



水科学博士文库

*The Precipitation Laws and
Snowmelt Runoff Simulation
in High Cold Alpine Areas*

高寒山区降水规律及 融雪径流模拟

穆振侠 姜卉芳 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

水科学博士文库

*The Precipitation Laws and
Snowmelt Runoff Simulation
in High Cold Alpine Areas*

高寒山区降水规律及 融雪径流模拟

穆振侠 姜卉芳 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书通过多源数据的综合分析、野外考察、典型流域水量平衡实验、土壤含水量监测等多项工作,采用现代水文学分析方法并结合遥感与地理信息系统,对高寒山区降水分布规律、积雪消融规律及融雪径流模拟的方法等进行了系统研究。内容包括天山山区概况、水文气象要素时空变化规律、积雪消融规律、降水垂直分布规律等,并在此基础上选取喀什河流域为典型流域进行了高寒山区融雪径流模拟方法的探讨,可为高寒山区水资源的合理开发利用、极端水文事件的预测与应对预案的制定、所在区域水利工程的正常运行及兴利效益的充分发挥等提供科学参考。

本书可供从事水文、水资源以及高寒山区与水相关工作的生产与科研人员阅读,也可供大专院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

高寒山区降水规律及融雪径流模拟 / 穆振侠, 姜卉
芳著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2015. 11
(水科学博士文库)
ISBN 978-7-5170-3837-5

I. ①高… II. ①穆… ②姜… III. ①山区—寒冷地区—降水—分布规律—研究②山区—寒冷地区—融雪—径流—水文模拟—研究 IV. ①P426.61②P331.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第278421号

书 名	水科学博士文库 高寒山区降水规律及融雪径流模拟
作 者	穆振侠 姜卉芳 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	170mm×240mm 16开本 11.25印张 219千字 4插页
版 次	2015年11月第1版 2015年11月第1次印刷
定 价	48.00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



前言

QIANYAN

高寒山区所在区域以其独特的自然景观格局、敏感的气候变化效应和重要的水资源形成及赋存区等一直以来备受各国政府和学者的关注并成为研究的重点区域。高寒山区作为高大冰川的赋存区、多年积雪的续存区域、大部分河流的发源地，对区域水资源的形成、当地社会经济的快速发展起积极的作用；但其又是冰川堰塞湖、溃坝性洪水、冰雪洪水、雪灾、雪崩和泥石流等极端自然灾害的多发区域，给人类带来了巨大的灾难，造成了重大的直接和间接经济损失。新疆地处内陆干旱、半干旱地区，气候干燥，降雨稀少，蒸发强烈，总体上水资源紧缺，生态环境脆弱。发源于高山冰川及多年积雪区的河流是其最主要的水源来源，维系着绿洲的消长与生态环境及社会经济的可持续发展，而降水又是决定河川径流量大小的决定性因素。高寒山区不便的交通条件、恶劣的气候条件及稀少的监测站点极大地限制了所在区域水文气象因素变化规律与产汇流规律的认识与研究，极大地阻碍了山区水资源的合理开发利用、极端水文事件的预测与预警、水利工程兴利效益的充分发挥。随着科学技术的发展、遥感与地理信息系统的日益成熟及其在水文方面的成功应用，为高寒山区相关方面的研究提供一定的技术支撑。

笔者自2004年以来，一直从事高寒山区降水分布规律、洪水预报、水库兴利调度等方面的研究工作。通过野外实地调研、典型流域水量平衡与积雪消融规律观测，对高寒山区水文规律有了一定的感性认识，通过对收集的长期水文气象观测数据的分析和历史文献考证，对高寒山区降水分布规律与产汇流过程获得了理性的认识，并在与国内外相关专家的交流学习中开阔了视野，拓宽了研究思路。本研究获得了国家自然科学基金（51209181，51469034，50669006）、新疆农业大学水利工程博士后流动站、新疆维吾尔自治区

区地方公派出国留学成组配套项目 (XJDF201307)、新疆水文学及水资源重点学科基金 (xjswszyzdxk20101202) 与新疆教育厅重点项目 (XJEDU2006I21) 的资助。研究工作充分考虑到高寒山区匮乏的水文气象监测数据的局限性、降水分布规律正确认识与产汇流规律合理刻画的必要性,借助已有的水文气象数据、气象卫星数据与地理信息系统平台,并充分考虑水汽来源方面及不同耦合因素对降水分布规律与产汇流规律刻画的影响,力图对高寒山区降水垂直分布规律有一个定量化的认识,能够较好地再现产汇流过程,更好地指导所在区域水资源的合理开发利用、自然灾害预警与应对、服务水利工程等而开展的应用基础理论研究。本书就是这一研究的部分成果,其特色如下:

