

生态水资源规划

傅长锋 李发文 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

生态水资源规划

傅长锋 李发文 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书以生态水文理念为导向，从降雨出发，剖析流域蓝水量和绿水量，将蓝水量和绿水量统筹为流域的水资源总量。利用 GIS 和遥感技术，基于“三水”（降水、蓝水、绿水）转化理念，将需水量分为社会经济需水量和生态环境需水量两大部分，探讨人类生活、工业生产、粮食生产以及各种林草植物的真实耗水量。以子牙河流域为试验区，建立流域生态水资源规划的新理念，通过设置基于 ET 的流域水资源规划方案，消除水资源对经济、社会、环境的消极影响，从而实现协调发展和良性循环。

全书共分 9 章，包括绪论、流域生态环境现状分析、流域降雨与蒸发分析、流域需水分析、基于生态水文循环的“三水”转化、基于 ET 的流域水资源评价、流域社会经济需水量规划、流域生态修复规划、流域水资源协调度综合评价。

本书主要应用领域为流域生态水资源规划、生态环境评价、生态需水量核算、流域水文循环过程模拟、产业结构调整规划等。可供从事水利综合规划、建设与管理的研究人员、工程技术人员以及高等院校相关专业师生阅读参考。

图书在版编目（C I P）数据

生态水资源规划 / 傅长锋，李发文著. -- 北京：中国水利水电出版社，2016.1
ISBN 978-7-5170-3927-3

I. ①生… II. ①傅… ②李… III. ①生态系统—水资源—水利规划 IV. ①TV212

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第313304号

审图号：GS（2015）2799 号

书 名	生态水资源规划
作 者	傅长锋 李发文 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 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	北京嘉恒彩色印刷有限责任公司
规 格	184mm×260mm 16 开本 15.25 印张 368 千字 4 插页
版 次	2016 年 1 月第 1 版 2016 年 1 月第 1 次印刷
印 数	0001—1000 册
定 价	68.00 元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

流域是人类生活的主要生境，由水资源-社会经济-生态环境组成的复合系统构成。社会经济系统和生态环境系统以水资源为基础，因此，水资源的开发利用势必会涉及社会、经济、生态和环境等方面的因素。长期以来，水资源的开发利用主要考虑农业、工业和生活用水等方面的经济效益，过量的开发河流水和占用水资源的生态空间，而对维护生态环境平衡所需要的用水方面则没有给予足够的重视。正是由于这种忽视，在水资源的开发利用过程中，已经造成了水环境、水生生态严重破坏的不良后果。这种传统意义的水资源规划已不能满足流域内社会经济的协调发展。同时，传统的水资源管理是以工程水文技术为主，但实际上，水资源循环过程是水文与生态耦合的过程，因此，正确管理水资源的方法应该建立在生态系统格局和过程的水文学机制基础之上。

“生态水文学”是在寻求解决合理持续利用水资源的实践中形成的一门交叉应用的学科，是实现水资源可持续管理的一种新方法。生态水文学新方法的核心内容是将降水视为由人类与自然共同分享的淡水资源，认为最根本的水资源是降水，而不仅仅是河川径流。将降水分为绿水和蓝水：绿水是指陆地水文循环中的气态水流或总的蒸腾蒸发量，它包括来自植物截留、地表、水面和土壤的非生产性蒸发和源自植物蒸腾、促进植物生长的生产性蒸腾，显然源自降水的绿水支撑着陆地生态系统；蓝水是指陆地水循环中的液态水流，它包括降水形成的地表径流和地下水补给，即径流性水资源，它是支撑水域生态系统的基本水源。

传统水资源规划的目的是控制水的需求，并对有限的径流性水资源进行优化配置，水资源评价通常是计算降水自然分割后产生的径流性水资源量，即蓝水量。这种仅以流域出口处实测径流量为依据评价水资源，可能忽略了上游降水量分割产生的蓝水，这些蓝水可能在到达流域出口之前已经转化为绿水，这通常是流域内提取蓝水用于消耗性用水造成的，使得流域出口处测得的径流量远小于真实的水资源量。

水资源供需平衡分析是目前进行水资源规划和管理中经常使用的分析方法。但供需平衡中都没有对区域总的水消耗 ET 加以限制。虽然需水管理限制

了从自然水体中取水的数量，而且也迫使每种用途的用水效率得以提升，但由于发展的需要，人们可能会使用需水管理中节省下来的水或经过处理的再生水扩大经济规模，从而可能使可利用的水资源消耗殆尽。

本书采用生态水文的系统分析方法研究流域水资源规划。将绿水概念引入到水资源评价中，通过对水资源-社会经济-生态环境复合系统综合分析，提出区域可持续发展的模式。从分析降雨着手，引入基于 MODIS 遥感叶面积指数的 Penman-Monteith (P-M) 模型，将遥感技术与 P-M 阻力模型结合起来，计算流域的陆域蒸发量，通过对比分析器测折算法、气候模型计算法和经验公式法，最终确定采用 Penman 模型计算水面蒸发量，从而获得流域的总耗水量。

