

西北旱区生态水利学术著作丛书

黄土高原沟壑区绿水的水文过程及驱动机制

宋孝玉 王光社 李怀有 李焱林 著



科学出版社

西北旱区生态水利学术著作丛书

黄土高原沟壑区绿水的 水文过程及驱动机制

宋孝玉 王光社 李怀有 李焱林 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书选取黄土高原沟壑区典型小流域南小河沟流域为研究对象,通过野外试验和室内模拟相结合的方法,分析天然和人工降雨条件下不同地貌及植被类型的绿水循环过程及其分布特征,建立野外降雨条件下绿水循环转化过程模型,评估不同地貌及植被类型的绿水资源量。同时,结合历史实测资料,分析南小河沟流域绿水变化规律及绿水对土地利用、气候变化的响应,并对未来流域内绿水的变化趋势进行预测。在此基础上,进一步探讨变化条件下绿水对土地利用和气候变化的响应关系,并初步探索了基于水资源承载力的植被合理恢复与管理模式。

本书可供水资源规划、农业水利工程、水土保持工程类的科研与管理
人员参考,也可供水文学及水资源、农业水利工程、水土保持与荒漠化防
治等专业研究生与本科生学习。

图书在版编目(CIP)数据

黄土高原沟壑区绿水的水文过程及驱动机制 / 宋孝玉等著. —北京:
科学出版社, 2017.11

(西北旱区生态水利学术著作丛书)

ISBN 978-7-03-055004-0

I. ①黄… II. ①宋… III. ①气候变化-影响-黄土高原-沟壑-水文循
环-研究 IV. ①P339

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 264000 号

责任编辑: 祝 洁 王良子 / 责任校对: 郭瑞芝

责任印制: 张 伟 / 封面设计: 迷底书装

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>

北京九州迅驰传媒文化有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 11 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2017 年 11 月第一次印刷 印张: 14 1/2

字数: 284 000

定价: 88.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

《西北旱区生态水利学术著作丛书》学术委员会

(以姓氏笔画排序)

主 任：王光谦

委 员：许唯临 杨志峰 沈永明

张建云 钟登华 唐洪武

谈广鸣 康绍忠

《西北旱区生态水利学术著作丛书》编写委员会

(以姓氏笔画排序)

主 任：周孝德

委 员：王全九 李 宁 李占斌

罗兴锜 柴军瑞 黄 强

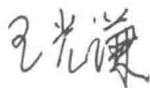
总 序 一

水资源作为人类社会赖以延续发展的重要要素之一，主要来源于以河流、湖泊为主的淡水生态系统。这个占据着少于 1% 地球表面的重要系统虽仅容纳了地球上全部水量的 0.01%，但却给全球社会经济发展提供了十分重要的生态服务，尤其是在全球气候变化的背景下，健康的河湖及其完善的生态系统过程是适应气候变化的重要基础，也是人类赖以生存和发展的必要条件。人类在开发利用水资源的同时，对河流上下游的物理性质和生态环境特征均会产生较大影响，从而打乱了维持生态循环的水流过程，改变了河湖及其周边区域的生态环境。如何维持水利工程开发与生态环境保护之间的友好互动，构建生态友好的水利工程技术体系，成为传统水利工程发展与突破的关键。

构建生态友好的水利工程技术体系，强调的是水利工程与生态工程之间的交叉融合，由此促使生态水利工程的概念应运而生，这一概念的提出是新时期社会经济可持续发展对传统水利工程的必然要求，是水利工程发展史上的一次飞跃。作为我国水利科学的国家级科研平台，“西北旱区生态水利工程省部共建国家重点实验室培育基地（西安理工大学）”是以生态水利为研究主旨的科研平台。该平台立足我国西北旱区，开展旱区生态水利工程领域内基础问题与应用基础研究，解决了若干旱区生态水利领域内的关键科学技术问题，已成为我国西北地区生态水利工程领域高水平研究人才聚集和高层次人才培养的重要基地。

