

山地森林生态系统 水文循环与数学模拟



程根伟 余新晓 赵玉涛 等著

 科学出版社
www.sciencep.com

山地森林生态系统水文循环 与数学模拟

程根伟 余新晓 赵玉涛 等著

科学出版社
北京

内 容 简 介

本书结合西南地区的山地水文特征和森林生态观测站的试验研究成果,从生态系统界面水文作用的角度,系统深入地分析了山地主要森林类型中的水分时空分布特征及其蓄持、运移、转换机制,讨论了森林系统中的林冠层、地被物层、土壤层等不同界面层次中水的截留、蒸发、储蓄、下渗、径流形成与汇集方面的问题,分析了森林结构及分布对河川径流总量、洪水特性和枯水补给的影响及流域尺度效应,尤其是探讨了江岸防护林带的布局结构以及水文效应问题,还介绍了分布式森林水文模型的设计思想与建模技术,运用数学模拟方法研究了森林类型和布局变化对流域水文过程的调节作用,从影响机制和定量指标两个方面阐明森林生态系统的水文效应及评价问题。

本书可供森林水文、森林生态、环境保护等领域的科技工作者、管理人员参考;也可作为森林生态学、森林水文学方面的教材。

图书在版编目(CIP)数据

山地森林生态系统水文循环与数学模拟/程根伟,余新晓,赵玉涛等著.

—北京:科学出版社,2004

ISBN 7-03-014194-6

I. 山… II. ①程…②余…③赵… III. 山地-森林-水文学-研究

IV. S715

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 097391 号

责任编辑:胡晓春 贾学文 / 责任校对:刘小梅

责任印制:钱玉芬 / 封面设计:王 浩

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

*

2004 年 11 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2004 年 11 月第一次印刷 印张:19 1/2

印数:1—1 500 字数:442 000

定价:55.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈科印〉)

前言

森林与水的关系问题一直是森林生态研究的中心议题,也是水文循环探索的重要内容,森林生态系统对水分的时空分配、传输转换以及水文循环机制的影响问题是其核心。作为中国西南主要的森林分布和木材生产区,山地森林生态系统在近百年来发生了巨大的变化,这些森林条件的变化对当地生态状态和整个流域的水土环境都产生了强烈的影响。我国自 20 世纪 50 年代以后就开始对森林与江河水源的关系进行比较系统的探索,尤其是近 20 年来,通过三峡水利枢纽工程环境影响评价、长江中上游防护林体系建设的环境影响、长江流域水土保持建设规划以及中国西部生态保护与恢复对策等重大科研项目的完成,在森林与水的关系问题上积累了比较丰富的数据,并且取得一批有影响的成果。本书从山地森林系统的林冠层、地被物层、土壤层等几个层次的水分运动出发,力图系统深入地探讨主要森林类型中水分的时空分布及其蓄持、运移、转换机制,并用数学模拟方法分析森林结构变化对森林生态系统水文过程的影响,尤其对长江上游主要暗针叶林生态系统的可持续经营管理及水资源的合理开发利用问题,从理论基础和定量指标的角度阐明生态建设的水文效应评价问题。

本书结合中国西南地区几个森林生态观测试验站的研究,从生态系统界面水文作用的视角,重点阐释典型山地暗针叶林生态系统中降水、产流以及主要气象因子的时空动态与分布变化规律,探讨该系统的产流机制,并对暗针叶林生态系统林冠层截留规律进行分析,与我国其他相似森林类型的截留结果进行对比。根据贡嘎山区的水文地质与土壤条件,利用专门研制的具有自动数据采集功能的林下蒸渗仪,研究了该区两种主要成土母质(坡积物和冰碛物)发育的暗针叶林生态系统内土壤的水分时空分布动态及其相互关联规律,试验获取了土壤水分运动参数并模拟分析了土壤水分运动规律。综合利用气象场定位观测和现场试验观测资料对暗针叶林生态系统的植被蒸腾、土壤蒸发、水面蒸发以及流域蒸散时空规律进行了分析,利用 Penman-Monteith 修正公式与用气孔计测量参数相结合的方法估算了暗针叶林生态系统的蒸散量。最后用概念性模型对该区不同演替阶段林分的水分分布进行了模拟。本书特别分析了长江上游亚高山暗针叶林生态系统中林下地被物层各组分(包括森林粗木质残体、苔藓和枯落物)的时空分布规律以及对降水的蓄持、传输效应。