生态水文学理论下的水资源规划是基于耗水平衡分析确定出耗水量与需水量的关系，在需水量确定方面，将其划分为社会经济需水和生态环境需水两大部分。为了获得流域内蓝水和绿水时空分布情况，以流域分布式水文模型 (SWAT 模型) 为工具平台，构建流域降水-蓝水-绿水的“三水”水文转化模型，对流域水资源的供需态势进行评价，依据供需态势评价结果，分别设置社会经济需水规划和生态修复规划。对于社会经济需水规划，通过调整种植结构、节水灌溉制度、产业结构、居民生活用水、水源结构等措施，降低流域的耗水量，遏制流域地下水的超采。对于生态修复规划，通过退耕还林还草、库塘湿地等管理措施，实现流域生态环境的修复。要实现流域水资源开发利用的可持续，就要协调好水资源、社会经济、生态环境之间的关系，以流域水资源可持续发展为基点，构建流域协调度评价体系，通过设置基于 *ET* 的流域水资源规划方案，消除水资源对经济、社会、环境的消极影响，同时促进相互协同关系，从而实现协调发展和良性循环。

本书在编写过程中，得到了河北省水利水电勘测设计研究院、天津大学建筑工程学院等有关单位的大力支持和帮助。全书由傅长锋、李发文编写，冯平教授，李大鸣教授和于京要教授级高工审定。参加本书编写的人员还有吴杰昭、穆冬靖、刘美丽等。

受时间和作者水平所限，书中难免存在错误和不足之处，恳请广大读者批评指正。

作 者

2015 年 12 月于天津

前言

第1章 绪论	1
1.1 水资源危机	1
1.2 生态水文学视角下的水资源	1
1.2.1 生态水文学	1
1.2.2 广义的水资源	2
1.2.3 绿水	3
1.3 科学的水资源规划	6
1.3.1 水资源系统与生态环境系统	7
1.3.2 生态环境系统与社会经济系统	8
1.3.3 社会经济系统与水资源系统	9
1.4 流域水资源规划体系框架	9
第2章 流域生态环境现状分析	12
2.1 流域概况	12
2.1.1 地理位置	12
2.1.2 河流水系	12
2.1.3 气象水文	12
2.1.4 土地利用及植被划分	13
2.1.5 区县分布	14
2.2 流域复合系统评价理论和方法	15
2.2.1 指标评分	15
2.2.2 计算权重	16
2.2.3 指标归一化	16
2.3 流域水资源及生态环境格局演变	17
2.3.1 建立评价指标体系	17
2.3.2 指标值的获取	17
2.3.3 指标值的量化	20
2.4 基准年流域内县市水资源生态复合系统评价	21
2.4.1 评价单元	22

2.4.2	评价指标的选取	22
2.4.3	指标定量化	28
2.4.4	评价结果	28
第3章	流域降雨与蒸发分析	32
3.1	流域降水	32
3.1.1	降水特征值统计	32
3.1.2	降水量年内变化	34
3.1.3	降水量年际分布	37
3.2	陆域蒸散发	39
3.2.1	模型介绍	39
3.2.2	数据来源及处理	46
3.2.3	模型计算流程	51
3.2.4	模型计算结果及分析	52
3.3	水面蒸发	59
3.3.1	理论介绍	59
3.3.2	研究对象	63
3.3.3	计算结果及分析	63
3.4	流域总蒸散发	73
3.5	蒸发与降水对比	75
第4章	流域需水分析	77
4.1	社会经济需水	77
4.1.1	城镇和农村生活需水量	77
4.1.2	农业生产需水量	82
4.1.3	工业和第三产业需水量	88
4.2	生态环境需水	91
4.2.1	河道生态需水量	92
4.2.2	城市水体需水量	93
4.2.3	水库生态需水量	95
4.2.4	植被生态需水量	97
4.2.5	地下水回补需水量	98
第5章	基于生态水文循环的“三水”转化	101
5.1	“三水”转化理念	101
5.2	“三水”转化分布式水文模型	102
5.2.1	SWAT模型地表径流模拟方法	102
5.2.2	SWAT模型蒸散发模拟方法	104
5.2.3	SWAT模型土壤水模拟方法	106
5.2.4	SWAT模型地下水模拟方法	107