《西北旱区生态水利学术著作丛书》作为重点实验室相关研究人员近年来在生态水利研究领域内代表性成果的凝炼集成，广泛深入地探讨了西北旱区水利工程建设与生态环境保护之间的关系与作用机理，丰富了生态水利工程学科理论体系，具有较强的学术性和实用性，是生态水利工程领域内重要的学术文献。丛书的编纂出版，既是重点实验室对其研究成果的总结，又对今后西北旱区生态水利工程建设、科学管理和高效利用具有重要的指导意义，为西北旱区生态环境保护、水资源开发利用及社会经济可持续发展中亟待解决的技术及政策制定提供了重要的科技支撑。

中国科学院院士



2016 年 9 月

总 序 二

近 50 年来全球气候变化及人类活动的加剧,影响了水循环诸要素的时空分布特征,增加了极端水文事件发生的概率,引发了一系列社会-环境-生态问题,如洪涝、干旱灾害频繁,水土流失加剧,生态环境恶化等。这些问题对于我国生态本底本就脆弱的西北地区而言更为严重,干旱缺水(水少)、洪涝灾害(水多)、水环境恶化(水脏)等严重影响着西部地区的区域发展,制约着西部地区作为“一带一路”国家战略桥头堡作用的发挥。

西部大开发水利要先行,开展以水为核心的水资源-水环境-水生态演变的多过程研究,揭示水利工程开发对区域生态环境影响的作用机理,提出水利工程开发的生态约束阈值及减缓措施,发展适用于我国西北旱区河流、湖库生态环境保护的理论与技术体系,确保区域生态系统健康及生态安全,既是水资源开发利用与环境规划管理范畴内的核心问题,又是实现我国西部地区社会经济、资源与环境协调发展的现实需求,同时也是对“把生态文明建设放在突出地位”重要指导思路的响应。

在此背景下,作为我国西部地区水利学科的重要科研基地,西北旱区生态水利工程省部共建国家重点实验室培育基地(西安理工大学)依托其在水利及生态环境保护方面的学科优势,汇集近年来主要研究成果,组织编纂了《西北旱区生态水利学术著作丛书》。该丛书兼顾理论基础研究与工程实际应用,对相关领域专业技术人员的工作起到了启发和引领作用,对丰富生态水利工程学科内涵、推动生态水利工程领域的科技创新具有重要指导意义。

在发展水利事业的同时,保护好生态环境,是历史赋予我们的重任。生态水利工程作为一个新的交叉学科,相关研究尚处于起步阶段,期望以此丛书的出版为契机,促使更多的年轻学者发挥其聪明才智,为生态水利工程学科的完善、提升做出自己应有的贡献。

中国工程院院士

2016 年 9 月

总 序 三

我国西北干旱地区地域辽阔、自然条件复杂、气候条件差异显著、地貌类型多样，是生态环境最为脆弱的区域。20 世纪 80 年代以来，随着经济的快速发展，生态环境承载负荷加大，遭受的破坏亦日趋严重，由此导致各类自然灾害呈现分布渐广、频次显增、危害趋重的发展态势。生态环境问题已成为制约西北旱区社会经济可持续发展的主要因素之一。

水是生态环境存在与发展的基础，以水为核心的生态问题是环境变化的主要原因。西北干旱生态脆弱区由于地理条件特殊，资源性缺水及其时空分布不均的问题同时存在，加之水土流失严重导致水体含沙量高，对种类繁多的污染物具有显著的吸附作用。多重矛盾的叠加，使得西北旱区面临的水问题更为突出，急需在相关理论、方法及技术上有所突破。

长期以来，在解决如上述水问题方面，通常是从传统水利工程的逻辑出发，以人类自身的需求为中心，忽略甚至破坏了原有生态系统的固有服务功能，对环境造成了不可逆的损伤。老子曰“人法地，地法天，天法道，道法自然”，水利工程的发展绝不应仅是工程理论及技术的突破与创新，而应调整以人为中心的思维与态度，遵循顺其自然而成其所以然之规律，实现由传统水利向以生态水利为代表的现代水利、可持续发展水利的转变。

西北旱区生态水利工程省部共建国家重点实验室培育基地（西安理工大学）从其自身建设实践出发，立足于西北旱区，围绕旱区生态水文、旱区水土资源利用、旱区环境水利及旱区生态水工程四个主旨研究方向，历时两年筹备，组织编纂了《西北旱区生态水利学术著作丛书》。

