

流域水循环与水资源演变丛书

东江、黄河、辽河流域 地表水文过程模拟及 水利工程水文效应研究

张 强 张正浩 孙 鹏 著



科学出版社

流域水循环与水资源演变丛书

东江、黄河、辽河流域地表 水文过程模拟及水利工程 水文效应研究

张 强 张正浩 孙 鹏 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书研究不同流域径流过程的模拟和预测,构建合适的模型,研究径流模拟与预测精度和不确定性,同时,针对受人类活动如修建大坝、水库等干扰下的不同流域地表水文过程,探讨人类活动影响前后流域丰枯遭遇、洪水频率、重现期及水生态的情况,从而对流域径流过程和水生态过程有全面的认识,并为实际生产生活提供科学的依据。

本书适合水文水资源、资源环境等相关专业的研究者使用,亦可作为有关院校本科生和研究生的教材。

图书在版编目(CIP)数据

东江、黄河、辽河流域地表水文过程模拟及水利工程水文效应研究 / 张强, 张正浩, 孙鹏著. —北京: 科学出版社, 2019.6

(流域水循环与水资源演变丛书)

ISBN 978-7-03-061659-3

I. ①东… II. ①张… ②张… ③孙… III. ①流域—水文模型—研究—中国 IV. ①P334

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 116810 号

责任编辑: 周 丹 沈 旭 石宏杰 / 责任校对: 杨聪敏

责任印制: 师艳茹 / 封面设计: 许 瑞

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>

三河市春园印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019 年 6 月第 一 版 开本: 720 × 1000 1/16

2019 年 6 月第一次印刷 印张: 10 3/4

字数: 220 000

定价: 129.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

目 录

第 1 章 绪论	1
参考文献	3
第 2 章 研究区域概况	5
2.1 东江流域自然地理概况	5
2.1.1 地理位置	5
2.1.2 地形地貌	5
2.1.3 气候特征	5
2.1.4 自然灾害	6
2.1.5 社会经济概况	6
2.1.6 水利工程概况	7
2.2 黄河流域自然地理概况	8
2.2.1 地理位置	8
2.2.2 地貌条件	9
2.2.3 气候水文特征	9
2.2.4 河流水系	10
2.2.5 自然灾害情况	10
2.2.6 社会经济概况	12
2.3 辽河流域自然地理概况	12
2.4 数据来源	12
参考文献	14
第 3 章 东江流域变异分析	15
3.1 序列初步诊断	16
3.2 序列详细诊断	22
3.3 成因调查分析	25
参考文献	26
第 4 章 东江流域基准期径流模拟与预测	27
4.1 研究方法	27
4.1.1 GR4J 水文模型	27
4.1.2 多元线性回归	28

4.1.3	神经网络	29
4.1.4	支持向量机	30
4.1.5	最小二乘支持向量机	30
4.1.6	自适应神经模糊推理系统	30
4.1.7	泰森多边形法	30
4.1.8	反距离权重法	31
4.1.9	普通克里金插值法	31
4.1.10	相关系数	31
4.1.11	均方根误差	32
4.1.12	纳什系数	32
4.2	基准期单因子径流预测研究	32
4.2.1	日径流预测模型构建	32
4.2.2	日径流预测结果	35
4.2.3	日径流预测模型精度评价	41
4.2.4	月径流预测模型构建	45
4.2.5	月径流预测结果	45
4.2.6	月径流预测模型精度评价	46
4.3	东江流域基准期多因子径流模拟研究	48
4.3.1	日径流模拟模型构建	48
4.3.2	日径流模拟结果	50
4.3.3	日径流模拟模型精度评价	54
4.3.4	月径流模拟模型构建	55
4.3.5	月径流模拟结果	56
4.3.6	月径流模拟模型精度评价	58
	参考文献	60
第5章	东江流域模型精度及其径流不确定性分析	61
5.1	研究方法	62
5.1.1	小波分析	62
5.1.2	GLUE 方法	62
5.1.3	自助小波人工神经网络	64
5.1.4	交叉验证	64
5.1.5	覆盖指数	65
5.2	单因子径流预测模型精度研究	65
5.2.1	母小波选取	65
5.2.2	小波人工神经网络日径流预测小波等级选取及模型构建	66