江岸防护林的结构与功能是森林水文作用中一个独特的问题,在河岸工程实践中需要慎重对待和解决,过去在此方面的研究比较少,江岸林带相关的水文效应也停留在定性的描述水平。我们根据河流动力学的理论,结合江岸防护林布设的目标要求,对不同类型的江岸防护林带的功能、机制及结构进行了理论分析,尤其是在防护林带设计中的必要宽度确定方面给出了系统的分析方法和计算公式。

本书还介绍了分布式森林湿地水文模型(DFWHM)的原理与结构,通过改变暗针叶林生态系统覆盖率和森林植被结构组成参数的方法,利用该模型探讨了长江上游亚高山

暗针叶林生态系统水文过程对森林植被结构变化的响应。其目的是对目前我国相关研究成果进行总结,并为有关科技人员和学者提供可以参照使用的分析工具。

本书是在中国科学院知识创新项目“长江上游植被的生态水文效应及生态屏障对策研究(KZCX2-SW-319)”、国家自然科学基金“森林水文作用的尺度效应及分布式水文模型研究(30271042)”和“长江上游暗针叶林径流形成机制研究(39930130)”的支持下完成的,其中主要章节由程根伟、余新晓完成,赵玉涛博士等参与了相关试验观测,并编写了其中部分章节。参与编写的还有高级工程师陈桂蓉,研究生周扬名、李勇、舒栋才。本书部分内容还综合参考了我们过去承担的国家“七五”科技攻关项目“长江上游防护林建设区生态环境与社会经济条件研究”和国家“八五”科技攻关项目“长江江岸林带防护林建设技术体系研究”的一些成果,中国科学院成都山地灾害与环境研究所的钟祥浩教授审阅了本书草稿,并提出了重要的修改意见,在此表示感谢。

本书主要讨论森林生态系统对流域水量变化的影响,未涉及森林植被的土壤保持效应以及对江河水质的作用,这方面的进展可以参考其他书刊。由于森林水文效应是一个复杂自然系统的非线性响应问题,其中还有一些基本理论问题并未完全得到澄清,加上作者的水平有限,书中难免存在一些错误或问题,希望得到读者的批评指正。

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 山地的水文气象特征	1
1.2 山地与森林生态系统	4
1.3 山地生态环境对水文循环的影响	6
第 2 章 生态系统水文学的核心问题与研究进展	10
2.1 森林水文学研究的核心问题.....	11
2.2 不同界面水文现象差异.....	14
2.3 森林系统蒸散发过程.....	20
2.4 森林对流域径流总量的影响.....	23
2.5 森林流域产流机制.....	24
2.6 森林流域水文模型研究进展.....	26
2.7 森林水文效应研究展望.....	41
第 3 章 西南地区森林概况与观测试验设施	44
3.1 西南地区自然环境概况.....	44
3.2 主要观测试验站及设施.....	50
3.3 贡嘎山高山森林生态观测站.....	55
3.4 山地水文气象观测系统.....	61
3.5 亚高山暗针叶林区水文特征.....	69
第 4 章 森林水文要素观测试验的主要方法	74
4.1 试验的目的.....	74
4.2 林冠层观测方法.....	74
4.3 地被物层观测方法.....	76
4.4 土壤层观测方法.....	77
4.5 径流过程测量方法.....	81
4.6 森林蒸散发测定方法.....	83
第 5 章 降雨特征与林冠截留	85
5.1 降雨特征	85
5.2 林冠层降雨截留过程.....	88
5.3 林冠结构对截留的影响.....	99
5.4 林冠截留模型	102
第 6 章 森林地被物分布及其水文作用	105
6.1 粗木质残体的分布特征	105

