

JIYU ET DE HUANGHE LIUYU

丁志宏 冯宇鹏 朱琳 著

SHUIZIYUAN ZONGHE

基于ET的黄河流域水资源 综合管理技术体系研究

GUANLI JISHU TIXI YANJIU



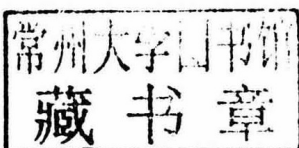
非外借



黄河水利出版社

基于 ET 的黄河流域水资源综合 管理技术体系研究

丁志宏 冯宇鹏 朱琳 著



黄河水利出版社

· 郑州 ·

内 容 提 要

本书结合最严格水资源管理制度的实践新需求,深入剖析黄河流域现行的“八七”分水方案不足之处,从系统的角度出发,基于水量平衡基本方程,结合对地观测技术的进步,提出一个融合 ET 管理理念的、由地表水资源管理体系、ET 管理体系和地下水资源管理体系所组成的黄河流域水资源综合管理技术体系,对现行的以“八七”分水方案为主体框架的黄河流域水资源管理体系进行补充和完善,进而对该综合管理技术体系所涉及的若干重要问题进行深入界定、分析、研究和探讨,以期以新理念、新技术、新体系来助力流域水资源综合管理能力和管理效率的提升,为维系黄河健康生命、建设流域生态文明提供基础指导和技术参考,也为其他流域(区域)开展类似工作、有关机构开展类似研究提供借鉴。

本书可供从事水文水资源、水利工程、资源环境等领域的有关科技工作者和管理人员使用,也可供大专院校相关专业师生参考阅读。

图书在版编目(CIP)数据

基于 ET 的黄河流域水资源综合管理技术体系研究/
丁志宏,冯宇鹏,朱琳著. —郑州:黄河水利出版社,2018. 8
ISBN 978 - 7 - 5509 - 2103 - 0

I. ①基… II. ①丁… ②冯… ③朱… III. ①黄河流域-水资源管理-研究 IV. ①TV213. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 184422 号

策划编辑:岳晓娟 电话:0371 - 66020903 E-mail:2250150882@qq. com

出 版 社:黄河水利出版社

网址:www. yrep. com

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼 14 层

邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371 - 66026940, 66020550, 66028024, 66022620(传真)

E-mail:lhslcbs@126. com

承印单位:河南新华印刷集团有限公司

开本:787 mm × 1 092 mm 1/16

印张:7. 75

字数:179 千字

印数:1—1 000

版次:2018 年 8 月第 1 版

印次:2018 年 8 月第 1 次印刷

定价:53. 00 元

前言

水资源管理研究与实践工作的发展方向之一是集成化、系统化、精细化管理,随着现代对地观测技术如遥感、重力卫星等方面的长足进步,水资源管理研究与实践工作也正在向立体化、实时化、多维化方向前进。

在广泛参阅国内外相关的水资源管理研究和实践技术文献的基础上,本书从系统的观点出发,基于水量平衡基本方程,借鉴遥感监测 ET 等技术方法的科研成果,立足黄河流域现状水量分配与调度管理工作实践需求,系统地阐述了基于 ET 的黄河流域水资源综合管理技术体系的理论基础、实现途径、技术方法、监测指标、实施流程、保障措施、风险因素等,提出了水文时间序列多时间尺度分析的 CEEMDAN 方法,探讨了 Copula 函数方法在 ET 管理风险分析中的应用。

本书的研究视角、内容与现有的有关 ET 管理研究著作不同,不是在规划层面上论述 ET 的理论方法和技术应用,而是紧密结合黄河水量调度管理工作的实践改进需求,侧重于在水资源实时调度管理工作中来使用 ET 理论方法和技术模型,并将 ET 管理的理念、方法、技术与现行的黄河水资源调度管理体系相融合,提出构建基于 ET 的流域水资源综合管理技术体系,并研究和探讨其中的若干技术问题。具体成果可归纳如下:

(1)分析了黄河流域水资源时空分布特征,提出了水文时间序列多时间尺度分析的 CEEMDAN 方法,并将其应用于黄河源区年径流量多时间尺度变化研究,总结了黄河流域水资源现行管理与调度制度运行经验及其不足,进而从水文循环过程的角度出发,探讨了黄河流域现行水资源管理与调度制度效率有待提高的原因,引入 ET 管理的水资源管理新理念和新方法,以“耗水”管理代替“取水”管理,对现行的以“八七”分水方案为主体框架的黄河流域水资源管理体系进行补充和完善。

(2)在界定广义水资源概念的基础上,提出了 ET 管理的概念、内涵、本质、特点,进而从流域水循环基本方程出发,构建了一个基于 ET 的黄河流域水资源综合管理技术体系,分别包括地表水资源管理体系、ET 管理体系、地下水资源管理体系,并对 ET 管理体系的运作流程和实施 ET 管理所需解决的若干问题及其可能的解决途径进行了探讨,使水资源管理从单纯的河川径流管理进入水循环全过程管理,使水资源管理范畴扩展到广义水资源管理的范畴,实现全方位、全过程、全链条式管理,对促进黄河流域水资源管理工作具有积极推动作用。

(3)在深入探讨 ET 的有效性、有限性和可控性等基本属性的基础上,分析了目标 ET 的定义、内涵及其制定原则,讨论了现状 ET 计算的两种途径,阐述了区域现状 ET 调控的原理、理论、途径、方法,进而结合引黄平原灌区构建了一个灌区尺度上的 ET 管理体系的典型实施架构,探讨了基于 ET 的水资源综合管理技术体系在灌区这一较小空间尺度区域上运作的技术实现途径与方法,提出了实施 ET 管理的基本保障措施框架。