5.2.3 小波人工神经网络日径流预测	69
5.2.4 小波人工神经网络月径流预测小波等级选取及模型构建	73
5.2.5 小波人工神经网络月径流预测	73
5.3 多因子径流模拟模型精度研究	75
5.3.1 母小波选取	75
5.3.2 小波人工神经网络日径流模拟小波等级选取及模型构建	76
5.3.3 小波人工神经网络日径流模拟	77
5.3.4 小波人工神经网络月径流模拟小波等级选取及模型构建	77
5.3.5 小波人工神经网络月径流模拟	78
5.4 数学统计模型径流不确定性分析	79
5.4.1 Bootstrap-WANN 模型在单因子日径流预测不确定性分析	79
5.4.2 Bootstrap-WANN 模型构建	79
5.4.3 Bootstrap-WANN 模型预测结果分析	80
5.4.4 Bootstrap-WANN 模型预测精度分析及不确定性评价	85
5.5 数学统计模型精度不稳定性研究	87
5.5.1 5 折交叉验证 W-ANN 模型不稳定性研究	87
5.5.2 5 折交叉验证 W-ANN 模型构建	88
5.5.3 5 折交叉验证 W-ANN 模型预测结果	89
5.6 水文模型参数不确定性研究	92
参考文献	98
第 6 章 水利工程对流域水文过程影响及水生态效应研究	99
6.1 研究方法	99
6.1.1 边缘分布	100
6.1.2 边缘分布函数的假设检验方法	102
6.1.3 丰枯遭遇情况划分	102
6.1.4 两变量的联合概率分布	102
6.1.5 二维 Copula 联合分布函数	103
6.1.6 逐月频率算法	103
6.2 东江流域丰枯遭遇及洪水频率分析	104
6.2.1 东江流域丰枯遭遇分析	105
6.2.2 东江流域洪水频率分析	108
6.3 东江流域 1974~2009 年径流模拟过程分析	112
6.4 东江流域 1974~2009 年河流生态径流过程分析	115
参考文献	117

第7章 东江流域非一致性径流预测研究	119
7.1 研究方法	120
7.1.1 “三因素”归因分析方法	120
7.1.2 确定性成分还原方法	122
7.2 径流序列归因分析	123
7.3 径流序列还原及模型构建	125
7.4 非一致性条件下东江流域单因子月径流预测	127
参考文献	128
第8章 基于人工神经网络模型的黄河干流水文变异后径流预测	129
8.1 建模期、验证期和模拟期	129
8.2 模型建立和参数率定	130
8.2.1 BP神经网络模型的建立	130
8.2.2 GRNN网络模型的建立	130
8.3 模型精度评定方法	131
8.4 结果与讨论	131
8.4.1 人类活动和气候变化对黄河流域径流的影响	131
8.4.2 模型建模精度分析	132
8.4.3 BP神经网络模拟结果	135
参考文献	139
第9章 黄河流域水文变异后生态径流指标的改变及对生物多样性的影响	140
9.1 黄河流域生态径流指标的变化	140
9.2 黄河流域生态径流的变化对生物多样性的影响	143
参考文献	146
第10章 黄河流域生态径流指标与IHA指标的比较及水文整体改变程度的评价	147
10.1 黄河流域生态径流指标与IHA指标比较	147
10.2 黄河流域水文整体改变程度的评价	149
第11章 辽河流域丰枯遭遇下水库生态调度研究	153
11.1 研究方法	153
11.1.1 边缘分布选择和参数估计	153
11.1.2 二维Copula联合分布函数和非参数估计	153
11.1.3 生态径流及计算方法	154
11.2 结果	154
11.2.1 边际最优分布函数的确定	154
11.2.2 最优Copula函数的确定	155

