型能源基地建设面临的问题

中国能源资源分布极不均衡，总体上是西多东少、北多南少。煤炭总资源量北部占 87%，西部占 52%；可采储量北部占 79%，西部占 26%。石油陆上总资源量东北和华北占 52%，西北占 35%；可采储量东北和华北占 50%，西北占 32%。天然气陆上总资源量西北占 43%，华北和东北占 12%；可采储量西北占 52%，华北和东北占 23%。中国是世界上少数几个以煤炭为主要能源的国家之一。根据中国的能源资源条件、技术经济发展水平以及国际能源市场的发展趋势，在未来 30~50 年内，中国以煤炭为主的能源结构不会有大的改变。能源是国民经济的基础产业，对国民经济持续快速健康的发展和人民生活的改善发挥着十分重要的促进与保障作用，矿产资源开发已成为西部大开发战略中最实质性的内容之一。

西北地区开发丰富的煤炭、石油、天然气等矿产资源，是变资源优势为经济优势，带动地区经济社会发展进步的必然选择，也是我国保障 21 世纪能源安全的战略行动。水不仅是西部经济发展的主要制约因素、山川秀美的重要保证，而且是西部脱贫致富的希望所在（刘昌明，2002）。目前该地区已经成为各级政府决策者与社会大众关注的热点与焦点地区，同时其干旱半干旱地区具有的独特水资源系统和生态系统，当属生态文明建设和建设美丽中国的核心区。中国西北干旱半干旱地区水资源本就短缺，供需矛盾突出，生态环境脆弱，加上大型能源基地矿产资源开发与加工，需要大量的水资源支撑，使得水资源供需矛盾日益尖锐，水资源供需矛盾及其生态环境问题已经成为大型能源基地最大最尖锐的问题。以陕北榆林能源化工基地为例，地处毛乌素沙地与黄土高原接壤地带，是一个集生态脆弱性、环境敏感性、资源重要性、经济贫困性、社会复杂性于一体的特殊区域。这里蕴藏着丰富的煤炭、石油、天然气和岩盐等 48 种矿产资源，其潜在价值逾 42 万亿元，约占全国资源潜在价值的 30%。国家计划委员会 1998 年就已批准陕北能源化工基地为规划建设国家级能源基地，要将陕北能源化工基地建成我国 21 世纪的能源接续地和我国西部规模最大的能源基地。通过十多年的建设与发展，目前该能源基地已成为我国西煤东

运、西气东输、西电东送的重要供给地。由于地处内陆干旱半干旱气候带,区内水资源短缺和生态环境脆弱已成为严重制约陕北能源化工基地建设和发展的瓶颈。陕西省省委和省政府明确“在陕北能源化工基地建设中,最大最尖锐的问题是水资源问题,要把水资源的开源节流与综合利用和生态环境保护放到十分重要的位置来考虑”,“以水定项目,以水定产”被确定为陕北能源化工基地规划建设的基本原则。

归纳起来,大型能源基地建设面临的水资源与环境问题主要表现在以下几个方面。

1.2.1 水资源严重短缺

降水稀少,蒸发强烈,水资源短缺是全球干旱半干旱地区普遍存在和最显著的共性问题。大型能源基地矿产资源的开发与加工,农业生产以及人饮用水量逐渐增大,已经超出了该地区水资源的承载力,形成了水资源供需矛盾突出的严峻局面,大量水利工程的建设与使用,减少了下游河川径流量和水资源保障能力,加剧了下游地区的水资源压力和供需矛盾,引发了大量的水环境、生态环境和地质环境问题。所以,水资源短缺及其开发利用引发的环境问题是大型能源基地建设中面临的最大最尖锐的问题。

1.2.2 生态环境脆弱

稀少的降水,强烈的蒸发,造成了干旱半干旱地区生态环境脆弱的局面。近半个世纪以来,人类活动范围和强度的不断扩大和增强,使得大型能源基地脆弱的生态环境更加脆弱。水资源利用方面,重开发、轻水源涵养,从而导致流域生态的破坏。例如,不合理的水利工程对地表水的拦截与使用,直接影响了河川径流,致使许多河流下游河川径流量减少,甚至河流断流,平原湖泊大量消亡,河流生态植被退化;地下水的过度开采,在许多地区引发了地下水位显著下降,致使依赖地下水生存生长的植物长势变差、植被生态退化。能源矿产资源开发方面,采矿在造成地面变形破坏和土地压覆,加剧水土流失,使得脆弱的生态环境更加脆弱的同时,引起了地下水位大幅度下降,导致植被生态破坏。