6.2	粗木质残体的水文效应	106
6.3	苔藓与枯落物层的分布特征	109
6.4	各植被层水文效应综合分析	118
第 7 章	森林土壤水分布及运动特征	119
7.1	森林土壤的物理性质	119
7.2	土壤水分参数及入渗特征	121
7.3	森林土壤水分布及动态变化	128
7.4	林地根系分布与吸水特性	133
7.5	森林土壤水分非饱和运动模拟	136
第 8 章	森林流域蒸散发特征与计算	143
8.1	植被蒸腾规律	144
8.2	森林流域水面蒸发特性	147
8.3	森林流域土壤蒸发规律	148
8.4	Penman-Monteith 修正式估算流域蒸散	152
8.5	森林流域分布式蒸散发模式	165
第 9 章	森林流域水量平衡及径流形成	169
9.1	森林流域径流特征	169
9.2	流域土壤渗透特征	179
9.3	流域地下水水位动态	181
9.4	暗针叶林流域产流机制	183
9.5	森林水文作用影响机理	185
第 10 章	森林流域径流汇集机理	187
10.1	坡面汇流	188
10.2	土壤汇流	189
10.3	地下汇流	190
10.4	河道汇流	190
10.5	森林植被对汇流的影响	192
10.6	小流域森林对洪水的影响	193
第 11 章	森林生态系统水文过程模拟	196
11.1	森林水文数学模型的主要功能单元	196
11.2	分布式流域水文模型设计要点	202
11.3	分布式森林湿地水文模型	209
11.4	模型检验	218
11.5	降雨变化的水文过程响应模拟	223
11.6	森林植被变化对水文过程的影响模拟	227
第 12 章	森林覆被对河川径流特征量的影响	231
12.1	森林对区域径流总量的影响	231
12.2	森林对河流枯季径流量的影响	235

12.3 森林对洪水特征的影响·····	236
12.4 林地土壤结构对森林水文作用的贡献·····	243
12.5 森林水文作用的流域尺度效应·····	245
12.6 森林水文效益定量评价指标体系·····	249
12.7 森林涵养水源作用的经济价值评估·····	253
第 13 章 江岸林带的水文作用 ·····	258
13.1 江岸林带的拦沙护岸作用·····	258
13.2 树木根系的固结作用·····	259
13.3 淹没树干的水力学影响·····	261
13.4 江岸林带对地下水位的影响·····	267
13.5 沿江林带对河流的不利影响·····	269
13.6 江岸防护林带的必要宽度·····	270
主要参考文献 ·····	275
附录一 分布式森林湿地水文模型 ·····	283
附录二 贡嘎山森林演替模型 ·····	287

Contents

Preface

Chapter 1	Introduction	1
1.1	Hydro-meteorological Characteristics of Mountains	1
1.2	Mountain Environment and Forest Ecosystem	4
1.3	Eco-environment Impacts on Water Cycles in Mountains	6
Chapter 2	The Progress and Problems in Ecosystem Hydrology	10
2.1	The Key Problems in Forest Hydrology	11
2.2	The Hydrological Phenomena in Different Interfaces	14
2.3	The Evapo-transpiration of Forest System	20
2.4	Forest Impacts on Runoff Yield	23
2.5	Runoff Generation Mechanism of Forest Watershed	24
2.6	Research Progresses of Forest Hydrological Models	26
2.7	Foresight of Forest-hydrology Effects	41
Chapter 3	Forest Features and Experimental Facilities in Southwestern China	44
3.1	General Condition of Natural Environment in Southwestern China	44
3.2	Main Experimental Stations and Observation Facilities	50
3.3	The Ecosystem Observation Station of Gongga Mountain (EOSGM)	55
3.4	Hydro-meteorological Observation System of EOSGM	61
3.5	The Hydrology Features of Dark Coniferous Forest in Sub-alpine Southwestern China	69
Chapter 4	Main Methods in Forest and Hydrology Experiments	74
4.1	The Purposes of Experiment	74
4.2	Observation Methods to Forest Canopy	74
4.3	Observation Methods to Forest Floor	76
4.4	Observation Methods to Forest Soil	77
4.5	Measurement to Stream Flow	81
4.6	Measurement to Forest Evaporation and Transpiration	83
Chapter 5	Precipitation Features and Canopy Interception	85
5.1	Precipitation Features in Southwestern China	85
5.2	Interception Process of Canopy	88
5.3	The Canopy Structure and Its Influence to Rainfall Interception	99
5.4	The Models of Canopy Interception	102
Chapter 6	Forest Floor Materials and Its Hydrological Effects	105
6.1	The Distribution Feature of Coarse Woody Debris (CWD)	105
6.2	The Water Absorption Capacity of CWD	106