11.2.3 丰枯遭遇分析	156
11.2.4 辽河流域水库最小生态径流评价分析	158
11.2.5 辽河流域水库调度分析	159
参考文献	163

第1章 绪 论

径流过程模拟与预测是地表水文学中重要的研究领域之一,构建合适的模型,研究径流模拟与预测精度及其不确定性,是探讨水文过程形成机理、阐述成因等相关理论研究的关键,同时研究成果可以为工业需水、农业灌溉、防洪等提供重要科学依据,相关研究已成为当前国际水文科学研究的前沿与热点^[1-5]。可靠精确的径流模拟与预测不仅有利于水资源开发与管理,其中长期的径流模拟与预测更可为水库及其水力发电的操作提供指导依据^[6]。常用于径流模拟与预测的模型可分为两类,一类是水文模型,另一类是数学统计模型。水文模型需要复杂的数据量,利用多因子驱动模型对径流进行模拟与预测。数学统计模型一般分为多因子和单因子两种,在数据充足的情况下,可以把影响径流的因素(如降水、蒸发等)作为输入变量,径流量作为输出变量进行多因子径流模拟与预测;当研究流域只有径流数据时,可使用径流量滞后因子作为输入变量进行单因子径流的模拟与预测。数学统计模型有利于解决数据缺乏流域的水文模拟与预测问题,且易于操作、模拟效率高^[7]。同时,相比传统水文模型所需复杂的数据量,单因子径流模拟与预测对研究数据要求较低,且经济实效^[4]。

然而,尽管数学统计模型具有实效性和便利性,此类方法未对不同时间尺度数据(小时尺度到年尺度)进行优化预处理^[4],基于此,混合模型(hybrid model)的概念得以提出。混合模型由数据预处理方法结合数据统计模型组成,常用的数据预处理方法包括粒子群优化算法(particle swarm optimization, PSO)、遗传算法(genetic algorithm, GA)及小波分析(wavelet analysis),它们组成的混合模型不仅拥有预处理算法的优点,而且结合了数学统计模型的长处,可以有效提高预测精度^[8,9]。

在径流模拟与预测中,模型不确定性对模拟或者预测结果造成的影响也是国内外学者研究的热点^[10-19]。影响径流模拟与预测结果的模型不确定性有3个因素:①数据不确定性(数据的质量和代表性);②模型精度不确定性(模型存在过拟合情况);③参数不确定性(模型参数的合适值)^[10]。传统水文模型不确定性主要体现在参数不确定性上^[14-19],数学统计模型不确定性主要体现在数据不确定性上^[11-13],分别研究水文模型和数学统计模型的不确定性,对实际水文管理决策有重要意义。

过去的径流模拟与预测是建立在径流一致性的条件下,然而 Milly 2008 年发

表在 *Science* 的文章中提出,在当前气候变化和人类活动条件下,径流一致性已被破坏,过去基于径流一致性的研究理论和方法无法揭示水资源演变的规律^[20]。因此,必须对序列进行趋势和突变诊断,划分序列基准期和变异期,并对径流序列进行还原^[21],利用还原的径流序列来进行径流模拟与预测。

东江流域地处我国低纬度亚热带区域,气候温和,雨量丰沛,年径流量年内变化较大,夏季最丰,冬季最少,流域 70%~80% 的年降水量和年径流量集中在每年的 4~9 月。东江流域是河源、惠州、东莞、广州、深圳及香港 3000 多万人口的水源地。香港 80% 的年淡水需求量通过粤港供水工程从东江获取。东江水利水电开发强度极大,截至 2019 年,流域内兴建了大中小型水电站 700 余座,包括流域三大控制性水库(新丰江水库是广东第一大水库,于 1962 年竣工;枫树坝水库是广东第二大人造湖,于 1973 年竣工;白盆珠水库位于东江支流西枝江上游,于 1984 年竣工)和干流 12 座梯级电站,显著影响地表水文过程。

较多的水电工程和高程度的水资源开发利用状况,共同导致东江流域地表径流产生非一致性的影响^[22-24]。在非一致性条件下,东江流域 4 个重要水文站点(龙川、河源、岭下、博罗)径流均受到一定程度的变异,其变异情况会对流域管理造成一定的影响。研究非一致性的条件下径流的模拟与预测,同时研究水文模型与数学统计模型在不同条件下的适用性,并对模型的精度及不确定性进行分析,进而分析流域地表径流变化情况,对于研究保护流域生态、维持流域生态系统健康,进而保证流域供水安全具有重大意义。由此,本书首先使用前人分析序列趋势和变异的方法对东江流域 4 个重要水文站点序列进行变异诊断,划分序列为基准期和变异期^[24]。使用水文模型和数学统计模型对基准期径流进行模拟与预测,并分析模型的精度和不确定性,然后选取 4 个重要水文站点实测径流数据与基准期率定的模型所得的模拟数据,系统研究东江流域水利工程对地表水文过程及其生态效应的影响,最后根据径流还原的方法还原东江流域非一致性径流,并对还原径流进行预测。本书系统地阐述了流域非一致性条件下径流模拟与预测的全过程,结果可为其他流域径流模拟与预测的研究提供思路和依据。