该丛书面向推进生态文明建设和构筑生态安全屏障、保障生态安全的国家需求，瞄准生态水利工程学科前沿，集成了重点实验室相关研究人员近年来在生态水利研究领域内取得的主要成果。这些成果既关注科学问题的辨识、机理的阐述，又不失在工程实践应用中的推广，对推动我国生态水利工程领域的科技创新，服务区域社会经济与生态环境保护协调发展具有重要的意义。

中国工程院院士

2016 年 9 月

前 言

绿水资源在维持陆地生态系统上具有重要的作用。在黄土高原地区,绿水资源是当地生产用水以及植被生长耗水的最主要来源。一般意义上的水资源是指水循环中能够为生态环境和人类社会所利用的淡水,而传统的水资源评价仅包括可见的、可以被人类直接利用的水资源,即只评价易于被工程开发利用的可更新的地表水和地下水。1995年,Falkenmark等为了更好地评价半湿润、半干旱区农业生产中水资源的作用,提出“蓝水”(blue water)、“绿水”(green water)的概念,首次将绿水引入农业科学研究。根据其理论,蓝水是指储存在河流、湖泊以及含水层中的水;而绿水则是指直接来源于降雨,用于蒸散的水,其又可以分为绿水流和绿水贮存。绿水流指的是实际蒸散发,它由实际蒸发和实际散发两部分组成;绿水贮存则是贮存在土壤中的水分,它是支持雨养农业的重要水源,在维持陆地生态系统景观协调和平衡、支撑雨养农业、维护地球陆地生态系统生产功能和服务功能方面均具有非常重要的作用。蓝绿水资源概念的出现不仅拓宽了水资源的内涵,而且为水资源管理提供了新的理论和思路。

从水文循环的角度分析,全球尺度上总降雨的65%转化成了绿水,这一比例随着降雨减少和干旱程度增加逐渐提高,在我国西北地区会达到70%甚至90%以上。从水资源利用的角度来看,绿水则支撑着全球80%以上的雨养农业。此外,绿水资源在维持陆地生态系统上具有不可替代的作用。在对黄土高原水土流失治理中,“保水”主要针对的就是绿水,其目的就是通过减少地表径流,增加降雨入渗和降低土壤蒸发来提高绿水资源的利用效率。同时,绿水资源也是土壤-植被-大气连续体系统中的重要一环,绿水资源以不同的状态在该系统中流动,互相衔接。

在我国黄土高原沟壑区,受大尺度气候变化和社会经济发展剧烈改变流域的植被、土壤及地貌等的影响,正面临着水资源短缺、水灾害加剧和生态环境恶化三大问题交织的严峻局面。绿水主要是通过蒸发和散发作用流向大气圈的水汽流,这意味着影响蒸散发的因素都能影响绿水。因此,绿水既受自然条件(如降雨、气温等)的影响,又受各种管理条件(如土地利用方式)的影响。在自然条件中,气候是造成降雨、径流和蒸散等变化的重要因素,能够对绿水的水文过程产生影响。在人工条件下,则主要是通过改变土地利用的方式影响绿水。因此,需在深入研究绿水在黄土高原沟壑区的形成、转化以及绿水对气候变化及土地利用方式

变化响应的基础上,探索绿水支持功能与种植结构间的耦合关系,并基于此寻求植被合理恢复与管理模式,这对黄土高原的生态环境修复和水资源的可持续利用都有重要的理论和现实意义。

本书正是基于上述研究思路,汇集了作者近年的研究成果,以黄河水利委员会西峰水土保持科学试验站为研究基地,系统研究了黄土高原沟壑区绿水的形成、转化规律以及绿水对土地利用和气候变化的响应关系。全书共 10 章。第 1 章为绪论,系统论述研究背景、意义及国内外研究现状;第 2 章为研究区概况及研究方法;第 3 章为绿水的水文过程分析;第 4 章为绿水资源量的分析与计算;第 5 章为绿水水分运动数值模拟;第 6 章为南小河流域绿水的变化规律研究;第 7 章为绿水对土地利用变化的响应;第 8 章为绿水对气候变化的响应;第 9 章为土地利用和气候变化对绿水影响的定量评价;第 10 章为流域绿水的未来变化预测。