(4)在探讨与分析平原灌区水循环特点的基础上,构建了平原灌区“人工-天然”复

合二元分布式水循环模型,并对宁夏平原灌区 1991 ~ 2000 年的分类与综合 ET 进行了计算和分析,为在宁夏平原灌区实施 ET 管理提供了计算基础和数据支撑。

(5)从系统与风险的新角度出发,运用 Copula 函数方法构建了卫宁灌区年降水量和年参考作物腾发量之间的联合概率分布函数,分析了其联合概率分布特征,给出了其不同重现期的等值线,为进行 ET 管理的不确定性分析提供了理论思路和技术支撑,也为灌区干旱风险以及农业节水潜力的定量评估提供了综合考虑降水量和参考作物腾发量耦合变异情况下的新的描述基准。

综上所述,本书的出发点和落脚点均是黄河水资源调度与管理工作的实践,以问题为导向,以理念为引领,以系统为视角,以科技进步为依托,以补充和完善黄河流域现行水量分配与调度管理工作为主要目的,能够直接应用于水资源管理与调度实际工作,较好地体现了科学性、系统性、先进性、实践性的统一,对于促进流域水资源管理实践工作具有一定的指导作用,对于相关的水资源管理科学研究工作也具有一定的科学参考价值。

在本研究的开展过程中,先后得到了天津大学建筑工程学院、郑州大学水利与环境学院、黄河水利科学研究院、中国水利水电科学研究院水资源研究所、水利部水利水电规划设计总院、水利部海河水利委员会等单位的有关学者与专家所给予的热情指导和宝贵支持,在此一并表示衷心感谢。

三人行,必有吾师。限于作者的学术水平和研究能力,本书的内容肯定还存在着诸多不足之处,恳请广大读者和同行专家不吝斧正,相学相长。

作 者

2018 年 6 月

目 录

前 言

第 1 章 黄河流域水资源及其现行的管理调度制度	(1)
1.1 黄河流域概况	(1)
1.2 黄河水资源及其特点	(7)
1.3 黄河源区年径流量的多时间尺度变化特征	(11)
1.4 黄河流域水资源的开发利用状况	(20)
1.5 黄河流域水资源管理现状	(22)
1.6 黄河水量统一调度现状	(24)
1.7 黄河水资源管理与水量统一调度存在的问题	(25)
1.8 黄河流域现行水资源管理与水量调度制度的不足之处	(27)
1.9 本章小结	(28)
第 2 章 基于 ET 的黄河流域水资源综合管理技术体系框架	(30)
2.1 广义水资源	(30)
2.2 ET 管理的理念	(32)
2.3 ET 管理的特点	(36)
2.4 基于 ET 的黄河流域水资源综合管理技术体系	(43)
2.5 本章小结	(46)
第 3 章 区域 ET 管理的系统环节及其方法	(47)
3.1 ET 的基本属性	(47)
3.2 区域目标 ET 的理论与计算方法	(48)
3.3 区域现状 ET 的计算	(61)
3.4 区域现状 ET 的调控	(61)
3.5 ET 管理的典型架构体系	(64)
3.6 实施 ET 管理的保障措施	(67)
3.7 本章小结	(76)
第 4 章 宁夏平原引黄灌区现状 ET 的分布式模拟	(78)
4.1 平原区概况	(78)
4.2 平原引黄灌区概况	(80)
4.3 平原灌区水循环特点	(83)
4.4 平原灌区二元复合水循环模型	(88)
4.5 本章小结	(101)
第 5 章 灌区降水量与参考作物腾发量的联合分布特征	(102)
5.1 Copula 函数的基本理论	(102)

5.2	Copula 函数描述水文变量之间相关性结构的可行性	(104)
5.3	Copula 函数类型的选择	(105)
5.4	参考作物腾发量计算的 Penman-Monteith 方法	(106)
5.5	卫宁灌区降水量和参考作物腾发量的联合分布模型	(107)
5.6	本章小结	(111)
第 6 章	总结与展望	(112)
6.1	总结	(112)
6.2	研究展望	(114)
参考文献		(115)

第1章 黄河流域水资源及其现行的管理调度制度

黄河是我国第二大河,干流全长 5 464 km,流域总面积(包括内流区)79.5 万 km^2 ,流经青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南、山东等 9 省(自治区)。全河划分为兰州以上、兰州至头道拐、头道拐至龙门、龙门至三门峡、三门峡至花园口、花园口以下、黄河内流区等 7 个流域水资源二级分区。

1.1 黄河流域概况

1.1.1 自然地理

黄河是我国第二大河,位于东经 $95^{\circ}53'$ ~ $119^{\circ}05'$,北纬 $32^{\circ}10'$ ~ $41^{\circ}50'$ 。黄河发源于青藏高原巴颜喀拉山北麓的约古宗列盆地,自西向东,流经青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南、山东等 9 省(自治区),在山东省垦利县注入渤海,干流河道全长 5 464 km,流域总面积 79.5 万 km^2 (包括内流区 4.2 万 km^2)。与其他江河不同,黄河流域上中游地区的面积占总面积的 97%;长达数百公里的黄河下游河床高于两岸地面,流域面积只占 3%。