随着经济社会的发展和人口的增加,水资源已成为 21 世纪以来黄河流域及其相关地区的一个突出问题。黄河是中国第二大河,是西北和华北地区的重要水源地,作为耕地、人口和大城市的供水系统,在中国的国民经济和社会发展中处于重要的战略地位,同时也是经济和社会的可持续发展和西部大开发战略的重要保证和支撑。黄河是中国的水问题较大的河流之一,其中最严重的问题是水资源的短缺和生态环境的恶化,因为下游的“悬河”而出现洪水威胁。随着流域经济的高速发展,人类对水资源的需求越来越大,而从短期来看,黄河流域水资源短缺的基本特征不会改变。

近年来,黄河流域水资源状况有不断恶化的趋势,径流断流的现象频繁发生。

例如,在1997年,黄河下游断流天数达226天,而中下游的一些支流已成为典型的季节性河流,大部分河流在黄河水文站实测数据记录达到了有实测数据以来的最枯记录。渭河华县段、汾河河津段、伊洛河黑石关段、沁河武陟段等支流在20世纪90年代实测径流量比多年平均实测径流量减少了39.9%~58.4%^[25]。下游入海径流的减少使黄河三角洲湿地地区海岸侵蚀和海平面上升、地表植被退化、近海水域的生物资源量和生物多样性减少^[26],如何定量评估气候变化和人类活动对这种水文变化的影响及对流域生态环境造成的风险是我国政府和流域管理部门普遍关注的重要问题之一^[27]。

水资源短缺是辽宁的基本省情,水资源总量逐年减少、时空分布不均、开发利用程度高是辽宁的基本水情。根据辽宁水资源东多西少的分布现状,由源头、北线和南线三线水库组成的“东水济西”水资源配置格局,能有效解决辽宁水资源短缺问题。在水库丰枯遭遇研究中,枯水月水库间易发生枯枯型遭遇,枯枯型遭遇发生时,水库入库流量较少,当水库间入库径流皆低于最小生态径流标准时,水库无法对各自调水城市进行供水调度,从而对城市用水造成极大影响。因此,研究源头、北线和南线三线水库间丰枯遭遇,对入库流量作定量生态分析,不仅可以为辽河流域城市间输水用水提供解决方案,而且能避免水库径流生态系统因调水而受到破坏,其研究结果对维系辽河流域水库生态系统平衡及辽宁城市水资源配置具有重大意义。

参 考 文 献

- [1] Milly P C D, Dunne K A, Vecchia A V. Global pattern of trends in streamflow and water availability in a changing climate[J]. *Nature*, 2005, 438 (7066): 347-350.
- [2] Yaseen Z M, Fu M, Wang C, et al. Application of the hybrid artificial neural network coupled with rolling mechanism and grey model algorithms for streamflow forecasting over multiple time horizons[J]. *Water Resources Management*, 2018: 1-17.
- [3] Shafaei M, Kisi O. Predicting river daily flow using wavelet-artificial neural networks based on regression analyses in comparison with artificial neural networks and support vector machine models[J]. *Neural Computing and Applications*, 2017, 28 (1): 15-28.
- [4] Nourani V, Baghanam A H, Adamowski J, et al. Applications of hybrid wavelet-Artificial Intelligence models in hydrology: A review[J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 514: 358-377.
- [5] Yaseen Z M, Ebtehaj I, Bonakdari H, et al. Novel approach for streamflow forecasting using a hybrid ANFIS-FFA model[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 554: 263-276.
- [6] Ravansalar M, Rajaee T, Kisi O. Wavelet-linear genetic programming: A new approach for modeling monthly streamflow[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 549: 461-475.
- [7] Shiri J, Kisi O. Short-term and long-term streamflow forecasting using a wavelet and neuro-fuzzy conjunction model[J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 394 (3-4): 486-493.
- [8] Wu C L, Chau K W, Li Y S. Predicting monthly streamflow using data-driven models coupled with data-