本书由宋孝玉、王光社、李怀有和李垚林共同编写,由宋孝玉负责全书的统稿工作。撰稿分工为:宋孝玉(第 1 章、第 3 章),王光社(第 1 章),李怀有(第 2 章),李垚林(第 3 章),崔胜寓(第 2 章),李蓝君(第 4 章、第 5 章),燕明达(第 6 章),符娜(第 7 章、第 8 章),夏露(第 9 章、第 10 章),李亚娟、肖迎迎、申国喜、马玉霞、冯湘华、李淼及蒋俊也参与了部分章节内容的编写工作。

本书研究工作得到了国家自然科学基金面上项目“渭北旱塬不同种植结构农田绿水的形成、转化机理及水文生态响应研究”(41171034)及陕西省水利科技项目“黄土高原沟壑区绿水对土地利用和气候变化的响应”(2016slkj-11)的资助。在本书成稿过程中,还得到了西安理工大学水利水电学院和科学出版社的大力支持,在此一并表示感谢!

由于作者水平有限,书中不足之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

宋孝玉

2017 年 4 月 29 日

目 录

总序一

总序二

总序三

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究目的与意义	1
1.2 国内外研究现状	2
1.2.1 绿水水文过程研究进展	2
1.2.2 绿水资源量及分布研究进展	5
1.2.3 气候变化对水文过程的影响	6
1.2.4 土地利用变化对水文过程的影响	8
1.3 流域绿水研究的关键科学问题	9
1.4 南小河沟流域已开展的研究工作	12
参考文献	12
第 2 章 研究区概况及研究方法	16
2.1 研究区概况	16
2.1.1 地理位置	16
2.1.2 地形地貌	18
2.1.3 气候特征	18
2.1.4 地质土壤	18
2.1.5 植被类型	19
2.2 资料收集与处理	20
2.2.1 水文资料	20
2.2.2 气象资料	22
2.3 研究方法	22
2.3.1 绿水资源量的计算方法	22
2.3.2 绿水对土地利用与气候变化响应的研究方法	26

2.3.3 绿水变化规律的研究方法	27
参考文献	29
第3章 绿水的水文过程分析	30
3.1 流域降雨特性分析	30
3.1.1 降雨年内变化分析	30
3.1.2 降雨量年际变化规律	32
3.1.3 年降雨量变化趋势及突变分析	33
3.1.4 降雨年型划分	34
3.2 流域入渗特征分析	35
3.2.1 经验模型模拟及参数率定	35
3.2.2 BP神经网络模型模拟	41
3.3 参考作物蒸散变化趋势分析及过程模拟	47
3.3.1 参考作物蒸散量变化趋势分析	48
3.3.2 影响参考作物蒸散量的因素分析	51
3.3.3 参考作物蒸散过程模拟及模型修正	52
3.4 本章小结	56
参考文献	57
第4章 绿水资源量的分析与计算	58
4.1 试验设计	58
4.1.1 样地选取	58
4.1.2 降雨量及气象要素的测定	59
4.1.3 植被截留量的测定	60
4.1.4 土壤蒸发量的测定	60
4.1.5 土壤含水率的测定	60
4.1.6 土壤容重的测定	60
4.1.7 土壤水分常数的测定	61
4.1.8 植被长势参数的测定	62
4.2 植被截留特征分析与计算	63
4.2.1 植被截留特征分析	63
4.2.2 植被截留量拟合计算	64
4.3 土壤蒸发特征分析与计算	68
4.3.1 土壤蒸发特征分析	68
4.3.2 土壤蒸发对表层土壤水分的影响	72
4.3.3 不同植被覆盖土壤蒸发强度对比	76