5.3	模型应用与计算	109
5.3.1	模型数据准备与预处理	109
5.3.2	模型构建	112
5.3.3	模型校准和验证	114
5.4	基准年模型计算结果统计汇总	123
5.4.1	降雨量统计结果	124
5.4.2	蓝水量统计结果	125
5.4.3	绿水量统计结果	128
5.4.4	土壤含水量统计结果	135
5.5	规划年模型计算结果统计汇总	137
5.5.1	降雨量统计结果	137
5.5.2	蓝水量统计结果	138
5.5.3	绿水量统计结果	141
5.5.4	土壤含水量统计结果	150
第6章	基于 <i>ET</i> 的流域水资源评价	153
6.1	流域广义水资源量核算	153
6.1.1	蓝水量核算	153
6.1.2	绿水量核算	156
6.1.3	水资源总量核算	156
6.2	流域社会经济、生态环境需水量核算	159
6.2.1	社会经济需水量核算	159
6.2.2	生态环境需水量核算	163
6.3	水资源供需态势评价	163
6.3.1	基准年供需态势评价	164
6.3.2	规划年供需态势评价	164
第7章	流域社会经济需水量规划	166
7.1	基于 <i>ET</i> 的流域耗水平衡分析	166
7.1.1	基准年流域耗水平衡分析	166
7.1.2	规划年流域耗水平衡分析	167
7.2	流域自然 <i>ET</i> 分析	169
7.2.1	基准年流域自然 <i>ET</i> 分析	169
7.2.2	规划年流域自然 <i>ET</i> 分析	169
7.3	典型县耗水量削减方案	170
7.3.1	流域内典型县域选择	170
7.3.2	县域目标 <i>ET</i>	170
7.3.3	内丘县域协调发展方案	171
7.3.4	临城县域协调发展方案	172

7.4 流域水资源协调发展方案	173
7.4.1 总体目标	173
7.4.2 流域耗水量组成分析	173
7.4.3 地下水超采分布及栽培植被分布	174
7.4.4 流域高效用水技术	176
7.4.5 规划方案设置	177
7.4.6 方案实施效果分析	179
第8章 流域生态修复规划	184
8.1 修复目标	184
8.2 现状年和20世纪70年代土地利用图对比分析	184
8.3 流域水库建设情况	185
8.4 规划方案设置	186
8.5 方案实施效果分析	186
第9章 流域水资源协调调度综合评价	190
9.1 流域协调度评价方法	190
9.1.1 评价准则	190
9.1.2 评价因子	190
9.1.3 评价指标	191
9.1.4 评价指标体系的分级标准	191
9.1.5 评价指标权重的确定	193
9.2 传统水资源规划下的流域协调度评价	194
9.2.1 流域层面评价结果	194
9.2.2 流域内县域评价结果	195
9.3 社会经济需水规划下的流域协调度评价	203
9.3.1 流域层面评价结果	203
9.3.2 流域内县域评价结果	204
9.4 生态修复规划下的流域协调度评价	212
9.4.1 流域层面评价结果	212
9.4.2 流域内县域评价结果	212
附表 Poisson 矩形脉冲模型参数	220
参考文献	231

绪 论

1.1 水 资 源 危 机

水是人类及一切生物赖以生存的必不可少的重要物质,是工农业生产、经济发展和环境改善不可替代的极为宝贵的自然资源。随着社会经济的发展、人口的增长和人们生活水平的日益提高,对水资源的需求也越来越大。

中国是一个干旱缺水严重的国家。淡水资源总量为 28000 亿 m^3 , 占全球水资源的 6%, 仅次于巴西、俄罗斯和加拿大, 居世界第四位, 但人均只有 2300 m^3 , 仅为世界平均水平的 1/4、美国的 1/5, 在世界上名列 121 位, 是全球 13 个人均水资源最贫乏的国家之一。

扣除难以利用的洪水径流和散布在偏远地区的地下水资源后, 我国现实可利用的淡水资源量则更少, 仅为 11000 亿 m^3 左右, 人均可利用水资源量约为 900 m^3 , 并且其分布极不均衡。到 20 世纪末, 全国 600 多座城市中, 已有 400 多个城市存在供水不足问题, 其中比较严重的缺水城市达 110 个, 全国城市缺水总量为 60 亿 m^3 。

据监测, 当前全国多数地区地下水受到一定程度的点状和面状污染, 且有逐年加重的趋势。日趋严重的水污染不仅降低了水体的使用功能, 进一步加剧了水资源短缺的矛盾, 给我国正在实施的可持续发展战略带来了严重影响, 而且还严重威胁到饮水安全和人民群众的健康。

水利部预测, 2030 年中国人口将达到 16 亿, 届时人均水资源量仅有 1750 m^3 。在充分考虑节水情况下, 预计用水总量为 7000 亿~8000 亿 m^3 , 要求供水能力比当前增长 1300 亿~2300 亿 m^3 , 全国实际可利用水资源量接近合理利用水量上限, 水资源开发难度极大。

1.2 生态水文学视角下的水资源

1.2.1 生态水文学

随着与水有关的生态环境问题的日益突出, 生态环境保护备受当今社会的广泛关注, 人们越来越认识到与自然生态系统协调共处对人类可持续发展的重要性。水资源开发利用所导致的区域水文过程变化将不可避免地对该区域生态环境体系产生影响, 而区域生态环境变化, 尤其是植被生态系统的变化, 势必将对区域水文过程产生作用。面对全球水资源日益短缺的现实, 科学界正在寻找新的解决办法^[1]。现有的水文学理论已不能满足解决水资源短缺和持续管理水资源的要求, 这是因为: ①在过去的两个世纪里。人类活动已经严重引起水循环中最关键、最活跃的因子(植被)的退化; ②传统的水资源管理是以工程水文技术为主, 但实际上, 在某特定尺度水资源的循环是长期生物地球化学循环进化的结果^[2]。任何生态系统格局和生态过程的变化都与水文过程相关联, 因此, 正确管理水资源