6.3	The Distribution of Moss and Withered Materials	109
6.4	The Hydrological Effects of Forest Floor Layers	118
Chapter 7	The Moisture Distribution and Dynamics in Forest Soil	119
7.1	The Structure Characteristics of Forest Soil	119
7.2	Soil Water Parameters and Infiltration Feature	121
7.3	Moisture Distribution and Dynamics in Forest Soil	128
7.4	Root Distribution and Water Absorption Capacity in Soil	133
7.5	The Variation Simulation of Moisture in Unsaturated Soil	136
Chapter 8	The Evapo-transpiration Features of Forest Watershed	143
8.1	The Vegetation Transpiration Characteristics	144
8.2	The Water Surface Evaporation	147
8.3	The Evaporation of Soil Surface	148
8.4	The Evapo-transpiration Estimation by Penman-Monteith Formula	152
8.5	The Distributed Mode of Watershed Evapo-transpiration Estimation	165
Chapter 9	The Water Balance and Runoff Generation of Forest Watershed	169
9.1	The Runoff Features of Forest Watershed	169
9.2	The Infiltration Features of Forest Floor	179
9.3	Groundwater Dynamics of Watershed	181
9.4	Runoff Generation Mechanism of Dark Coniferous Forest	183
9.5	Forest Impacts on the Hydrological Cycle	185
Chapter 10	The Runoff Converging Characteristics of Forest Watershed	187
10.1	Runoff Concentration on Hillslope	188
10.2	Runoff Concentration Through Soil Layer	189
10.3	Ground Water Releasing	190
10.4	Stream Flow Routing along Rivers	190
10.5	Forest Coverage Influence to Runoff Converging	192
10.6	Forest Impacts on Flood Features in Small Watersheds	193
Chapter 11	Hydrographic Simulation of Forest Ecosystem	196
11.1	The Functional Units of Hydrology Mathematics Model for Forest Watersheds	196
11.2	The Key-points in the Design of Distributed Hydrological Model	202
11.3	The Structures and Parameters of Distributed Hydrological Model	209
11.4	The Model Testing	218
11.5	The Simulation of Hydrological Response to the Rainfall Variation	223
11.6	The Hydrological Effect Simulation to Different Forest Coverage	227
Chapter 12	Forest Coverage Impacts on the Stream Flows	231
12.1	Forest Impacts on the Runoff Yield	231
12.2	Forest Impacts on the Low Flow	235

12.3	Forest Impacts on the Flood Size	236
12.4	The Forest Soil Structure Impacts on the Runoff Generation	243
12.5	The Watershed Scale Impacts on the Forest-hydrology Effects	245
12.6	The Quantitative Indexes in the Evaluation of Forest-hydrology Effects	249
12.7	The Economical Benefits of the Water Feeding Effect of Forest Ecosystem	253
Chapter 13	The Hydrological Effects of Riparian Forests	258
13.1	The Protecting Effects of Submerged Trees in Riverside	258
13.2	The Concrete Effects of Tree Roots	259
13.3	The Hydraulics Influence of Submerged Trees	261
13.4	The Forest Impacts on Ground Water Table	267
13.5	The Unfavorable Effects of Forest Belts along River Banks	269
13.6	The Necessary Width Estimation of Protection Forest Belts along Riversides	270
References		275
Appendix I	The Distributed Forest-wetland Hydrological Model	283
Appendix II	The Gongga-mountain Forest Succession Model	287

第1章 绪 论

山地是一组具有较大起伏的高地类型,是许多高度大、坡度陡的高坡地的总称。山地的特点是具有较大的绝对高度和相对高度,受到河流的强烈切割而形成岭谷交错地形。按照钟祥浩先生等著的《山地学概论与中国山地研究》(钟祥浩等,2000)所论及的山地属性特征,山地具有明显的能量梯度变化性、物质趋下迁移性、形态破碎与自相似性、垂直分异分带性和环境系统的不稳定性。这些基本属性还产生了山地环境与生态系统独特的性质,例如,山地气候的分带性、生态类型的多样性、土壤岩层的活性等,成为地球上比较独特、具有丰富自然现象的复杂地理系统。

中国山地面积约占国土面积的 69%,有超过 50% 的人口居住在山区,山区成为人口和资源比较密集的地域,是我国 21 世纪最具发展潜力的地区。山地还具有自然“水塔”的作用,产生于山地的河流提供超过一半的淡水资源,滋养着低地和平原的社会经济体系。同时,山地拥有丰富的生物资源,是我国森林分布的主要区域,森林的生态效应和经济贡献对于人类社会具有不可替代的作用。因此,对于山地森林的研究和保护是具有重大科学意义和应用价值的工作。

江河径流补给和水源涵养作用是山地森林植被系统的主要生态效应,它们是在山地特殊气候背景下,受到森林生态系统影响的一种陆地水文过程,也是陆地上最复杂的自然环境动力过程之一。森林水文作用受到山区大气、植物、土壤、地下岩层和河流的影响,成为影响江河水源补给和水资源有效性的关键因素,受到林业工作者、水利工作者、科学家和政府决策官员的共同关注,也是一个经久不衰的前沿科学领域。