4.4	土壤蒸发的拟合计算	77
4.4.1	土壤表层含水率与土壤蒸发强度相关性分析	78
4.4.2	土壤蒸发拟合计算	81
4.5	绿水总量的分析与计算	83
4.5.1	绿水总量计算	83
4.5.2	绿水消耗量计算	85
4.6	绿水资源量与植被生长关系分析	92
4.7	本章小结	94
	参考文献	95
第5章	绿水水分运动数值模拟	97
5.1	土壤水分运动基本方程	97
5.1.1	土壤水分运移方程的离散化	98
5.1.2	初始条件和边界条件	100
5.1.3	时间步长	100
5.1.4	模型参数及其确定	101
5.1.5	根系吸水项	105
5.2	模型的应用	107
5.2.1	土壤特性参数的选择	107
5.2.2	不同土地利用下土壤水资源量的模拟	108
5.2.3	典型林地土壤含水率的模拟	113
5.3	本章小结	118
	参考文献	119
第6章	南小河沟流域绿水的变化规律研究	120
6.1	绿水资源量计算	120
6.1.1	水量平衡法	120
6.1.2	微气象学法	123
6.1.3	模型的对比与选取	126
6.2	绿水随时间的变化规律	127
6.2.1	绿水的年际变化	127
6.2.2	绿水的年内变化	128
6.3	绿水的变化趋势分析	128
6.4	绿水系数变化及其生态环境意义	130
6.4.1	绿水系数的时间变化趋势	130
6.4.2	绿水系数与其影响因素的关系	131

6.4.3 绿水系数与流域侵蚀产沙的关系·····	131
6.4.4 绿水系数的增大在农业生产上的意义·····	133
6.4.5 绿水系数对生态环境的指示意义·····	133
6.4.6 关于绿水系数应用意义的讨论·····	135
6.5 本章小结·····	135
参考文献·····	136
第7章 绿水对土地利用变化的响应·····	137
7.1 土地利用变化·····	137
7.1.1 土地利用概况·····	139
7.1.2 土地利用面积的变化·····	140
7.1.3 土地利用类型的变化速率·····	141
7.1.4 土地利用变化对水文过程的影响·····	142
7.2 不同土地利用及地貌类型的绿水变化分析·····	144
7.2.1 土地利用方式·····	144
7.2.2 地貌类型·····	145
7.2.3 土壤储水量的季节变化·····	147
7.3 土壤储水量的垂直变化·····	149
7.3.1 不同植被类型土壤储水量的垂直变化·····	149
7.3.2 不同树龄植被土壤储水量的垂直变化·····	151
7.3.3 不同地貌土壤储水量的垂直变化·····	153
7.3.4 土壤水分有效性分析·····	154
7.4 不同土地利用情景下的绿水评估·····	156
7.4.1 不同土地利用情景的构建·····	156
7.4.2 不同土地利用情景下绿水模拟·····	156
7.5 不同土地利用类型对绿水变化的贡献·····	157
7.5.1 地形对土壤水分的影响·····	160
7.5.2 整地方式对土壤水分的影响·····	166
7.5.3 集水面的化学处理对土壤水分的影响·····	167
7.5.4 不同土地利用的土壤水分效应分析·····	170
7.6 本章小结·····	173
参考文献·····	174
第8章 绿水对气候变化的响应·····	175
8.1 黄土高原沟壑区气候变化分析·····	175
8.1.1 研究方法·····	176

8.1.2 降雨周期分析	178
8.1.3 温度变化规律	181
8.2 绿水与气候变化的关系	183
8.2.1 绿水与降雨的关系	183
8.2.2 绿水与气温的关系	191
8.2.3 降雨、气温和绿水的关系	192
8.3 本章小结	192
参考文献	193
第9章 土地利用和气候变化对绿水影响的定量评价	194
9.1 土地利用和气候变化对水文的综合影响及区分	195
9.2 土地利用和气候变化对绿水影响的研究方法	197
9.2.1 情景分析法	197
9.2.2 分离评判法	198
9.3 土地利用和气候变化对绿水变化的贡献	199
9.4 本章小结	200
参考文献	200
第10章 流域绿水的未来变化预测	202
10.1 基于马尔可夫链的绿水预测	202
10.1.1 马尔可夫链法的基本原理	202
10.1.2 马尔可夫链的应用	204
10.2 基于不同土地利用情景的绿水预测	205
10.3 基于不同气候情景的绿水预测	207
10.3.1 多元回归法	207
10.3.2 BP神经网络方法	208
10.3.3 多元回归法和BP神经网络方法预测结果的比较	211
10.3.4 未来气候变化条件下的绿水预测	211
10.4 本章小结	213
参考文献	213