内蒙古托克托县河口镇以上为黄河上游,干流河道长 3 472 km,流域面积 42.8 万 km^2 ,汇入的较大支流(指流域面积 1 000 km^2 以上的,下同)有 43 条。青海省玛多以上属河源段,河段内的扎陵湖、鄂陵湖海拔都在 4 260 m 以上,蓄水量分别为 47 亿 m^3 和 108 亿 m^3 。玛多至玛曲区间,黄河流经巴颜喀拉山与积石山之间的古盆地和低山丘陵,大部分河段河谷宽阔,间有几段峡谷。玛曲至龙羊峡区间,黄河流经高山峡谷,水流湍急,水力资源较为丰富。龙羊峡以上属高寒地区,人烟稀少,交通不便,经济不发达,开发条件较差。龙羊峡至宁夏境内的下河沿,川峡相间,水量丰沛,落差集中,是黄河水力资源的“富矿”区,也是全国重点开发建设的水电基地之一。黄河上游水面落差主要集中在玛多至下河沿河段,该河段干流长度占全河的 40.5%,而水面落差占全河的 66.6%。

下河沿至河口镇,黄河流经宁蒙高原,河道展宽,比降平缓,两岸分布着大面积的引黄灌区和待开发的干旱高地。本河段地处干旱地区,降水少,蒸发大,加上灌溉引水和河道渗漏损失,致使黄河水量沿程减少。兰州至河口镇区间的河谷盆地及河套平原,是甘肃、宁夏、内蒙古等省(自治区)经济开发的重点地区。沿河平原不同程度地存在洪水和凌汛灾害,特别是内蒙古三盛公以下河段,地处黄河自南向北流的顶端,凌汛期间冰塞、冰坝壅水,往往造成堤防决溢,危害较大。兰州以上地区暴雨强度较小,洪水洪峰流量不大,历时较长。兰州至河口镇河段洪峰流量沿程减小。

河口镇至河南郑州桃花峪为黄河中游,干流河道长 1 206 km,流域面积 34.4 万 km^2 ,

汇入的较大支流有 30 条。河口镇至禹门口是黄河干流上最长的一段连续峡谷,水力资源很丰富,并且距电力负荷中心近,将成为黄河上第二个水电基地。禹门口至潼关简称小北干流,河长 132.5 km,河道宽浅散乱,冲淤变化剧烈。河段内有汾河、渭河两大支流相继汇入。该河段两岸是渭北及晋南黄土台塬,塬面高出河床数十至数百米,共有耕地 2 000 多万亩(1 亩 = $1/15 \text{ hm}^2$),是陕、晋两省的重要农业区,但干旱缺水制约着经济的稳定发展。三门峡至桃花峪区间的小浪底以上,河道穿行于中条山和崤山之间,是黄河最后一段峡谷;小浪底以下河谷逐渐展宽,是黄河由山区进入平原的过渡地段。

黄河中游的黄土高原,水土流失极为严重,是黄河泥沙的主要来源地区。在进入三门峡站的 11.2 亿 t 泥沙中,主要来自河口镇以下,其中有 6.8 亿 t 左右来自河口镇至龙门区间,占来沙量的 61%;有 3.3 亿 t 来自龙门至三门峡区间,占来沙量的 30%。黄河中游的泥沙,年内分配十分集中,90% 以上的泥沙集中在汛期;年际变化悬殊,最大年输沙量是最小年输沙量的 13 倍。

桃花峪以下为黄河下游,干流河道长 786 km,流域面积 2.3 万 km^2 ,汇入的较大支流只有 3 条。下游河道是在长期排洪输沙的过程中淤积塑造形成的,河床普遍高出两岸地面。沿黄平原受黄河频繁泛滥的影响,形成以黄河为分水岭脊的特殊地形。目前,黄河下游河床已高出大堤背河地面 4 ~ 6 m,比两岸平原高出更多,严重威胁着广大平原地区的安全。

利津以下为黄河河口段,随着黄河入海口的淤积—延伸—摆动,入海流路相应地发生改道变迁。

1.1.2 地形地貌

黄河流域横跨青藏高原、内蒙古高原、黄土高原和华北平原四个地貌单元。流域地势西高东低,大致分为三个阶梯。

第一级阶梯是流域西部的青藏高原,位于著名的世界屋脊——青藏高原的东北部,海拔 3 000 ~ 5 000 m,有一系列的西北—东南向山脉,山顶常年积雪,冰川地貌发育。青海高原南沿的巴颜喀拉山绵延起伏,是黄河与长江的分水岭。祁连山脉横亘高原北缘,构成青海高原与内蒙古高原的分界。主峰高达 6 282 m 的阿尼玛卿山,耸立中部,是黄河流域最高点,山顶终年积雪。黄河河源区及其支流黑河、白河流域,地势平坦,多为草原、湖泊及沼泽。

第二级阶梯大致以太行山为东界,海拔 1 000 ~ 2 000 m。本区内白于山以北属内蒙古高原的一部分,包括黄河河套平原和鄂尔多斯高原,白于山以南为黄土高原、秦岭山地及太行山地。

河套平原西起宁夏下河沿,东至内蒙古托克托,长达 900 km,宽 30 ~ 50 km,海拔 900 ~ 1 200 m,地势平坦,土地肥沃,灌溉发达,是宁夏和内蒙古自治区的主要农业生产基地。河套平原北部的阴山山脉和西部的贺兰、狼山犹如一道屏障,阻挡着阿拉善高原的腾格里、乌兰布和巴丹吉林等沙漠向黄河流域腹地的侵袭。