山地森林生态系统的水文循环特征包括山地独特的水文气象环境和森林生态系统对径流形成的影响两个方面,而且这两个方面又是相互影响的,其中山地气候环境本身还对森林生态系统具有控制作用。因此有关的研究涉及地理学、气候学、水文学、植物生理学、森林生态学等方面,研究的结果将影响人类对自然现象的认识和对自然资源的保护与利用对策,所以山地森林生态系统的水文循环特征既是一个基础理论问题又是具有高度价值的应用性课题。

1.1 山地的水文气象特征

在山地特殊的气候和地形条件下,山区水文循环也具有自身的特点,影响山地水文现象的主要因素有海拔高度、地面坡度、地表覆被状态、土壤岩层结构,以及与降雨、蒸发有关的气候因子,在它们的共同作用下,使山区的河川径流量、径流系数以及洪水过程都不同于平原水网区或湖泊沼泽地带。根据钟祥浩和程根伟(钟祥浩等,2000)的研究,山地的水文气象特征主要表现在以下三个方面。

1. 山区降水特征

降水大小是山区气候的主要因子,从它对水文循环的影响来看,山区降水的垂直分布和形态类型(固态还是液态)具有最重要的意义。

山地(尤其是高山)不同于高原,高原是具有较高海拔的平缓地面。在空气中的水汽含量随高度而下降,在同样的动力作用下,高原上的降水小于低地。但是,高山区存在气流抬升和下沉的动力作用及山区温度分带差异导致的热力效应,这两者作用使得山地的降水量和降水日数均较大,而且呈现随高度增长而增长的趋势,直到在一个高度上达到最大降水量,而在最大降水高度以下,降水基本上都是随海拔而增大的(表 1.1)。

表 1.1 西部典型山区降水垂直分布特征

贡嘎山东坡			二郎山西坡			天山南坡		
站	海拔/m	年降水/mm	站	海拔/m	年降水/mm	站	海拔/m	年降水/mm
泸定	1 320	644	泸定	1 320	644	伽师	1 209	52.8
磨西	1 600	993	甘谷地	1 400	666	阿图什	1 298	70.2
三营	3 000	1 890	凉风顶	1 760	704	乌恰	2 137	170
林线	4 200	2 500	别托	2 040	795	巴音谷格提	2 400	210
			垭子口	2 840	1 008	吐尔格特	3 505	248

引自:《山地学概论与中国山地研究》,钟祥浩等,2000。

以上降水随山地高度而增大的特性在其他地方也存在,但在海拔超过 4 000m 的高山地区,多数降水将以降雪的方式发生,而一个地方是降水还是降雪则与当地的气温直接相关,还随纬度和季节而变化。可以用一个地方的零气温线的高度来作标志,假如当地的海拔高度为 H_0 ,月平均气温为 T_0 ,则该月的零气温高度 H_z 可以用如下公式来计算:

$$H_z = H_0 + T_0 / \gamma$$

式中, γ 为气温梯度(一般为 $-0.65^\circ\text{C}/\text{hm}$)。在当地月零度线高度 H_z 以上的山坡,降水将以固体形态(雪)为主。

由于降雨和降雪形态上的差异,流域水文过程线呈现出极大的变化。流域对降雨的响应是短滞时系统,对于中小流域,一次降雨输入的水分的 80% 可以在 3 天以内到达流域出口,在 1 周内输出水量达输入的 90%。降雪的流域响应属于长滞时系统,在 5 000m 以下的山区,流域对降雪的响应延迟在 1 年以内,平均约为半年,即冬季降雪可以在来年夏季全部融化流出;在 5 000m 以上的地带,可能存在多年积雪,坡面积雪将存留 1 年以上,在以后一个较暖的夏季才能完全消融,或者转变为冰川补给,参与一个更长周期的冰-水循环过程。

在一些水汽特别丰沛的山区,例如,我国西部的横断山区、藏东南林区,山地水分的来源除了直接降水(雨雪)外,还存在明显的水平降水,即山区云雾凝结也是水分的一个来源。云雾凝结量在横断山区约为 30~100mm/a,当然因在这些地区直接降水量本来就比较大,水平降水的相对比重不大,在水文循环中也很少直接参与径流过程,但是它们对于植物的生长却具有重要作用,尤其是对苔藓、寄生类植物和其他阴性树木,云雾所带来的