- preprocessing techniques[J]. Water Resources Research, 2009, 45 (8): 1-23.
- [9] Wang W, Van G P, Vrijling J K, et al. Forecasting daily streamflow using hybrid ANN models[J]. Journal of Hydrology, 2006, 324 (1-4): 383-399.
- [10] 严登华, 袁喆, 王浩, 等. 水文学确定性和不确定性方法及其集合研究进展[J]. 水利学报, 2013, 44 (1): 73-82.
- [11] 宋文博, 卢文喜, 董海彪, 等. 基于 Bootstrap 法的水文模型参数不确定分析——以伊通河流域为例[J]. 中国农村水利水电, 2016, (10): 95-99.
- [12] Tiwari M K, Chatterjee C. Uncertainty assessment and ensemble flood forecasting using bootstrap based artificial neural networks (BANNs) [J]. Journal of Hydrology, 2010, 382 (1): 20-33.
- [13] Tiwari M K, Adamowski J F. An ensemble wavelet bootstrap machine learning approach to water demand forecasting: A case study in the city of Calgary, Canada[J]. Urban Water Journal, 2017, 14 (2): 185-201.
- [14] 王中根, 夏军, 刘昌明, 等. 分布式水文模型的参数率定及敏感性分析探讨[J]. 自然资源学报, 2007, (4): 649-655.
- [15] 王旭滢, 包为民, 孙逸群, 等. 基于 Copula-GLUE 的新安江模型次洪参数不确定性分析[J]. 水力发电, 2018, 44 (1): 9-12.
- [16] 任政, 盛东. 基于多目标 GLUE 算法的新安江模型参数不确定性研究[J]. 水电能源科学, 2016, 34 (3): 15-18+43.
- [17] 张太衡, 武新宇, 孙倩莹. 基于径流模型参数不确定性的防洪风险分析[J]. 水力发电学报, 2017, 36 (9): 31-39.
- [18] Alaa A A, Lü H, Zhu Y. Assessing the Uncertainty of the Xinanjiang Rainfall-Runoff Model: Effect of the Likelihood Function Choice on the GLUE Method[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2015, 20 (10): 04015016.
- [19] Tongal H, Booij M J. Quantification of parametric uncertainty of ANN models with GLUE method for different streamflow dynamics[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2017, 31 (4): 993-1010.
- [20] Milly P C D, Betancourt J, Falkenmark M, et al. Stationarity is dead: Whither water management?[J]. Science, 2008, 319 (5863): 573-574.
- [21] 谢平, 陈广才, 雷红富, 等. 水文变异诊断系统[J]. 水力发电学报, 2010, 29 (1): 85-91.
- [22] 谢平, 张波, 陈海健, 等. 基于极值同频率法的非一致性年径流过程设计方法——以跳跃变异为例[J]. 水利学报, 2015, 46 (7): 828-835.
- [23] 顾西辉, 张强, 陈晓宏, 等. 气候变化与人类活动联合影响下东江流域非一致性洪水频率[J]. 热带地理, 2014, 34 (6): 746-757.
- [24] 李析男. 变化环境下非一致性水资源与洪旱问题研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2014.
- [25] 王玉明, 张学成, 王玲, 等. 黄河流域 20 世纪 90 年代天然径流量变化分析[J]. 人民黄河, 2002, (3): 9-11.
- [26] 崔树彬, 高玉玲, 张绍峰, 等. 黄河断流的生态影响及对策措施[J]. 水资源保护, 1999, (4): 23-26.
- [27] 王国庆. 气候变化对黄河中游水文水资源影响的关键问题研究[D]. 南京: 河海大学, 2006.

第2章 研究区域概况

2.1 东江流域自然地理概况

2.1.1 地理位置

东江发源于江西省寻乌县桎髻钵山，流经龙川县、东源县、紫金县、惠城区、博罗县至东莞市的石龙，分南北两水道入狮子洋。干流由东北向西南流，河道长度至石龙为 520km，至狮子洋为 562km，分水岭高程为 1101.9m。流域面积为 35340km²，石龙以上流域面积为 27040km²，占珠江流域面积的 5.96%，是珠江三大水系之一^[1,2]。