(1) 在理论分析的基础上,采用不同方法对获取的完整的水文气象序列、地表径流变化趋势进行定性阐述,并对积雪消融规律、NDVI 与积雪消融规律的相互作用与相互影响进行探讨。

(2) 充分挖掘现有的水文气象数据,基于 TRMM/TMI 卫星降水数据与实测站点降水数据,探讨了 TRMM/TMI 卫星对天山山区降水的探测能力及其在受自然和地形条件限制而无法监测地区降水分析预测中的可用性,并充分考虑水汽来源方向的特点分区分典型剖面研究天山山区降水的垂直分布,提出分布规律的分析方法与表达方式。

(3) 充分利用基本水文站、气象站、自动测报站和遥感数据以及挖掘基层水情技术人员的经验,以地理信息系统 (GIS) 为平台,以天山山区典型流域为实例,充分考虑地形、植被、坡度、坡向等因素,以三水源新安江模型为基础,合理地刻画了产汇流过程。为观测资料缺乏流域水文预报模型中参数的确定提供依据,提高融雪径流研究的科学水平,为降水资料观测缺乏地区水文预报模型中参数的确定提供一定的依据。

本书共分 9 章,第 1 章在综述国内外研究进展的基础上,明确了高寒山区降水垂直分布规律及融雪径流模拟的主要研究内容与方法。第 2 章介绍基于水文、气象及遥测站点基础数据,采用不同方

法进行降水量空间插值方法优选,表明将高程、坡度、坡向作为影响因素引入到对降水量的空间插值中来的协克里金方法插值法,能提高模型的插值精度。第3章介绍基于研究区水文气象数据及 TRMM/TMI 卫星降水资料,探讨 TRMM/TMI 卫星降水资料对天山山区降水的探测能力,表明 TRMM 卫星对天山西部山区的降水过程有一定的探测能力,其变化趋势与实际情况相近,具有一定的可信度。第4章介绍基于研究区水文气象数据及 TRMM/TMI 卫星降水资料,分析天山山区降水垂直分布规律,表明山区降水在垂直方向上分布规律与水汽来源方向、纬度、海拔高度、地形条件、盛行风向和风速等一系列因子有关,其中受地形条件影响较显著。第5章通过实测数据分析,阐明在全球气候变暖的背景下,研究区气温升高趋势明显;山区与平原区降水变化规律并不完全一致,季节分配不均匀;径流变化趋势不显著。第6章基于 MODIS 积雪覆盖数据考虑研究区地形变化,分析天山西部山区积雪的时空变化特性、积雪消融规律,为融雪径流的模拟奠定了基础。第7章基于 MODIS NDVI 数据和积雪覆盖数据,分析 NDVI 时空变化特性与积雪消融规律的关系,表明除积雪消融与 NDVI 有其自有的变化规律外,两者之间也有很好的相关性。第8章基于不同期土地利用数据及 SWAT 模型,分析 LUCC 变化对天山西部山区融雪径流的影响,表明研究区耕地向草地和居民点及工矿用地的转换构成了土地利用变化的主导过程,其中居民点及工矿用地变化率最大,达到 340.68%;由于山区土地利用类型未发生大的变化,因此,20 世纪 80 年代和 2000 年山区融雪径流对 LUCC 的响应基本一致,对径流的影响基本没有大的改变。第9章以三水源新安江模型为基础,综合考虑研究区冰川、积雪、土壤和植被等因素,构建高寒山区分布式水文模型,并对流域水文过程模拟,表明所构建的高寒山区分布式水文模型基本适用,径流模型结果较理想,采用 TRMM/TMI 卫星降水资料、探空气温、MODIS 数据等确定模型参数的方法可行。

本书由穆振侠、姜卉芳执笔,其中第1、第2、第6、第9章由杨随柱、彭亮和何英参与数据处理、模型调参、部分文字的编写与

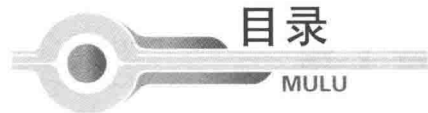
校对工作，全书由穆振侠、姜卉芳修改并定稿。

本书得到了新疆农业大学及新疆农业大学水利与土木工程学院的大力支持，也得到了新疆农业大学唐新军教授、侍克斌教授、虎胆·吐马尔白教授、马英杰教授、周金龙教授、杨鹏年教授、崔龙副教授、刘丰副教授、吴彬副教授、石铁玉讲师、四川大学梁川教授和河海大学余钟波等的帮助，新疆农业大学水文与水资源实验室为研究的实施创造了优越条件，李芳、王娟、王鹏、吴万虎、张乐乐、邵成国、田龙、姚安琪、李绅、鲜丽菊、于宴民、李承红、高瑞、尹梓渊、周育琳等众多硕士研究生参与了研究中水文气象数据的整理、录入与分析、遥感数据的解译与处理及野外调查与现场实验等工作，特此一并致谢。