水汽是它们可靠的水分来源,而且凝结水也使地面保持湿润状态,减小了地面土壤的缺水量,相应提高了区域的径流系数。

2. 山区蒸散发特征

蒸散发是水文循环中重要的输出分量,山区蒸散发大小取决于土壤湿润状态与蒸发潜力。在有的地区还受下垫面条件(如地面植被、农田、冰雪覆盖)的影响,蒸散发主要包括地面(土壤、水面、冰雪表面)的蒸发和植物枝叶的蒸腾作用两个部分。

影响蒸散发的主要因素有供水条件(地面水分状态)、空气动力条件(风速、湿度)和热力条件(大气净辐射、显热输送和气温)。理论分析和野外观测均发现,山区的蒸发量主要受热力因素决定,即气温和太阳辐射是影响地面蒸散发的关键因素。区域的蒸散发能力可以用当地的水面蒸发量来代表,大量的观测结果表明,区域的蒸发能力随海拔高度增加而降低。

大气热力学的基本性质决定了气温随海拔高度递减的规律,这种气温垂直递减规律虽然存在一定的区域差异和季节波动,但是总体递减规律和量级都具有高度的一致性。根据山区净辐射和气温分布,可以在理论上计算出地面净辐射能量随高程的增加而降低的变化性质,它揭示了在山区,影响蒸发的热力条件随高度递减的物理机制。

从这些实际观测结果来看,山区的蒸发量主要受蒸发能力(可用于水分蒸发的热量输入)控制,而蒸发能力是热量因子的函数。随海拔高度的增加,气温降低,净辐射能量减少,可供蒸发的热能减少,即使大气动力条件(风速)和土壤水分供应均比较有利,仍不能促进蒸发过程。这说明,在山区高海拔、低气温的条件下,决定蒸发量的控制因素是热力条件而不是水分条件。

理论分析和观测结果都表明,山区的水分蒸发能力和蒸散发量随海拔高度而递减,即山坡高度增加,蒸发能力减小。例如川西山区,泸定县(海拔 1 320m)的年蒸发量为 1 120mm;康定县(2 500m)的蒸发量减为 920mm;在 3 000m 的海螺沟气象站观测到的蒸发量仅有 330mm。

3. 山区冰雪的作用

我国西部山区都存在不同范围的冰川分布,并有更大面积的季节性积雪带。冰川和积雪对江河径流的影响十分明显,主要体现在冰川消融和融雪径流对河流的补给。

我国西部冰川大致可以分为西北地区的大陆性冰川和西南地区的海洋性冰川。从水文循环方面考虑,大陆性冰川的年降水量、消融强度、冰川运动速度都比海洋性冰川低,也就是说,海洋性冰川对河川径流的补给强度高于大陆性冰川。根据在我国西部一些冰川的考察,海洋性冰川区(以玉龙雪山、贡嘎山为代表)冰川的冰面温度均较高,约在 $0 \sim -1^{\circ}\text{C}$ 之间,冰面实测消融量在 $4 \sim 8\text{cm/d}$ 和 $400 \sim 750\text{cm/a}$ 左右。全区平均冰川消融径流模数为 $0.11 \sim 0.19\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$ 。对比之下,天山的冰面温度达 $-2 \sim -10^{\circ}\text{C}$,年均消融量仅有 217cm。

对于海洋性冰川河流的径流观测,冰川和积雪的消融是这些河流的主要水源,融冰(雪)占一些河流来水的 50% 左右。当然随着河流的增大,冰川面积比例相应减少,冰雪

融水的比例也就降低,对于横断山区,主要江河的平均冰雪融水量约为 60 亿 m^3 , 占总径流的 5%。

在冰川积雪带,地表强烈反射太阳辐射,地面温度低于裸露山坡,因此可供蒸发的热量不足,冰川积雪可以减少地面蒸发量。具体对于冰面,其反射率低于积雪面,如果冰川表面还存在冰碛物,表面的反射率更低,所以冰川上的蒸发(含冰碛物蒸发量)大于雪面。在山区积雪面上蒸发强度最低。不过积雪也增加了水分在山坡上的存留时间,也即延长了雪面水分升华汽化的有效历时,故积雪后蒸发强度的降低与蒸发历时的延长可能相互补偿,使积雪区保持在与其它地面接近的总蒸发量水平上。