的方法应该建立在对生态系统格局和过程的水文学机制深入了解的基础之上,这正是生态水文学的核心之所在。生态水文学正是在全球水资源短缺的背景下,寻求解决合理持续利用水资源的实践中形成的一门交叉应用学科。

生态水文学是20世纪90年代兴起的一门边缘学科,在全球水资源短缺的背景下,1992年在都柏林国际水与环境大会上作为一门独立的学科被提出来。随着水文循环的生物圈部分和联合国教科文组织主持的国际水文计划等国际项目的实施,生态水文过程研究得到迅速的发展和广泛的重视,成为当前研究的热点^[3-4]。生态水文学的概念首先由Zalewski等人提出,是指对地表环境中水文学和生态学相互关系的研究。在他后来的文章中认为生态水文学是在流域的尺度上,研究水文和生物相互功能关系的科学,是实现水资源可持续管理的一种新方法^[5]。同时指出气候、地形、植物群落和动态、人类活动的影响这四个因素决定了环境中水的动态变化,表明其在不同的环境中生态过程和水文过程之间的相互关系各不相同。Rodriguez^[6]认为生态水文学作为一门学科,是指在生态模式和生态过程的基础上,寻求水文机制的一门科学。在这些过程中,土壤水是时空尺度内连接气候变化和植被动态的关键因子。在他后来的研究中认为植物是生态水文学的核心内容。Nuttle^[7]认为生态水文学是生态学和水文学的亚学科,它所关心的是水文过程对生态系统配置、结构和动态的影响,以及生物过程对水循环要素的影响。这一定义聚焦于水文过程在生态系统所起的作用上,这与Rodriguez所提到的在生态模式和生态过程上研究水文机制的概念相一致。Hatton^[8]认为生态水文学需要在质量守恒和能量守恒定律的基础上,在周围环境不同的情况下,研究环境过程的机制。

2004年,瑞典水文学家Malin Falkenmark与Johan Rochstrom出版了一部关于生态水文学的专著——《Balancing Water for Humans and Nature: The New Approach in Ecohydrology》(《人与自然间的用水平衡:生态水文学新方法》)。该书围绕水循环、生态系统和降水等主要概念,分析全球尺度的淡水资源,重点是将淡水资源的功能及角色与生态系统服务有机地组合在一起,全面系统地介绍了管理水资源的新的生态学方法,并通过该生态水文学新方法试图在人类用水与自然用水之间找到一个平衡点。

Falkenmark提出的生态水文学新方法的核心内容是将降水视为由人类与自然共同分享的淡水资源,认为最根本的水资源是降水,而不仅仅是河川径流。提出将降水分为绿水和蓝水的概念,并在随后提出的生态水文学新方法中将此概念作为研究的切入点和理论基础^[9]。绿水是指陆地水文循环中的气态水流或总的蒸腾蒸发量,它包括来自植物截留、地表、水面和土壤的非生产性蒸发和源自植物蒸腾、促进植物生长的生产性蒸腾,显然源自降水的绿水支撑着陆地生态系统。蓝水是指陆地水循环中的液态水流,它包括降水形成的地表径流和地下水补给,即径流性水资源,它是支撑水域生态系统的基本水源^[10]。

1.2.2 广义的水资源

我国曾于20世纪70年代末、80年代初组织开展过全国第一次水资源调查评价工作,但因为这次评价总体上还比较粗,广度、深度不够,资料系列短,所以为了满足经济社会发展的需要,全国又相继开展了第二次水资源评价工作,针对第一次水资源评价中存在的问题进行了改进^[11]。但是水资源评价的对象仍主要集中于包括可见的地表水和地下水在

内的径流性水资源。

随着生态水文学这一交叉学科的兴起与发展，人们提出了新的理念来客观地对水资源进行评价。随着视野的不断开阔，人们把眼光扩展到不同赋存形式的水资源上来。水资源的评价对象逐渐从径流性水资源向以降水为整体的水资源方向发展。对水资源的概念及其内涵有众多的认识与理解，从狭义上讲，水资源是指人类在一定的经济技术条件下能够直接使用的淡水，以江河、湖海为代表的地表水和地下水为主；从广义上讲，水资源是指在一定的经济技术条件下能够直接或间接使用的各种水和水中的物质，在社会生活和生产中具有使用价值和经济价值的地球上各种水体都可以称为水资源，包括天上的雨雪、河湖中的水体、浅层和深层的地下水、土壤水、冰川、海水等。从水循环的全过程和水量平衡的全要素来看，应把降水看作水资源的总量，把绿水引入水资源的范畴中，作为广义水资源的一部分，应该从细微雨滴着手研究，而不仅仅是从江河、湖泊或含水层的蓝水开始，对涵盖了蓝水和绿水的广义水资源进行分别评价，进而达到对水资源的客观合理的评价目的。