鄂尔多斯高原位于黄河河套以南,北、东、西三面被黄河环绕,南界长城,面积约为13万 km^2 ,海拔1 000~1 400 m,是一块近似方形的台状干燥剥蚀高原。高原内风沙地貌发育,北缘为库布齐沙漠,南部为毛乌素沙漠,河流稀少,盐碱湖众多。高原边缘地带是黄河粗泥沙的主要来源区之一。

黄土高原西起日月山,东至太行山,南靠秦岭,北抵鄂尔多斯高原,海拔1 000~2 000 m,是世界上最大的黄土分布地区。地貌类型有黄土塬、梁、峁、沟等。黄土高原地表起伏变化剧烈,相对高差大,黄土层深厚,组织疏松,地形破碎,植被稀少,水土流失严重,是黄河中游洪水和泥沙的主要来源地区。黄土高原中的汾渭盆地,系地堑式构造盆地,经黄土堆积与河流冲积而成。汾渭盆地地面平坦,土地肥沃,灌溉历史悠久,是晋、陕两省的富庶地区。

横亘黄土高原南部的秦岭山脉,是我国亚热带和暖温带的南北分界线,也是黄河与长江的分水岭,对于夏季来自南方的暖湿气流、冬季来自偏北方向的寒冷气流,均有巨大的障碍作用。耸立在黄土高原与华北平原之间的太行山,是黄河流域与海河流域的分水岭,也是华北地区一条重要的自然地理分界线。本区流域周界的伏牛山、外方山及太行山等高大山脉,是来自东南海洋暖湿气流深入黄河中上游地区的屏障,对黄河流域及我国西部的气候都有影响。由于这一地区的地表对水汽抬升有利,暴雨强度大,产流汇流条件好,是黄河中游洪水主要来源之一。

第三级阶梯自太行山以东至滨海,由黄河下游冲积平原和鲁中丘陵组成。黄河下游冲积平原是华北平原的重要组成部分,面积达25万 km^2 ,海拔多在100 m以下。本区以黄河河道为分水岭,黄河以北属海河流域,黄河以南属淮河流域。区内地面坡度平缓,排水不畅,洪、涝、旱、碱灾害严重。鲁中丘陵由泰山、鲁山和沂蒙山组成。一般海拔在200~500 m,少数山地在1 000 m以上。

1.1.3 气候气象

黄河流域位于我国北中部,幅员辽阔,山脉众多,东西高低悬殊,各区地貌差异也很大。又由于流域处于中纬度地带,受大气环流和季风环流影响的情况比较复杂,因此流域内不同地区气候的差异显著,气候要素的年、季间的变化大,东南部基本属湿润气候,中部属半干旱气候,西北部为干旱气候。

流域的日照条件在全国范围内属于充足的区域,全年日照时数一般达2 000~3 300 h,全年日照百分率大多在50%~75%,仅次于日照最充足的柴达木盆地,而较黄河以南的长江流域广大地区普遍偏多1倍左右。年日照时数以青海高原为最高,大部分在3 000 h以上,其余地区一般在2 200~2 800 h。

流域的太阳总辐射量在全国介于中间状况,北纬 37° 以北地区和东经 103° 以西的高原地带,为130~160 $\text{kcal}/(\text{cm}^2 \cdot \text{a})$;其余大部分地区为110~130 $\text{kcal}/(\text{cm}^2 \cdot \text{a})$ 。虽然不及国内西南部,但普遍多于东北地区和黄河以南地区,尤其是青藏高原地区辐射较强,为我国辐射强区。

黄河流域气温的年较差比较大,总趋势是北纬 37° 以北地区在 $31 \sim 37^{\circ}\text{C}$,北纬 37° 以南地区大多在 $21 \sim 31^{\circ}\text{C}$ 。流域气温的日较差也比较大,尤其在中上游的高纬度地区,全年各季气温的日较差为 $13 \sim 16.5^{\circ}\text{C}$,均处于国内的高值区或次高值区。流域内日平均气温 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 出现天数的分布,基本由东南向西北递减,最小为河源区,出现日数小于 10 d,积温接近于 0°C ;最大为黄河中下游河谷平原地区,出现日数 230 d 左右,积温达 $4\,500^{\circ}\text{C}$ 以上。流域内日平均气温 $\leq -10^{\circ}\text{C}$ 出现日数的分布,基本由东南向西北递增,最小的为黄河中下游河谷平原地带,最大的为河源区。黄河流域初霜日由北至南、从西向东逐步开始,并且同纬度的山区早于平原、河谷和沙漠。如黄河上游唐乃亥以上初霜日平均在 8 月中下旬,而黄河中下游一般在 10 月上中旬,流域其余地区在 9 月。流域终霜日迟早的分布特点与初霜日正好相反,黄河下游平原地区较早,平均在 3 月下旬,而上游唐乃亥以上地区则晚至 8 月上中旬,其余地区介于两者之间。

黄河流域冬季几乎全部在蒙古高压控制下,盛行偏北风,有少量雨雪,偶有沙暴;春季蒙古高压逐渐衰退;夏季主要在大陆热低压的范围内,盛行偏南风,水汽含量丰沛,降雨量较多;秋季秋高气爽,降水量开始减少。