第1章 绪 论

1.1 研究目的与意义

黄土高原沟壑区是国家重要的粮食生产基地及早作农业区，水资源短缺已经成为该区环境与发展最大的制约因子。绿水是源于降雨、存储于土壤并被植被蒸散发消耗的水资源，支撑着黄土高原沟壑区的雨养农业，既受自然条件（如气候、土壤类型）的影响，又受各种管理条件（如土地利用方式）的影响。因此，分析该区域的绿水资源量及其时空分布规律、探究绿水形成机理和转换机制的水文过程、分析气候变化条件下人类活动对绿水的影响机理以及气候变化和人类活动对绿水影响的贡献率，是黄土高原沟壑区粮食安全和生态环境恢复中亟待解决的问题。本书以黄土高原沟壑区的典型流域为研究对象，以变化条件下绿水的响应机理研究为核心，分析了黄土高原沟壑区独特而复杂的绿水水文过程，并通过实际植被蒸腾和土壤蒸发来评价绿水流量，研究了在流域尺度上绿水的时空分布格局，探讨了土地利用和气候变化条件下的绿水响应机理，为黄土高原沟壑区粮食安全和生态环境恢复等提供理论依据。

在自然界，包括人类在内的所有有机体，都需要淡水资源来保证其生存（Oki et al., 2006）。因此，保证足够的淡水资源供给不仅对人类是必不可少的，对生态系统安全及服务功能也是极其必要的。一般意义上的水资源是指水循环中能够为生态环境和人类社会所利用的淡水，其补给来源主要为大气降雨。20 世纪以来，可再生的淡水资源总量基本保持不变，而人类用水需求却激增了 6 倍，其主要用途为农业用水与工业生产。因此，出现了人类生活和生产用水与生态系统争水的情况，这一状况在我国尤为严峻。同时，人类生产生活用水挤占生态系统用水的现象频发，部分生态系统已发生严重退化。目前，国内外水资源评价更多地关注可见的且易被人类直接利用的水资源，即只重视评价易于被工程开发利用的可更新的地表水和地下水（程国栋等，2006）。1995 年，在联合国粮食及农业组织（Food and Agriculture Organization of the United, FAO）召开的水土大会上，瑞典水文学家 Falkenmark 针对雨养农业与粮食安全问题首次提出“绿水”和“蓝水”的概念。这一理论将降雨在陆地生态系统中分为绿水和蓝水，其中，蓝水是指储存在河流、湖泊以及含水层中的水，即地表径流和地下径流；绿水是指源于降雨，存储于非饱和土壤中并被植被吸收利用蒸腾的那部分水。绿水资源又可以分为两个部分，绿水流和绿水储存，绿水流即实际蒸散发，包括土壤蒸发、植物蒸腾和

植物截留等；绿水储存则是指土壤储水量的变化量。从水文循环的角度分析，全球尺度上总降雨的 65%转化成了绿水，仅有 35%的降雨转化成了蓝水(Falkenmark et al., 2006)。而传统的水资源评估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维护生态系统的重要水源——绿水。蓝水和绿水资源概念的出现不仅拓宽了水资源的内涵，而且为水资源管理提供了新的理论和思路。近年来，蓝绿水的研究引发了科学界对水资源概念及评价的重新思考，逐步影响着人类水资源管理的思维方式，并已经成为水文水资源领域研究的热点。

受大尺度气候变化和剧烈的社会经济的影响，我国黄土高原沟壑区面临着水资源短缺、水灾害加剧和生态环境恶化三大问题交织的严峻局面。绿水主要是通过蒸发和散发作用流向大气圈的水汽流，这意味着影响蒸散发的因素都影响绿水。因此，绿水流既受自然条件（如气候、土壤类型）的影响，又受各种管理条件（如土地利用方式）的影响。在自然条件中，气候的变化造成降雨、径流及蒸散发等组成的重要变化，从而影响绿水的水文过程。在人工条件下，人类主要通过改变土地利用方式影响绿水。因此，需在深入了解气候变化及土地利用变化对绿水影响的基础上，寻求基于水资源承载力的植被合理恢复与管理模式。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 绿水水文过程研究进展

1. 降雨研究进展

降雨是流域内绿水资源最主要的来源，降雨量的变化会引起流域内绿水资源的变化，因此研究降雨资源的变化对分析绿水资源有重要的意义。目前国内外研究降雨主要从雨型变化和年内变化以及年际变化等多方面进行分析。刘扬等（2012）对近 50 年我国北方地区的降雨进行分析，发现在近几年，北方中、东部区，青海区的降雨增加，而干旱区的降雨下降。赵传成等（2011）指出在我国西北地区，近 50 年来的气温呈上升趋势，降雨和地表湿润指数为线性减少趋势，总体趋势为暖干化。但是不同地区、不同尺度上的降雨变化受不同的气候条件特征因子的影响（苗娟等，2004；钱维宏等，2003）。