流域内水资源量构成如图 1.1 所示。

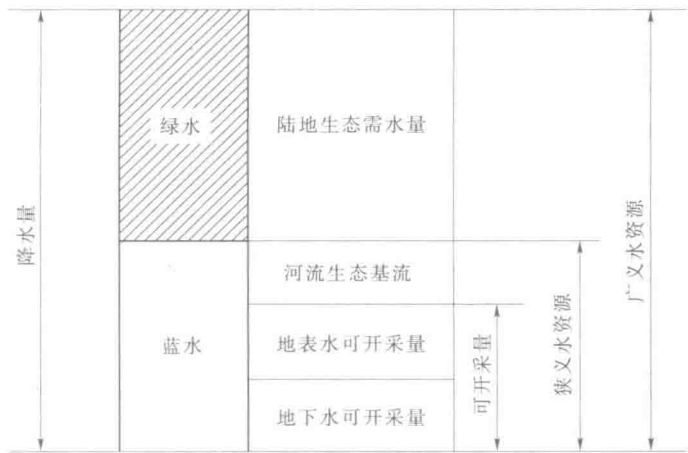


图 1.1 流域内水资源量构成

1.2.3 绿水

我国的绿水资源总量约为 3.4 万亿 m^3 ，占水资源总量的 54%。绿水是维持陆地生态系统景观协调和平衡的重要水源；支撑着雨养农业；维护地球陆地生态系统生产功能和服务功能，绿水作为水资源的一部分具有重要的作用，不容忽视^[12]。传统的水资源评估与管理只考虑了对社会和经济有用的地表水和地下水，即蓝水，却忽略了雨养农业与生态系统的重要绿水水源。在水资源日益稀缺、水环境持续恶化的今天，这种界定是不合理的，现今利用蓝水进行粮食生产的灌溉农业，只用了降水资源的 2%，影响到粮食安全和生态安全的水资源危机，只有在广义水资源的更大的框架内才有希望得到解决。把绿水引入水资源的范畴才是对水资源全面而更真实的理解。绿水概念的提出和评价方法的出现不仅为水资源评价管理提供了新的思路，还为现实意义上的可持续发展、人与自然和谐相处打下了基础^[13]。

在国外,绿水研究从科学家 Falkenmark 于 1995 年提出“绿水”概念以来,相对发展较快。在国内,人们对绿水的概念比较陌生,绿水的研究也较匮乏。从 2006 年刘昌明和李云成^[14]对绿水的内涵进行阐述,以及程国栋和赵文智^[15]对绿水及其研究进展进行总结介绍以来,国内与绿水有关的研究工作才逐渐发展起来。尽管在概念体系和评价方法上仍处于发展阶段,但绿水资源已在水资源评价和水文学研究中逐渐得到重视。

目前,国内外估算绿水的方法大致有四种^[16]:①利用生态系统生产干物质的需水量反求绿水资源,即用净初级生产力数据乘以主要生态系统生产单位干物质所需的蒸散量^[16-17];②根据典型生态系统蒸散发观测研究资料及空间信息估算绿水流^[18];③利用水文模型估算流域尺度的绿水流;④耦合植被动态、生态地理、生物地球化学和水文模型估算绿水流。上述方法的基本思想是:利用各种手段在所研究的区域上确定植被覆盖面积与植被蒸腾数据,计算出总蒸腾量。尽管已有的估算绿水量的方法种类很多,但大多所选研究范围(如全球区域大尺度)过大,使得估算精度不高,不便于绿水的规划与管理,或是虽然选取小尺度(流域尺度)进行研究,但缺乏精度较高的评估方法^[19];或是缺乏气候变化条件下的绿水评估^[20],再或者是虽然模拟效果比较好,但往往只针对流域内某一类植被进行研究,未考虑植被的多样性与空间分布的差异性,无法达到客观反映流域尺度绿水量及其时空变异特征对绿水流影响的目的。

针对上述问题,一些新的方法得到很大的发展与应用。运用 SWAT 分布式水文模型估算绿水资源是一种新兴的方法,SWAT 模型可以进行蓝水、绿水的分别估算并且能够反映出绿水的时空分布特征,已在国内外得到了成功的应用^[21]。SWAT 模型被认为是小尺度下进行绿水估算研究的有效办法,值得在中国推广使用^[22]。吴洪涛等^[19]以碧流河上游地区为研究区,利用 SWAT 水文模型在小尺度上建立了多角度评估绿水的方法。张杰等^[23]以青海省东北部的湟水流域为研究区,分析了该区蓝水、绿水随时间的变化规律及不同土地利用类型绿水的分布规律。甄婷婷等^[24]以伊洛河上游卢氏流域为研究区,构建 SWAT 模型研究了时段内各年蓝水、绿水资源量,并按照月尺度分析了时间分布规律,以及蓝水、绿水的空间分布规律。荣琨等^[22]运用 SWAT 模型对东南沿海晋江西溪流域的蓝水、绿水资源量进行了估算,分析了蓝水、绿水的组成和时间分布规律。