黄河流域多年平均降水量 446 mm,总的趋势是由东南向西北递减,降水量最多的是流域东南部湿润半湿润地区,如秦岭、伏牛山及泰山一带年降水量达 $800 \sim 1\,000\text{ mm}$;降水量最少的是流域北部的干旱地区,如宁蒙河套平原年降水量只有 200 mm 左右。流域大部分地区年降水量在 $200 \sim 650\text{ mm}$,中上游南部和下游地区多于 650 mm 。尤其受地形影响较大的南界秦岭山脉北坡,其年降水量一般可达 $700 \sim 1\,000\text{ mm}$,而深居内陆的西北宁夏、内蒙古部分地区,其年降水量却不足 150 mm。降水量分布不均,南北降雨量之比大于 5,这是我国其他河流所不及的。流域冬干春旱,夏秋多雨,其中 6~9 月降水量占全年的 70% 左右;盛夏 7~8 月降水量可占全年降水总量的 40% 以上。流域降水量的年际变化悬殊,年降水量的最大值与最小值之比为 $1.7 \sim 7.5$,变差系数 C_v 变化在 $0.15 \sim 0.4$ 。流域内大部分地区旱灾频繁,历史上曾经多次发生遍及数省、连续多年的严重旱灾,危害极大。

黄河流域水面蒸发量随气温、地形、地理位置等变化较大。兰州以上气温较低,年均水面蒸发量 790 mm;兰州至河口镇区间,气候干燥,降雨量少,多沙漠干旱草原,年均水面蒸发量 1 360 mm;河口镇至龙门区间,水面蒸发量变化不大,年均水面蒸发量 1 090 mm;龙门至三门峡区间面积大,范围广,从东到西,横跨 9 个经度,下垫面、气候条件变化较大,年均水面蒸发量 1 000 mm;三门峡到花园口区间年均水面蒸发量 1 060 mm;花园口以下黄河冲积平原年均水面蒸发量 990 mm。

1.1.4 河流水系

黄河干流河道全长 5 464 km,穿越青藏高原、内蒙古高原、黄土高原和华北平原等地貌单元,受地形地貌影响,河道蜿蜒曲折,素有“黄河九曲十八弯”之说。黄河流域支流众多,其中集水面积大于 $1\,000\text{ km}^2$ 的一级支流有 76 条(上游 43 条,中游 30 条,下游 3 条),大于 1 万 km^2 的一级支流有 10 条。黄河流域集水面积大于 1 万 km^2 的一级支流基本特征值见表 1.1-1。

表 1.1-1 黄河流域集水面积大于 1 万 km² 的一级支流基本特征值

河流 名称	集水 面积 (km ²)	起点	终点	干流 长度 (km)	平均 比降 (‰)	多年平均径流量	
						把口站	径流量 (亿 m ³)
湟水	32 863	青海省海晏县洪呼日尼哈	甘肃省永靖县上车村	373.9	4.16	民和 + 享堂	49.48
洮河	25 227	青海省河南蒙古族自治县	甘肃省临洮县 红旗乡沟门村	673.1	2.80	红旗	48.26
祖厉河	10 653	甘肃省通渭县华家岭	甘肃省靖远方家滩	224.1	1.92	靖远	1.53
渭河	134 766	甘肃省渭源县鸟鼠山	陕西省潼关县港口村	818.0	1.27	华县 + 湫头	89.89
清水河	14 481	宁夏原州区开城乡 黑刺沟脑	宁夏中宁县泉眼山	320.2	1.49	泉眼山	2.02
大黑河	17 673	内蒙古卓资县十八台乡	内蒙古托克托县	235.9	1.42	三两	3.31
无定河	30 261	陕西省定边县	陕西省清涧县 解家沟镇河口村	491.2	1.79	白家川	11.51
伊洛河	18 881	陕西省蓝田县	河南省巩义市巴家门	446.9	1.75	黑石关	28.32
汾河	39 471	山西省宁武县东寨镇	山西省河津市黄村乡 柏底村	693.8	1.11	河津	18.47
沁河	13 532	山西省平遥县黑城村	河南省武陟县南贾村	485.1	2.16	武陟	13.00

注:多年平均径流量为 1956 ~ 2000 年系列均值。

1.1.5 土地资源

黄河流域土地资源丰富,光热资源匹配较好,在全国社会经济生态发展格局中占有重要的地位。黄河流域总土地面积 11.9 亿亩(含内流区),占全国国土面积的 8.3%,其中大部分为山区和丘陵,分别占流域面积的 40% 和 35%,平原区仅占 17%。由于地貌、气候和土壤的差异,形成了复杂多样的土地利用类型,不同地区土地利用情况差异很大,流域内共有耕地 2.44 亿亩,人均耕地 2.16 亩,约为全国农村人均耕地的 1.4 倍。大部分地区光热资源充足,农业生产发展潜力很大。流域内有林地 1.53 亿亩、牧草地 4.19 亿亩。林地主要分布在中下游,牧草地主要分布在上中游,林牧业发展前景广阔。全流域还有宜于开垦的荒地约 3 000 万亩,主要分布在黑山峡至河口镇区间的沿黄台地(约 2 000 万亩)和黄河河口三角洲地区(约 500 万亩),是我国开发条件较好的后备耕地资源。

此外,黄河下游河道两侧现有海河流域漳卫河平原区和徒骇马颊河平原区、淮河流域的淮河中游区、沂沭泗河区以及山东半岛沿海诸河等流域外的引黄灌区土地面积 6.56 万 km²,有效灌溉面积约 3 700 万亩,是全国最大的自流灌区,主要由黄河供水。

1.1.6 矿产资源

黄河流域矿产资源丰富,在全国已探明的 45 种主要矿产中,黄河流域有 37 种。具有全国性优势的有稀土、石膏、玻璃用石英岩、铌、煤、铝土矿、钼、耐火黏土等 8 种;具有地区性优势的有石油、天然气和芒硝 3 种;具有相对优势的有天然碱、硫铁矿、水泥用灰岩、钨、铜、岩金等 6 种。