在冰川分布区,冰面消融不但是河流水流来源,而且在冰川上还存在不可忽视的冰面水汽凝结。根据对贡嘎山海螺沟冰川上的实际观测,夜晚冰面消融减小或停止,但是由于空气湿度很大(接近 100%),在冰川表面或冰碛物表面受到冷却,可以产生水分凝结,在晴天的夜晚测定到凝结水达到 2mm,接近一次小雨的降水量。例如,在 1990 年 10 月 13~27 日的一段时间,观测到总凝结水量为 8.5mm,而同期冰面蒸发总量仅有 2.6mm。这部分凝结水一方面加大了区域水分来源,另一方面也为冰面输送了汽化潜热,有利于冰面的融化。所以,暖性冰川消融强烈的原因是多方面的。

总之,首先,在冰川补给为主的河流中,河川径流的特征首先表现为与气温相对应的日周期波动性和年周期变化特点。其次,流域的降水和径流还具有年水量不平衡的特点,即年径流量加蒸发量不等于当年降水总量,其差值为冰川水的补充或消融增量,流域中存在多年存储的特点。第三,冰川河流的径流年际变化很小,各年的水量变化不大,反映在径流的变差系数 C_v 上。冰川河流的 C_v 仅仅为 0.01~0.05,而一般非冰川补给河流的 C_v 达到 0.1~0.2。最后,冰川河流容易发生冰坝溃决型洪水,这是因为冰川的运动和消融的差异性使在冰川内部或冰川末端发生冰碛物质堵塞,导致冰川区域形成湖泊,而在冰湖水位达到一定高度后必然发生溃决,形成类似溃坝的特大洪水,这在西藏许多河流以及横断山区地区都已观察到,而且这种冰川洪水还是冰川泥石流的重要原因。1989 年 8 月,在贡嘎山东坡发生的一次特大泥石流,泥石流的强大龙头冲入大渡河,并将汹涌的大渡河堵塞,这次泥石流就是由于贡嘎山东坡的燕子沟冰川产生的冰川溃决洪水引发的。

1.2 山地与森林生态系统

山地森林生态系统是山地生态系统中的一个亚类,但却是整个生态系统中的主要和最重要的部分。森林系统一方面具有最高的生物量和生产力,另一方面还是其他生态系统存在的基础与条件,对于山地的环境也具有重要的影响。

山地的基本属性决定了森林生态系统的结构和功能,其中主要是由于山体高度的差异产生的气候分异性,它与其他环境因素一起对森林生态系统的类型与分带起控制作用。例如,山地产生的局部地形差异形成了流域、山岭、斜坡和谷地生态系统,其中斜坡的高度差别又形成了不同气候带的生态系统,这些生态系统中,森林的种类、结构和功能都具有明显的差别,由此还改变了林下土壤的质地结构。

对于中国西南地区,山地格局造成的森林生态系统分异的主要特征是形成了与纬度

不一致的森林群落高程分带,这一点在横断山区表现得最充分,由于地形高度的变化,在山区主要有以下七种基本森林类型。

1. 高山灌丛

在3 800m以上的林线高度上,主要分布有以杜鹃和高山柳为主的高山灌丛,包括几种杜鹃(*Rhododendron cephalanthum*、*R. phaeochrysum*)、高山柳(*Salix* spp.)和高山栎树(*Quercus aquifolioides*)。它们具有比较高的地面盖度,冠层以下还散布着各种草本植物,是高寒山区重要的常绿植物层,对于山地坡面物质的稳定和调节高山水分具有特殊的作用。

2. 亚高山暗针叶林

主要由云杉、冷杉构成的暗针叶林是西南森林生态系统的主体,也是本区主要江河源头水源涵养林带的基本类型,这种森林类型主要分布在海拔2 500~4 000m广阔的亚高山地区,主要以川西云杉(*Picea balfouriana*)、丽江云杉(*P. likiangensis*)、黄果云杉(*P. balfouriana* var. *hertella*)、麦吊云杉(*P. brachytyla*)、鳞皮冷杉(*Abies squamata*)、峨眉冷杉(*A. fabri*)、长苞冷杉(*A. georgei*)、川滇冷杉(*A. forrestii*)等为主要建群种形成的群落。在景观上形成连绵分布的暗绿色森林海洋。

暗针叶林分布带的年平均气温在 $-2\sim 5^{\circ}\text{C}$,是山地寒温和潮湿环境的产物,林带分布的高度正是大气的水汽凝结层,云雾多、降水量大、湿度高是这个高度生态系统的主要环境特征,加上林下有机质含量很高的暗棕壤土壤,具有很高的孔隙率和蓄水容量,也决定了暗针叶林生态系统具有很高的径流系数,对于江河补给水源具有重要作用。