2. 蒸散发研究进展

陆面蒸散发是水文循环的重要过程，包括土壤蒸发和植物蒸腾。流域实际蒸散流就是流域内的绿水流，因此研究流域内蒸散过程对探究绿水的水文过程有重要的作用，有利于减少水分的无效蒸发，促进非生产性绿水向生产性绿水（高效绿水）进行转换。蒸散发生于土壤-植被-大气连续体（soil-plant-atmosphere-

continuum, SPAC) 系统内, 是一个相当复杂的连续过程, 它涉及土壤水分运动、植物水分传送、蒸发面与大气间的水汽交换和热量交换等多个环节(刘昌明等, 1991)。由于影响因素复杂、涉及知识面广和实测资料少等客观条件限制, 以及对所需要的月、季节和区域尺度了解不足等问题, 对于蒸散发过程的研究在实际水循环研究中仍是需要攻克的重要难题。因此, 研究区域尺度的蒸散发有重大的理论和实践意义。

国际上对蒸发的研究已有 200 多年, 取得了丰富的成果。1802 年道尔顿提出综合考虑风、空气温度和湿度对蒸发影响的道尔顿蒸发定律后, 蒸发的理论计算才具有明确的物理意义。1926 年, Bowen 从能量平衡方程出发, 将地表感热通量与显热通量之比定义为波文比, 提出了计算蒸发的波文比-能量平衡法。Thornthwait 等(1939)利用近地面边界层相似理论, 在假定边界层内动量、热量和水汽传输系数相等的基础上提出了计算蒸发的空气动力学方法。Penman 等(1948)提出了“蒸发力”的概念及其相应的计算公式, 其中, Penman 公式是从能量平衡和空气动力学理论出发建立的综合分析公式, 全面考虑了能量平衡、空气饱和差和风速等可能影响蒸发力的要素, 具有坚实的理论基础和明确的物理意义, 长期以来得到了广泛的应用。在此基础之上, Monteith(1965)在研究作物的蒸发和蒸腾中引入表面阻力的概念, 导出 Penman-Monteith 公式, 为非均匀下垫面的蒸发研究开辟了一条新途径。Swinbank(1955)依据近地面层湍流理论, 提出用涡度相关技术直接测量并计算蒸发量的涡度相关法。Bouchet(1963)提出了蒸散互补相关理论, 即实际蒸散与潜在蒸散之间存在互补关系。该理论提出是蒸散发计算领域的又一大突破, 对后来区域实际蒸散的计算起到了极大的促进作用。20 世纪 60 年代之后, 还出现了通过模拟 SPAC 系统能量与物质交换过程, 来计算植物蒸腾和土壤蒸发的具体方法。近 20 年来, 随着野外试验研究以及微气象学研究的深入, 考虑下垫面温、湿和风廓线的解析模式相继出现, 并逐渐发展到能考虑植物含水率变化和降雨、截留等因素的影响, 这种模式的建立需要微气象学、土壤物理学和植物生理学等学科的综合知识(刘树华等, 1996; 沈卫明等, 1993)。但这些模式大部分是将土壤蒸发与植物蒸腾放在一起考虑的单层模型。与单层模型相对, Shuttleworth 等(1985)对稀疏覆盖表面的蒸散进行研究, 在以前工作的基础上假定群体中热量和水汽为单源汇型, 建立了由作物冠层和冠层下地表两部分组成的二元蒸散量的理论模式。另外还有将 SPAC 系统分多层讨论计算蒸散的多层模型等(Jarvis et al., 1986)。由于下垫面状况的水平非均匀性, 由传统方法和模拟方法求得的点上蒸发数据一般不能代表表面上情况, 遥感技术的应用与地面微气象学信息的结合, 为大面积蒸发量估算提供了新的途径。70 年代初以来, 国内外利用遥感信息计算区域蒸发, 至今已取得一系列成果(郭亮等, 1997)。