黄河流域成矿条件多样,矿产资源既分布广泛,又相对集中,为开发利用提供了有利条件。流域内有兴海—玛沁—迭部区、西宁—兰州区、灵武—同心—石嘴山区、内蒙古河套地区、晋陕蒙接壤地区、晋中南地区、渭北区、豫西—焦作区及下游地区等 9 个资源集中区,可以形成各具特色和不同规模的生产基地,进行集约化开采利用。流域内有色金属矿产成分复杂,共生、伴生多种有益成分,综合开发利用潜力大。

黄河流域的能源资源十分丰富,中游地区的煤炭资源、中下游地区的石油和天然气资源,在全国占有极其重要的地位,被誉为我国的“能源流域”。已探明煤产地(或井田)685 处,保有储量 4 492 亿 t,占全国煤炭储量的 46.5%,预测煤炭资源总储量约 1.5 万亿 t。黄河流域的煤炭资源主要分布在内蒙古、山西、陕西、宁夏 4 省(自治区),具有资源雄厚、分布集中、品种齐全、煤质优良、埋藏浅、易开发等特点。在全国已探明储量超过 100 亿 t 的 26 个煤田中,黄河流域有 11 个(宁夏鸳鸯湖—盐池煤田,内蒙古东胜煤田、准格尔煤田,山西大同煤田、宁武煤田、河东煤田、太原西山煤田、霍西煤田、沁水煤田,陕西黄陇煤田、陕北侏罗纪煤田)。流域内已探明的石油、天然气主要分布在胜利、中原、长庆和延长 4 个油区,储量分别为 41 亿 t 和 672 亿 m³,分别占全国总地质储量的 26.6% 和 9%,其中胜利油田是我国的第二大油田。

1.1.7 社会经济

黄河流域涉及青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南和山东 9 省(自治区)的 66 个市(地、州、盟)340 个县(市、旗、区),其中有 267 个县(市、旗、区)全部位于黄河流域,有 73 个县(市、旗、区)部分位于黄河流域。

黄河流域共有建制市 59 个,其中地级市 29 个,县级市 30 个。其中,特大城市 5 个,分别为兰州市、包头市、西安市、太原市和洛阳市;大城市 6 个,分别为西宁市、银川市、呼和浩特市、宝鸡市、咸阳市和泰安市;中等城市 13 个;小城市 35 个。

另外,黄河下游流域外的引黄灌区还涉及河南、山东两省的 15 个地市 75 个县(区),人口约 4 700 万人。

黄河流域总人口为 11 448 万人,占全国总人口的 8.5%,其中城镇人口为 5 293 万人,城镇化率为 46.2%。全流域人口密度为 144 人/km²,高于全国平均水平。流域内的人口空间分布不均,分布态势主要与当地的气候、地形、水资源和人口密集的城镇等条件密切相关,流域内 70% 左右的人口集中在龙门以下河段,而龙门以下河段的流域面积仅占全流域面积的 32% 左右。

黄河流域 2012 年国内生产总值为 3.59 万亿元,占全国 GDP 的 7% 左右,人均 GDP 为 3.14 万元。

黄河流域已初步形成了工业门类比较齐全的格局,建立了一批工业基地和新兴城市,为进一步发展流域经济奠定了基础,煤炭、电力、石油和天然气等能源工业,具有显著的优势。形成了以包头、太原等城市为中心的全国著名的钢铁生产基地和铝生产基地,以宁夏、内蒙古、山西、陕西、甘肃、河南等省(自治区)为中心的煤炭重化工生产基地,建成了我国著名的中原油田和胜利油田以及长庆和延长两个油气田。西安、太原、兰州等城市机械制造、冶金工业等也有很大发展。

黄河流域的农业生产具有悠久的历史,是我国农业经济开发最早的地区,河套平原、汾渭盆地和下游平原是我国重要的农业基地。黄河流域总耕地面积为2.07亿亩,有效灌溉面积0.79亿亩。黄河上中游地区还有宜农荒地约3000万亩,占全国宜农荒地总量的30%,是我国重要的后备耕地储备区域,只要水资源条件具备,开发潜力很大。

此外,黄河下游流域外的引黄灌区耕地面积约5764万亩,农田有效灌溉面积约3700万亩,是我国重要的粮棉油生产基地,多年来在保证豫鲁两省粮棉油稳产高产、天津市城市供水安全保障方面均发挥着重要作用。

黄河流域主要作物有小麦、玉米、谷子、棉花、油料、烟叶等,尤其是小麦、棉花等农产品在全国占有重要地位。主要农业基地多集中在平原及河谷盆地,广大山丘区的坡耕地粮食单产较低,人均粮食产量低于全国平均水平。据统计,2012年黄河流域粮食总产量4371万t,人均占有粮食382kg。

1.2 黄河水资源及其特点

1.2.1 黄河水资源

1.2.1.1 地表水资源量

黄河流域的地表水资源量是指河川径流量。以现代科学技术为基础的黄河水文观测始于1919年,当时在黄河干流的陕县和冻口设立了两处水文站。1933年发生大洪水后,1934年又在干流的兰州、包头、龙门等地设立水文站,为黄河年径流量的分析研究提供了条件。从1944年开始,已先后有黄河年径流量的成果提出。