3. 亚高山针阔叶混交林

海拔2 000~2 600m的山地是针阔叶混交林带的分布带,是上部暗针叶林和下层阔叶林带的过渡区,主要分布着以铁杉(*Tsuga chinensis*)、槭树(*Acer*)和桦木(*Betula*)为高大乔木代表的复合群落,这里云雾缭绕、气候温和潮湿,年平均温度($7\sim 10^{\circ}\text{C}$)稍高于暗针叶林分布带,具有较高的降水和湿度。土壤主要为山地棕壤,具有较高的有机质含量。

4. 中山针叶林

以华山松(*Pinus armandi*)、高山松(*P. densata*)为建群种的中山针叶林分布于中山地区,是山地阳坡的主要群落,在亚高山阳坡也有斑状分布。松树具有喜阳耐旱的性质,在降水较低、气温较高的山坡多有分布,一般年降水量大于700mm、气温在 $4\sim 11^{\circ}\text{C}$ 、大于 10°C 的积温在 $1\,000\sim 2\,500^{\circ}\text{C}/\text{a}$ 的气候范围内都能生长。高山松还多与各种类型的高山栎类(*Quercus aquifolioides*、*Q. pannosa*、*Q. longispica*)混交。

5. 低山针叶林

在海拔1 000~2 000m的地区,分布有喜温暖的针叶树种,常见的有云南松(*Pinus yunnanensis*)、云南油杉(*Keteleeria evelyniana*)、柏木(*Cupressus funebris*)、杉木

(*Cunninghamia lanceolata*) 等,除了云南松、云南油杉外,大部分都散生于其他森林群落中。

6. 低山常绿阔叶林

常绿阔叶林是在海拔 1 000~2 000m 分布的主要森林类型,包括油樟(*Cinnamomum longipaniculatum*)、山楠(*Phoebe chinensis*)、青冈(*Cyclobalanopsis glauca*)、巴东栎(*Quercus engleriana*)、苞懈柯(*Lithocarpus cleistocarpus*)等树种,有的树种可延伸到海拔 2 400m 以上,与中山混交林相接。常绿阔叶林分布的气候条件,一般为年均温度 10~13℃,大于 10℃ 的积温在 2 500~3 800℃/a,降水在 1 000mm 以上,土壤主要为山地黄壤或黄棕壤,海拔较低且地势平坦的河谷地带,一般都被开发为农田,所以森林保留不完整。

7. 低山河谷落叶阔叶林

在海拔 1 500m 以下的低山或河谷地带,一般气温较高,降雨较少,阳光充足,成为干旱或干热河谷,高大阔叶乔木生长受到限制,而被低矮灌丛、光叶栎林或云南松代替。由于这里地势比较低缓,接近河道水流,人类活动强度大,土地大部分都已开发成农田,地带性森林群落已经很少保存,多数生长的是人工用材林和果树林,在水分充足的地方还有竹林和热带乔木生长。

森林生态系统改变了山地表层的物质结构,成为地球生物圈的主要支撑体系,它们具有生物生产功能、机械稳固功能和生态屏障功能,对于所生长的地面具有再造和保护作用,同时也使得流域下垫面具有更丰富的层次,改善了水分的储存和流通环境,对水文循环机制具有重大的作用。

1.3 山地生态环境对水文循环的影响

山地的地表结构、气象环境和生态系统都对水文循环具有重要的影响,它使得本区域的水文循环具有与其他非山地区域不同的特点,这里主要需要考虑下面三个因素。

1. 森林生态系统的水文作用

我国山区是森林资源集中地区,森林的存在也在一定程度上影响着水分的分配。在林区,降水将首先被树冠承接。林冠对雨水的截留减少了到达地面的水量。在降水的初期,林冠截留量比较大,随着降水的延续,林冠持水逐渐饱和,截留水量逐渐减小,并产生滴落和树干流。当树冠持水达到某个最大值后,林冠对降水的截留作用消失。

根据对针叶林地的观测,密集的林冠层最大可截留雨水达 20mm,但对不太茂密的林地或林冠优势不显著的树种,一般次最大截留量在 10mm 左右。对于成熟的暗针叶林,林冠截留量非常大,年持留率可达年降水的 20%~60%,平均达 33%。

这部分林冠截留雨水主要消耗于林地后期的蒸发上,故对于林冠截留水的分析,既可以在年水量平衡中作为蒸发因子计算,也可以在次洪研究中作为降水的前期损失来考虑。