1.2.3 地质环境问题与地质灾害严重

大型能源基地煤炭开采引发的地质环境问题与地质灾害主要是区域地下水位下降、含水层疏干以及采空区地面沉降与地裂缝等。例如,榆林市因煤炭开采形成的采空区面积达400km²,塌陷面积86km²,受灾人口上万。地下水位显著降低,全市湖泊由开发前的869个减少到现在的79个。

1.2.4 水资源浪费严重

除城市供水、农业灌溉和一般工矿企业节水措施不力,排污不达标,回水利用率低等造成水资源浪费严重外,采矿疏排水得不到有效利用,甚至被污染的现象十分普遍,使得本就匮乏的水资源雪上加霜,供需矛盾更加突出。如何充分利用大型能源基地的矿区疏排水资源已成为急需解决的重要科学问题。

1.2.5 水环境污染堪忧

与全国其他地区相比，西北干旱半干旱地区大型能源基地人口相对稀少，工业欠发达，城市化进程较慢，无论是地表水还是地下水污染程度都相对较低。但是西部在建设进程中，尤其是大型能源基地建设中，人类活动正以前所未有的速度和强度改变和影响自然环 境。如果还是仅仅重视前期的环境影响评价，轻视生产环节的“三废”处理监管，或视而不见，或以罚代管，那么，大型能源基地建设中的水环境污染问题将令人十分担忧。

1.2.6 缺乏科学的管理

尽管水资源短缺及矿业活动引发的水资源与环境问题是大型能源化工基地建设中的最大最尖锐的问题，但是，在大型能源化工基地建设中，水资源浪费与水资源短缺并存。这一切除了人们对水资源节约和保护意识不强外，一个重要的原因就是缺乏科学的水资源管理理念和水资源管理信息平台，从而导致水资源管理中存在各自为政，信息资源得不到共享，低水平决策等现象。

1.3 研究内容及主要成果

1.3.1 研究背景

陕北榆林能源化工基地蕴藏着丰富的矿产资源，被誉为中国的“科威特”。其中，神府煤田是世界七大煤田之一，煤炭预计储量 $2714 \times 10^8 \text{t}$ ，探明储量 $1660 \times 10^8 \text{t}$ ，属特低灰、特低硫、特低磷、中高发热量的优质环保动力煤和化工用煤。天然气预测储量 $5.0 \times 10^{12} \text{m}^3$ ，探明储量 $7474 \times 10^8 \text{m}^3$ ，是迄今我国陆上探明最大的整装气田，气田储量丰度为 $0.66 \times 10^{12} \text{m}^3/\text{km}^2$ ，属干气，甲烷含量 96%、乙烷含量 1%~3%、有机硫极微，在燃烧中不产生灰渣和有毒气体，对环境造成的污染很小。石油预测储量 $6.0 \times 10^8 \text{t}$ ，探明储量 $3.0 \times 10^8 \text{t}$ 。湖盐预测储量 $6000 \times 10^4 \text{t}$ ，探明储量 $3292 \times 10^4 \text{t}$ 。岩盐预测储量 $6 \times 10^{12} \text{t}$ ，约占全国岩盐总量的 26%，探明储量 $8854 \times 10^8 \text{t}$ 。此外，还有比较丰富的高岭土、铝土矿、石灰岩、石英砂等资源。该地区矿产资源储量大，品质优，组合配置条件好，开发前景广阔，是我国新兴的能源化工基地和 21 世纪重要的能源接续地。按照国家能源基地规划，要将陕北能源化工基地建成我国西部规模最大的能源基地，一是国家西电东送基地，二是国家大型煤化工基地，三是国家大型商品煤基地。其中重点布局区的榆林能源化工基地规划建设六个产业园区，即在东部的府谷建设煤电载能工业园区，中部的秃尾河、榆溪河一带建设榆神煤化学工业园区、榆横煤化学工业园区，南部沿无定河谷建设榆绥盐化工业园区，东南部的吴堡建设煤焦化区，西部靖边-定边一带建设靖定石油天然气化工园区（图 1.3）。经过“九五”的启动建设以及“十五”和“十一五”的高速建设与发展，2020 年陕北榆林能源化工基地将建成重要的国家级能源基地。但水资源短缺严重制约其建设和发展，据《榆林市水资源规划》