从黄河流域年径流深等值线来看,黄河流域水资源的地区分布很不均匀,由南向北呈递减趋势。大致西起吉迈,过积石山,到大夏河、洮河,沿渭河干流至汾河与沁河的分水岭一线以南,主要是山地,植被较好,年平均降水量大于600mm,年径流深在100~200mm以上,是黄河流域水资源较丰沛的地区。流域北部,经皋兰、海原、同心、定边到包头一线以北,气候干燥,年降水量小于300mm,年径流深在10mm以下,是黄河流域水资源最贫乏的地区。在以上两条线之间的广大黄土高原地区,年降水量一般为400~500mm,年径流深只有25~50mm,水土流失严重,是黄河泥沙的主要来源区。

根据1919~1975年的56年系列资料统计,黄河花园口站多年平均实测径流量为470亿 m^3 ,多年平均天然径流量为559亿 m^3 。计入花园口以下支流金堤河、天然文岩渠、大

汶河的天然年径流量约 21 亿 m^3 , 黄河流域多年平均天然径流总量约为 580 亿 m^3 。

根据 2002 年开展的全国水资源规划工作的统一要求, 水资源调查评价的时段为 1956 ~ 2000 年, 经资料一致性处理后, 黄河流域多年平均河川天然径流量 534.8 亿 m^3 (利津断面), 相应径流深 71.1 mm。

黄河流域河川水资源的主要特点如下:

(1) 水资源贫乏。黄河流域面积占全国国土面积的 8.3%, 而年径流量只占全国的 2%。流域内人均水量 474 m^3 , 为全国人均水量的 22%; 耕地亩均水量 220 m^3 , 仅为全国耕地亩均水量的 16%。再加上流域外的供水需求, 人均占有水资源量更少, 是全国水资源贫乏地区之一。

(2) 径流年内分配集中。干流及主要支流汛期 7 ~ 10 月径流量占全年的 60% 以上, 且支流的汛期径流量主要以洪水形式出现, 中下游汛期径流含沙量较大, 利用困难, 非汛期径流主要由地下水补给, 含沙量小, 大部分可以利用。

(3) 径流年际变化大。干流断面最大年径流量一般为最小年径流量的 3.1 ~ 3.5 倍, 支流一般达 5 ~ 12 倍。黄河自有实测资料以来, 相继出现了 1922 ~ 1932 年、1969 ~ 1974 年、1990 ~ 2000 年的连续枯水段, 三个连续枯水段平均河川天然径流量分别相当于多年均值的 74%、84% 和 83%。

(4) 地区分布不均。黄河河川径流大部分来自兰州以上, 年径流量占全河的 61.7%, 而流域面积仅占全河的 28%; 龙门至三门峡区间的流域面积占全河的 24%, 年径流量占全河的 19.4%; 兰州至河口镇区间产流很少, 河道蒸发渗漏强烈, 流域面积占全河的 20.6%, 年径流量仅占全河的 0.3%。

1.2.1.2 地下水资源量

黄河流域地下水资源量主要指矿化度不大于 2 g/L 的浅层地下水, 即可以参与水循环且可逐年更新的动态水量。按照 2002 年开展的全国水资源规划工作的统一要求, 地下水资源调查评价的时段为 1980 ~ 2000 年。根据对 1980 ~ 2000 年的近期下垫面条件下的黄河流域地下水资源量的调查分析评价, 黄河流域多年平均地下水资源量为 376.0 亿 m^3 , 其中矿化度不超过 1 g/L 的地下水资源量为 350.7 亿 m^3 , 占 93%, 矿化度 1 ~ 2 g/L 的地下水资源量为 25.3 亿 m^3 , 占 7%; 山丘区地下水资源量为 263.3 亿 m^3 , 平原区地下水资源量为 154.6 亿 m^3 , 山丘区与平原区之间的重复计算量为 41.9 亿 m^3 。平原区 1980 ~ 2000 年的平均年地下水可开采量为 119.4 亿 m^3 , 主要分布于上游兰州—河口镇区间和中游龙门—三门峡区间。

1.2.1.3 水资源总量

根据 1956 ~ 2000 年系列的水资源调查评价成果, 黄河流域水资源总量 647.0 亿 m^3 。其中, 现状下垫面条件下的利津站多年平均河川天然径流量 534.8 亿 m^3 , 地表水与地下水之间不重复计算量 111.3 亿 m^3 。黄河干支流主要水文断面水资源量的统计具体见表 1.2-1。

表 1.2-1 黄河干支流主要水文断面水资源量统计

站名(或河段)	集水面积 (万 km ²)	河川天然 径流量 (亿 m ³)	地下水资源量 (亿 m ³)	地表水与地下水 不重复量 (亿 m ³)	水资源总量 (亿 m ³)
唐乃亥	12.2	205.1	81.1	0.5	205.6
唐乃亥—兰州	10.06	124.8	55.2	1.6	126.4
兰州	22.26	329.9	136.3	2.1	332.0
兰州—河口镇	16.34	1.8	46.2	22.7	24.5
河口镇	38.6	331.7	182.5	24.8	356.5
河口镇—龙门	11.16	47.4	35.1	18.7	66.1
龙门	49.76	379.1	217.6	43.5	422.6
龙门—三门峡	19.08	103.6	91.0	36.6	140.2
三门峡	68.84	482.7	308.6	80.1	562.8
三门峡—花园口	4.16	50.1	35.4	8.0	58.1
花园口	73.00	532.8	344	88.1	620.9
花园口—利津	2.19	2.0	24.1	15.4	17.4
利津	75.19	534.8	368.1	103.5	638.3
内流区	4.31	0	7.8	7.8	7.8
黄河流域	79.50	534.8	376.0	112.2	647.0