遥感由于其自身的优势与特点,近年来发展迅速,遥感技术与其他方法的结合应用为诸多科学和应用问题带来了全新的思路。目前遥感技术在水文学中的应用大致可以分为两种:①利用遥感资料推求下垫面的特征与变化,属于直接应用;②利用遥感资料进行有关参数与变量的推求,为其他技术手段提供数据支持,属于间接应用^[25-26]。遥感技术被认为是可以定量估算区域尺度蒸散发的唯一可能途径^[27-28]。陆面蒸发因气候的多变与陆地表层地形的多样性,很难做到准确的估算。遥感技术可以在较大区域上获得气象数据和水文数据,使得从植被多样性与空间分布的角度计算绿水量成为可能。目前,在较大区域上应用遥感技术估算地表的蒸散发主要有两种方法^[29]:①余项法,用遥感表面温度结合气温以及一系列阻抗公式计算显热通量,将潜热通量作为剩余项,从能量平衡公式中求出,这种方法有坚实的理论基础,精度较高,但是计算难度较大;②用温度-植被指数(Tucker 等,1981)或微波土壤湿度观测(Njoku 和 Patel,1986)来推算 P-M 公式中的表面阻抗,直接进行蒸散计算,此方法操作简便,比较实用,而且空气动力学阻抗的估算误差不

太敏感。遥感研究区域 ET 中, 地表能量平衡方程和 Penman - Monteith 阻力模型是物理基础比较坚实且应用最广泛的两种方法^[30]。简言之, 遥感估算蒸散发就是利用遥感技术反演研究区的地表参数将其输入模型中, 计算得到实际的蒸散发。

基于地表能量平衡方程的 SEBAL 模型是与遥感技术相结合的一个物理概念较为清楚的模型, 是当前利用遥感数据反演蒸散发较好的一种方法^[31]。SEBAL 模型从建立到发展的 10 多年的时间内, 在蒸散发估算研究中得到了广泛的应用, 该模型在应用时要求的参数少而反演精度较高。SEBAL 模型的应用可分为三类: ①直接应用, 李红军等^[32]利用 SEBAL 模型对河北省乐城县的蒸散发进行了计算模拟, 并取得了较好的效果; ②在应用的基础上, 分析计算研究区不同土地利用或植被类型的蒸散发, 李宝富等^[33]利用基于遥感的 SEBAL 模型对新疆塔里木河干流区的蒸散发进行了估算研究, 分析了该区不同土地利用类型蒸散发的特点以及蒸散发的年际变化规律; 杜嘉等^[34]在 SEBAL 模型的基础上, 集成气象数据与 MODIS 遥感数据对三江平原的日蒸散量进行了估算, 并对不同土地覆盖类型的日蒸散量进行了统计分析; 邓志民等^[35]利用 MODIS 遥感数据, 采用 SEBAL 模型对汉江上游地区的日蒸散发进行了估算, 并分析了该区不同土地利用类型的蒸散发特点; 王强等^[36]利用 SEBAL 模型对冀蒙接壤区的日蒸散发进行了估算, 精度较高, 证明 SEBAL 模型能够用于农牧交错带蒸散发的估算; ③在利用模型研究蒸散发时空分布特征的基础上, 进一步分析蒸散发与其影响因素之间的关系; 杨肖丽等^[37]利用 SEBAL 模型估算了半干旱地区老哈河流域的蒸散发, 并分析了其时空分布特征及其与地表温度 (LST)、植被指数 (NDVI) 和地形指数的相关关系; 曾丽红等^[38]利用基于 MODIS 遥感数据的 SEBAL 模型估算了半湿润半干旱的松嫩平原不同时段不同下垫面的地表蒸散发, 并分析了其与气候条件、土地利用类型和植被长势等因素的关系。随着技术的不断进步, 人们又提出了 SEBAL 模型的改进版, 面向高分辨率遥感数据的 METRIC 模型^[39]和面向低分辨率遥感数据的 SEBS 模型^[40]。

在蒸散发分析计算模型中, Penman - Monteith 阻力模型 (以下简称 P - M 模型) 具有理论基础坚实、计算精度高、适用性强的特点, 是联合国粮农组织推荐的计算蒸散量的标准方法, 得到了广泛的认可和应用。但传统的方法只能获得单站点的基础数据, 模型常用来估算均一下垫面的潜在蒸发蒸腾量^[41], 很少考虑地表的植被多样性以及绿水流的空间变化规律。如刘胜等^[42]利用修正之后的 P - M 模型只对青海省东部大通县地区的林木日蒸腾量进行了模拟研究。A. A. Alazba^[43]利用 P - M 模型计算了沙特阿拉伯七个不同地区的椰枣树的年蒸散量。王书功等^[44]利用 P - M 模型和 Priestly - Taylor 方程估算了黑河山区草地的蒸散发。王力飞等^[45]利用基于 P - M 模型的双作物系数法估算了内蒙古自治区浑善达克沙地东南缘南沙梁草甸草原区的羊草日蒸散量。贺康宁等^[46]利用修正之后的 P - M 模型并使用常规气象数据进行了刺槐林全年连续日蒸腾量的模拟估算。针对传统方法的弊端, 新的发展方向是将 P - M 模型与遥感技术结合起来, 利用遥感技术推求出连续的时空尺度的数据, 带入理论模型进行绿水流的计算, 两者的结合很好地实现了推求流域绿水流空间变化的目的。如李红霞等^[47]引入基于 MODIS 遥感叶面积指数的 P - M 模型, 实现了对区域尺度上日蒸散发的有效估算, 并同时实现了植被蒸腾和土壤蒸发的分别估算。