2.1.2 地形地貌

东江流域内分布着大致平行的三列山脉，自东北向西南斜贯全区，三列山脉从西至东依次为九连山、罗浮山、梅江和东江分水岭。东南还有粤东莲花山脉。新丰江、东江、秋香江、西枝江顺次分布其间。中、北部为丘陵山地，南部为东江三角洲、低洼地、缓坡台地和沿江平原。

东江流域北部山区最广，统称九连山脉，其南端一段为粤赣两省天然边界，主峰在连平县东，高程约 1300m。南部山脉分列在东江两岸，右岸自河源西南的桂山（高程约 1256m）至博罗的罗浮山（高程约 1280m）成一长列，走向为西北至东南。左岸则分两列，一列为介于西枝江与海丰县之间的莲花山、茅山顶，两者均高达 1336m，为流域中广东省境内的最高山峰；另一列为西枝江与秋香江的分水岭，高度稍低，亦高达 1000m 以上，如 1186m 的鸟禽山、1125m 的鸡笼山，走向均为东北至西南。

东江流域地势东北部高，西南部低。高程在 50~500m 的丘陵及低山区约占 78.1%，高程在 50m 以下的平原地区约占 14.4%，高程在 500m 以上的山区约占 7.5%。

2.1.3 气候特征

东江流域地势北高南低，有利于暖湿空气的辐合抬升，因此，流域降水较为

丰富。流域内多年平均雨量为 1750mm, 降雨在面上的分布一般是中下游比上游多, 西南多, 东北少, 由南向北递减。

因受亚热带季风气候的影响, 东江流域降雨年内分配不均, 流域 70%~80% 的年降雨量和年径流量集中在每年 4~9 月, 其余时间基本为枯水季节。流域降雨以南北冷暖气团交绥的锋面雨为主, 多发生在 4~6 月; 其次是热带气旋雨, 多发生在 7~9 月。因此年内降雨量分布基本呈双峰型, 第一个高峰值一般发生在前汛期的 6 月; 第二个高峰值一般发生在后汛期的 8 月。汛期 (4~9 月) 的降雨量占全年的大部分, 各地均达 80% 左右。大部分地方前汛期降雨量大于后汛期, 占年降雨量的 50% 左右。

受海洋性气候影响, 流域内年气温变化不大, 但地区变化较大。在北部山区冬季有冰雪, 西南部较为罕见。多年平均气温为 20~22℃。一年中最热为 7 月, 平均气温 28~31℃, 绝对最高温度达 39.6℃ (龙川站, 1980 年 7 月), 最冷为 1 月, 平均气温为 9.7~11℃, 绝对最低温度为 -5.4℃ (连平县, 1955 年 1 月 22 日)。无霜期长, 北部山区无霜期年平均为 275d, 南部无霜期长达 350d。多年平均日照时间在 1680~1950h。

流域多年平均水面蒸发量在 1000~1400mm, 1956~2000 年平均水面蒸发量约为 1100mm。区域分布西南多, 东北少。

2.1.4 自然灾害

东江流域自然灾害有洪涝、旱、潮、咸、风及水土流失等。其中, 洪涝和旱为主要灾害。东江流域自 1198 年 (宋庆元四年) 至 1987 年的 790 年中, 发生较大洪水灾害 133 次, 平均 6 年发生一次, 大洪灾约 9 年发生一次。据不完全统计, 受灾面积超 6.67 万 hm^2 的特大洪灾有: 1833 年、1915 年、1923 年、1934 年、1947 年、1953 年、1959 年、1964 年、1973 年及 1979 年等, 其中, 1959 年受灾面积最大, 达到 14.74 万 hm^2 , 其次依次为 1953 年、1915 年、1947 年和 1923 年^[3]。

中华人民共和国成立后, 1957 年发生最大涝灾, 其面积达 4.36 万 hm^2 , 其次是 1959 年和 1961 年。最大旱灾发生在 1977 年, 受旱面积达 21.13 万 hm^2 , 占东江流域总耕地面积的 56.3%, 其次是 1963 年, 受灾面积达 18.66 万 hm^2 。

2.1.5 社会经济概况

东江流域行政区划包括江西省的安远、定南、寻乌、龙南, 广东省的龙川、和平、河源、惠州、博罗、东莞、龙门、深圳等 20 个县市, 东江直接肩负着河源、惠州、东莞、广州、深圳及香港 3000 多万人口的生产、生活、生态用水。河源、