注:表中数字由于四舍五入的影响,可能存在分项和总计不够吻合的现象。

1.2.1.4 天然水质

黄河干流大部分河段天然水质良好,pH 值一般为 7.5~8.2,呈弱碱性。流域内河川径流的矿化度、总硬度分布由东南向西北呈递增趋势。大部分地区为矿化度 300~500 mg/L 的适度硬水。达日至久治黄河干流两侧,黑、白河流域,洮河上游,渭河南岸秦岭北坡,伊洛河上游,以及大汶河流域等地区,为矿化度小于 300 mg/L 的软水地区。兰州至石嘴山右岸的祖厉河、清水河、苦水河等支流,北洛河的支流葫芦河上游,泾河的西川上游,山西涑水河等地区,为矿化度大于 1 000 mg/L 的极硬水地区,其中以甘肃祖厉河最高,这些地区的水体中含有大量的氯离子和硫酸根离子,水质苦涩,人畜不能饮用。高含氟水源主要分布在内蒙古包头、陕西定边及宁夏盐池等干旱地区,氟病的发病率较高。

黄河以多泥沙著称于世,干支流的高含沙水流可使水的色度、浑浊度增加,破坏水体的观感性状指标,降低水中的溶解氧和光照度,影响鱼类等生物的正常生长。泥沙本底含有砷,造成黄河水体含砷量过高,但由于泥沙本身含有相当数量的黏土矿物和有机、无机胶体,所以泥沙具有较强的吸附作用,可以吸附某些污染物质,起到“净化”水质的作用。

1.2.2 黄河水资源的特点

1.2.2.1 水资源总量贫乏

黄河流域年径流量主要由大气降水补给。因受大气环流的影响,降水量较少,而蒸发能力很强,黄河多年平均天然年径流量 580 亿 m^3 ,仅相当于降水总量的 16.3%,产水系数很低。

黄河流域面积占全国国土面积的 8.3%,人口占全国总人口的 12%,耕地占全国耕地总面积的 15%,但黄河天然径流量仅占全国河川径流总量的 2.2%,居全国七大江河的第 4 位,小于长江、珠江、松花江。水资源总量仅为全国水资源总量的 2.5%;流域内人均水资源总量为 647 m^3 ,不到全国人均水资源总量的 30%;耕地亩均水资源总量 290 m^3 ,仅为全国亩均年径流量水平的 20%。如果包括流域外的黄河下游广大引黄地区,黄河供水区人均水资源总量降低为 471 m^3 ,低于国际通用的水资源极度紧缺标准 500 m^3 ,耕地亩均水资源总量 251 m^3 ,人均和耕地亩均水量均居全国七大江河流域的第 6 位,仅略高于海河流域,可见黄河水资源量并不丰富。

1.2.2.2 输沙、生态环境用水及流域外供水任务重

黄河挟带泥沙数量之多,居世界首位。平均每年输入黄河下游的泥沙达 16 亿 t,年平均含沙量 37.8 kg/m^3 ,一些多沙支流洪峰含沙量高达 300 ~ 500 kg/m^3 ,并且 60% 的水量和 80% 的泥沙都集中在每年的汛期。黄河的高含沙量极大地增加了其水资源开发利用的难度。由于输沙量大、含沙量高而导致的河道持续淤积和河槽萎缩已成为危及黄河健康生命的首要问题。减缓河道淤积强度,必须保持必要的输沙水量和流量过程。按照多年平均输沙入海水量 210 亿 m^3 的底限要求,黄河河川径流的开发利用率不能高于 60%。

黄河流域的干旱半干旱区域面积占全流域面积的 32% 以上,其中侵蚀强度大于 5 000 $\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 的多沙区面积达 21 万 km^2 ,这些地区生态环境脆弱,生态环境保护建设特别是多沙粗沙区的水土保持建设都需要一定的水量。按照《黄土高原地区水土保持淤地坝规划》,规划规模的淤地坝建成后将减少入黄水资源量 43 亿 ~ 55 亿 m^3 ,占淤地坝控制流域面积内水资源总量的 52% ~ 66%。

黄河向流域外供水的任务非常繁重。2000 ~ 2008 年,天津市和河北省累计引用黄河水量达 50.81 亿 m^3 ,年均 5.65 亿 m^3 ;黄河下游豫鲁两省的引黄灌区及流域外的天津市、河北省的远距离调水等耗水规模已达全河地表耗水量的 30% 左右,其比例在北方主要河流中是最大的。

1.2.2.3 径流时空分布不均、连续枯水时段长

因受季风型气候的影响,黄河流域河川径流的季节性变化很大。夏秋河水暴涨,容易泛滥成灾,冬春水量很小,水源匮乏,径流的年内分配很不均匀。7 ~ 10 月的汛期,干流及较大支流的径流量占全年径流量的 60% 左右,而每年 3 ~ 6 月,径流量只占全年的 10% ~ 20%。陇东、宁南、陕北、晋西北等黄土丘陵干旱半干旱地区的一些支流,径流集中的特点更为明显,汛期径流量占全年径流量的比值高达 80% ~ 90%,有些支流每年春季基本呈断流状态。如皇甫川 1972 年 7 月的一次洪水总量就占当年全年径流量的 69%;窟野河温家川水文站,1976 年汛期测得最大流量达 14 000 m^3/s ,而非汛期最小流量仅 0.64