ETwatch 是一套能够用于区域或流域蒸散发量遥感反演的完整业务系统, 该模型基于

表面能量平衡原理,将陆面能量平衡方程余项法(SEBAL、SEBS)和FAO56(P-M公式)蒸散发模型相结合进行模型集成而形成模型^[48]。中国科学院遥感应应用研究所的吴炳方等^[49-51]经过一系列的实际应用证明了其估算的效率与精度。如吴炳方等利用基于遥感数据的ETwatch方法对海河流域与河北省馆陶县的蒸散发分别进行了估算,并利用地面观测资料进行对比验证,结果表明模型估算效果较好。

1.3 科学的水资源规划

流域是人类生活的主要生境,对人类生存与社会发展起着重要支撑作用。流域水资源评价是个复杂的系统,需要从生态水文学角度出发,科学的进行水资源规划,构建流域水资源-社会经济-生态环境复合系统(图1.2)。

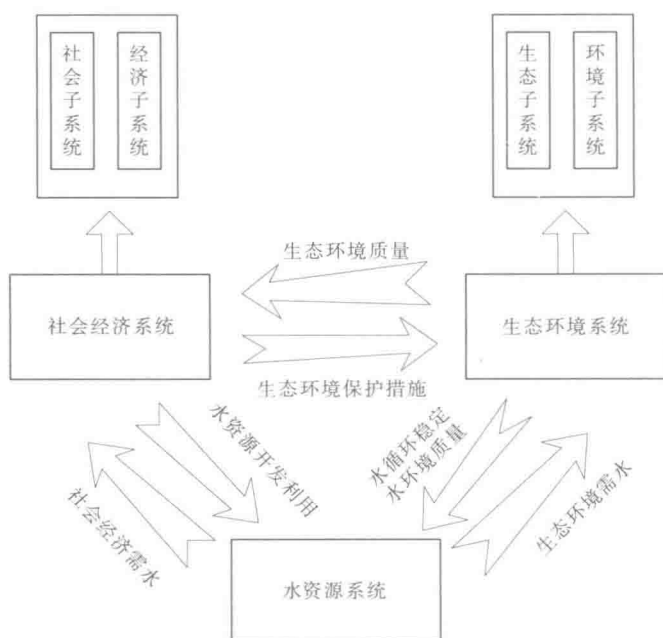


图 1.2 水资源-社会经济-生态环境系统结构关系图

流域水资源-社会经济-生态环境复合系统是人为主体、要素众多、关系错综、目标功能多样的复杂开放巨系统,具有复杂的时空结构与层次结构,呈现整体性、动态性、非线性、适应性以及多维度等特性。水资源作为公共资源,其开发利用势必会涉及社会、经济、生态和环境等方面的因素,同时,这些因素相互作用、相互联系便形成了水资源-社会经济-生态环境复合系统。该系统包括社会经济子系统、生态环境子系统和水资源子系统。再往细处拆分,则社会经济子系统又包括社会子系统和经济子系统;生态环境子系统又包括生态子系统和环境子系统。

1. 水资源系统

本书涉及的水资源系统属于广义水资源范畴,包括蓝水和绿水。绿水主要为陆地生态

系统的蒸散发量，包括植被生长的区域、也包括只发生蒸发的地面，如裸地和水面等，因而陆地生态系统等同于下垫面。而水域生态系统仅指水域涵盖的水体，包括地表水和地下水，即蓝水，其水域部分发生的蒸发损失已计入陆地生态系统。

2. 社会经济系统^[52]

社会经济系统包括社会系统和经济系统。社会系统是由社会人与他们之间的经济关系、政治关系和文化关系构成的系统，它涉及的范围非常广泛，包括人口、劳动力、粮食、法律政策、道德等诸多因素。首先，人口最为重要，因为人既是生产者又是消费者，人力资源是生产中最关键的因素，社会生产的动力来自消费，且人类的科技进步更是为其他系统的向前发展提供了内在动因；其次，劳动力亦是经济发展不可或缺的条件。

经济系统涉及的经济环节有生产、交换、分配和消费。经济系统是整个复合系统的基础，以其物质再生产功能为其他系统的完善提供了物质和资金的支持。

3. 生态环境系统^[52]

生态环境子系统包括生态子系统和环境子系统。生态系统是在一定空间范围内，所有的生物因子和非生物因子通过能量流动和物质循环过程形成的彼此关联、相互作用的统一整体，主要包括自然生态系统与人工生态系统。而生态子系统便是要处理好自然生态与人工生态，人工生态与农、林、牧、副、渔之间的关系，河道外生态和河道内生态的关系。