惠州、东莞、广州、深圳五市的人口约占广东省总人口的 50%，国内生产总值（Gross Domestic Product, GDP）占全省 GDP 总量的 70%，在全省政治、社会、经济中具有举足轻重的地位。东江流域是一个关联度高、整体性强的区域，东江水资源已成为香港和东江流域地区的政治之水、生命之水、经济之水^[4]。

2.1.6 水利工程概况

流域内建有大型水库 5 宗，分别为新丰江、枫树坝、白盆珠、天堂山和显岗水库，中型水库 50 宗，总库容为 185.36 亿 m^3 ，各种小型及以下水库 840 宗，大型、中型、小型及以下水库年供水总量 13.97 亿 m^3 。已建引水工程 6108 宗，年供水量 9.32 亿 m^3 。已建成机电排灌工程 129 宗，共装机 9.82 万 kW，其中电灌装机 34941kW、电排装机 55207kW、提水装机 8086kW，年供水量 1.5 亿 m^3 。大的跨流域引水工程有东江—深圳供水工程、深圳东部引水工程、广州东部引水工程等。

东江流域大型水库与中型水库控制约 51% 的流域水资源，尤其是新丰江、枫树坝和白盆珠三大控制性水库，总库容分别位列全省大型水库的第一、第二、第五位，总库容合计达 170.48 亿 m^3 ，其中兴利库容合计 81.26 亿 m^3 ，对东江全流域的水资源有控制性的调蓄作用。三大水库均位于东江一级支流上，新丰江水库总库容 139.8 亿 m^3 ，控制集雨面积 5370 km^2 ，库容系数为 0.99，属多年调节水库，原设计任务以发电为主，结合防洪、航运等功能；枫树坝水库总库容 19.4 亿 m^3 ，控制集雨面积 5150 km^2 ，库容系数为 0.28，为不完全年调节水库，原设计任务以航运为主，结合发电、防洪等功能；白盆珠水库总库容 12.2 亿 m^3 ，控制集雨面积 856 km^2 ，库容系数为 0.33，具有不完全多年调节性能，原设计任务以防洪、灌溉为主，结合发电、航运等功能。

天堂山水库，位于增江上游龙门县北部天堂山乡，是一座以防洪为主，兼顾灌溉、发电、养殖、旅游的综合水利工程。工程于 1978 年 7 月始建，1992 年 8 月竣工。总库容 2.43 亿 m^3 ，控制集雨面积 461 km^2 ，水电站装机容量 1.95 万 kW。水库的建成，使增江中下游的增城、博罗等县区的 37.5 万亩^①农田免受洪水灾害的威胁，新增灌溉面积 8.9 万亩，改善灌溉面积 21 万亩。

显岗水库，位于博罗县罗阳镇西北 19km 处。1959 年冬兴建，1963 年底竣工，总库容 1.38 亿 m^3 ，控制集雨面积 295 km^2 。设计灌溉面积 10.5 万亩，防洪保护面积 20.3 万亩。水电站装机容量 0.1 万 kW，年发电量 350 万 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 以上。显岗水库是一座以灌溉、防洪并重，兼顾发电、水产养殖综合效益的水库。

① 1 亩 $\approx$ 666.7 m^2 。

东江流域水利工程建设基本情况和五大控制性水库基本情况见表 2-1 和表 2-2。

表 2-1 东江流域水利工程建设基本情况

基本情况	广州	东莞	深圳	惠州	河源	韶关	合计
一级支流/条	1	1	0	10	14	0	26
大型水库/宗	0	0	0	3	2	0	5
中型水库/宗	6	8	4	19	12	1	50
大型水闸/宗	0	4	0	1	0	0	5
1 万亩以上堤防/宗	4	2	0	17	0	0	23
梯级电站/个	0	1	0	2	11	0	14

表 2-2 东江流域五大控制性水库基本情况

水库	总库容/亿 m ³	控制集雨面积/km ²	库容系数	用途
枫树坝水库	19.4	5150	0.28	以航运为主，结合发电、防洪等功能
新丰江水库	139.8	5370	0.99	以发电为主，结合防洪、航运等功能
白盆珠水库	12.2	856	0.33	以防洪、灌溉为主，结合发电、航运等功能
天堂山水库	2.43	461		以防洪为主，兼顾灌溉、发电、养殖、旅游
显岗水库	1.38	295		以灌溉、防洪并重，兼顾发电、水产养殖综合效益