环境系统在这里主要指水环境系统，包括河流、湖泊、水库、池塘等地表水环境，还包括泉水、浅层地下水、深层地下水等地下水环境。它处理的问题主要是污染物的组成、处理量、入河量、污水处理厂的规模以及因子引起的环境灾害的治理问题等。

1.3.1 水资源系统与生态环境系统

由于水资源的变化会对生态环境产生正的或负的效应，同时生态环境的变化又会引起水资源在量和质上的改变。在生态系统结构中，水资源是生态环境的基本要素，是生态环境系统结构与功能的组成部分。水资源的合理开发与利用能促进生态环境改善，而生态环境的破坏又会影响水资源的持续利用及水资源系统的动态平衡。

水资源与生态环境的关系如图 1.3 所示。

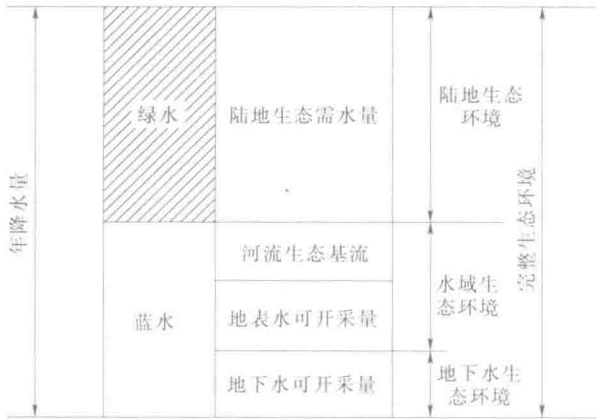


图 1.3 水资源与生态环境的关系

1.3.1.1 生态环境对水资源的影响

1. 陆地生态系统的影响

陆地生态系统是生态环境的重要组成部分,陆地生态系统与降水划分过程密切相关,土壤表面的形态决定地表径流和下渗之间的划分,土壤特性决定持水能力,植物特性决定土壤水分的吸收能力。土地利用和覆盖类型对降水的分割产生直接影响,即影响蓝水和绿水的数量和相对比例。它对水资源的有利作用表现在:可涵养水分,调节地表径流;控制土壤侵蚀,保护水质,改善水环境等。森林、灌丛、草地三种植被的水文调节功能大小取决于各种植被的具体种类、结构及生长情况。在这三种植被中,以山丘区森林植被的水文调节功能最大,但森林植被蒸发需要消耗的水量也相对较大,特别在干旱地区,随着森林覆盖率的增加,流域产水量的减少较为明显^[53],因此,在该地区绿水量增加,而蓝水量相应减少。

2. 水土保持的影响

水土保持需消耗水量,在一定程度上会减少河川的径流量,即蓝水量。这种消耗对湿润地区的影响不大,对于干旱与半干旱地区的影响较显著^[53]。此外,由于水土保持可以比较有效地减少进入江河的泥沙,从而可减少江河下游一部分输沙用水。

3. 水环境治理的影响

流域生态系统的兴衰对水的自然循环产生影响,在对水循环影响过程中而发生着量变和质变。水环境对陆地水循环的影响包括循环速度,滞留时间,降水转化为绿水和蓝水的比例。随着流域水环境治理,河道所需要的生态需水量相应减少,地表的可开采量相应增加。

1.3.1.2 水资源对生态环境的影响

洪涝灾害会冲毁堤防、淹没农田,引起地下水位上升、土壤盐渍化等问题,给生态环境造成灾害性影响。而水资源短缺同样导致生态环境恶化,且我国水资源比较缺乏的地区,大多是生态系统比较脆弱的地带,致使这些地区草原退化、土地沙漠化、水体面积缩小等一系列问题,进而引起生态环境的一系列不良变化。此外,水质对生态环境的影响主要包括水体中的泥沙及污染物对生态环境的影响。其中,水体中的泥沙淤积使下游河道河床抬高、水库库容减小、湖泊变浅等,使生态环境亦随之改变;水体中的泥沙也可在一定条件下产生对人类有利的影响,如引洪淤灌,肥田造地,开发利用河口三角洲,增加土地资源等^[64]。水体中污染物对生态环境造成的影响主要有:导致水体富营养化,影响水生生物的生长和繁殖,威胁水生生物的生存安全,破坏水生生态环境,严重时影响到水体周围城市的工农业生产,甚至威胁居民的饮用水安全^[13]。

1.3.2 生态环境系统与社会经济系统

1.3.2.1 生态环境对社会经济活动的影响

生态环境对社会经济发展的影响主要表现为水、空气、土地、植被和动物等各种资源条件对社会经济活动的影响以及生态环境的破坏对社会经济活动的影响^[35]。

如果生态环境遭到污染和破坏,结构失衡、功能衰退,必然导致资源的枯竭,从而影响社会经济的发展。森林是陆地生态系统的核心。目前,由于森林减少及气候变化,导致水土流失严重,并致使物种多样性锐减。同时,由于生态环境破坏所造成的臭氧空洞、温