另外，东江干流的梯级开发共规划为 14 个梯级水电站，从河源龙川到东莞石龙，枫树坝以下，由上游往下分别是：龙潭水电站、稔坑水电站、罗营口水电站、苏雷坝水电站、枕头寨水电站、柳城水电站、蓝口水电站、黄田水电站、木京水电站、风光水利枢纽、沥口水电站、下矾角水电站、剑潭水电站（东江水利枢纽）、石龙水电站。其梯级总装机容量为 53.91 万 kW，多年平均发电量为 21.30 亿 kW·h，总投资为 63.95 亿元。目前，已经建好的有龙潭水电站、稔坑水电站、罗营口水电站、枕头寨水电站、蓝口水电站、木京水电站、风光水利枢纽和剑潭水电站；而苏雷坝水电站、柳城水电站、黄田水电站、沥口水电站则正在建设中；下矾角水电站、石龙水电站 2 个梯级电站则在规划中，并未开始建设。

2.2 黄河流域自然地理概况

2.2.1 地理位置

黄河干流长 5464km，流域总面积 79.5 万 km²（其中含内流区面积 4.2 万 km²）。

黄河流域大部分地区都位于中国的西北部，河套平原和宁夏平原是由黄河水灌溉而成的。经纬度范围为东经 $95^{\circ}53' \sim 119^{\circ}05'$ ，北纬 $32^{\circ}10' \sim 41^{\circ}50'$ 。黄河是世界第六大长河，同时也是中国的第二大长河。起源于青藏高原，最后汇流入渤海。支流贯穿了青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、山西、陕西、河南和山东 9 省（自治区），涉及 393 个县。黄河上游和中游的分界点是内蒙古的河口县，中游和下游的分界点是河南省的旧孟津。

2.2.2 地貌条件

黄河流域土地辽阔，同时地形和地貌的差异也较大。由西向东横跨四个地貌单元，分别为青藏高原、内蒙古高原、黄土高原和黄淮海平原。

黄河流域地势特征表现为西高东低，西部的河源地区平均海拔在 4km 以上，主要是由连绵的高山组成，而且常年积雪，在超过 5km 的山峰上，古冰川地貌发育；中部地区的海拔在 1500m 左右，主要为黄土地貌，水土流失较为严重；东部地区主要由黄河冲积平原组成，水资源匮乏，地下水水质较差。河床高出两岸地面，形成“悬河”，洪水威胁比较大。

2.2.3 气候水文特征

黄河流域的东部濒临海洋，西部则为内陆，因此降水、蒸发、光热资源等气候条件差异很明显。流域内的气候类型大致可以归纳为干旱、半干旱和半湿润气候，西部地区比较干旱，而东部地区则显得湿润。流域大部分地区年降水量在 200~650mm，年降水量平均为 478mm，多年年平均蒸发量在 700~1800mm。黄河流域 6~10 月的降水量占全年的 65%~85%，最大暴雨主要发生在 7~8 月。流域内的平均气温各地区也表现出较大的差异，上游在 $1 \sim 8^{\circ}\text{C}$ ，中游在 $8 \sim 14^{\circ}\text{C}$ ，下游在 $12 \sim 14^{\circ}\text{C}$ 。黄河流域的无霜期较短，下游无霜期为 200~220d，中游为 150~180d，上游久治以上地区平均不足 20d。

流域的水文特征比较鲜明，上游降水历时很长，但是强度较小，因此洪水径流洪峰小总量大；中游降水则历时比较短，但是强度较大，因此形成的洪水径流洪峰高，总量小，容易陡涨陡落，形成暴雨洪水，所以造成的危害较大。而对黄河防洪安全威胁最大的洪水则发生在夏秋两季，即伏秋大汛，其次就是冬季的凌汛。

黄河流域的水土流失面积达 43 万 km^2 ，黄土高原区水土流失现象极为严重，黄河的泥沙大部分来自于黄土高原。据悉，黄河每年下泄的泥沙达 16 亿 t，而其中 90%都来自于黄土高原。主要的产沙区在太行山以西、日月山以东的黄土高原