限于时间和作者水平，书中疏漏及不妥之处在所难免，诚望读者批评指正。

作者

2015年7月



目录

MULU

前言

第 1 章	绪论	1
1.1	研究的背景与意义	1
1.2	国内外研究现状	3
1.3	本书主要研究成果	17
第 2 章	降水量空间插值方法优选	20
2.1	研究数据	20
2.2	研究方法	21
2.3	降水空间变化	25
2.4	小结	29
第 3 章	TRMM/TMI 卫星降水资料对天山山区降水的探测能力	30
3.1	研究数据	30
3.2	研究方法	31
3.3	TRMM 卫星降水数据对山区降水的探测能力	31
3.4	不同数据源分析天山山区降水空间分布的对比	41
3.5	小结	43
第 4 章	天山山区降水垂直分布规律的探讨	45
4.1	研究数据	45
4.2	研究方法	46
4.3	天山山区分区	46
4.4	天山山区降水垂直分布规律的探讨	47
4.5	小结	80
第 5 章	水文气象要素演变规律	83
5.1	研究数据	83
5.2	研究方法	84

5.3	气候变化趋势分析	87
5.4	小结	95
第 6 章	天山西部山区积雪时空变化特性	96
6.1	研究方法	96
6.2	典型区选取及数据来源	96
6.3	天山西部山区高程分带	99
6.4	天山西部山区积雪覆盖度时空变化特性	101
6.5	小结	109
第 7 章	NDVI 时空变化特性与积雪消融规律的关系	110
7.1	研究方法	110
7.2	典型区选取及数据来源	110
7.3	MODIS NDVI 合成数据简介	111
7.4	天山西部山区 NDVI 时空变化特性	111
7.5	积雪消融规律与 NDVI 的关系	116
7.6	小结	121
第 8 章	LUCC 变化对天山西部山区融雪径流的影响	122
8.1	研究数据及方法	122
8.2	土地利用/土地覆被变化分析	122
8.3	土地利用/土地覆被变化对径流过程影响的模拟研究	127
8.4	小结	131
第 9 章	高寒山区流域水文过程模拟	132
9.1	高寒山区分布式水文模型的构建	132
9.2	流域水文过程模拟	144
9.3	小结	163
参考文献		164

第 1 章 绪 论

水乃生命之源，决定着万物的生存环境，与经济社会发展密切相关，是经济社会发展的战略资源和经济资源。随着人口的增长和社会经济的发展，水资源供需矛盾日益突出，严重制约着人类的发展。全球气候变化使得水资源的时空分配极不均匀，“南涝北旱”“南早北涝”“南早北雪”和“南雪北冰”等极端自然灾害频繁出现，全球自然灾害已呈现出逐年加剧的趋势，成为对人类社会和经济发展造成损失或产生不良影响的主要因素，对人类生存和发展造成了极大的挑战。21 世纪，全世界都面临抵御自然灾害的极大挑战。

降水作为水资源的重要补给，由于其本身特点及目前观测站网分布的稀疏性和不均匀性，限制了人们对其分布规律的研究，已经成为制约水文模型研究的瓶颈，其中对高寒山区融雪径流的模拟尤为不足。正是由于水文现象的复杂性和信息资料的不足，在一定程度上限制了水文学理论的发展，但随着科技的进步，地理信息系统、遥感和电子计算机等新技术新手段被引进至水文领域，在某种程度上又促进了水文学的发展，激励了部分学者对新的问题及更高研究领域发起挑战。

1.1 研究的背景与意义

进入 20 世纪 90 年代以来，在全球气候变化的大背景下，各种极端天气气候事件频繁发生，破坏程度越来越强，影响越来越复杂，应对难度越来越大，给全球的经济发展和人民生活带来了巨大的损失和严重的后果。极端天气频繁出现，是大自然向人类敲响的警钟，已经成为一个不可忽视的全球性问题。面对种种自然灾害的发生，各国政府相关部门虽然也在努力地推进防灾减灾工作，但防灾减灾工作仍然面临着许多亟待解决的问题和困惑。21 世纪，全世界都面临着提高抗洪、抗旱、治理污染和其他防治与水相关灾害的挑战，地处干旱半干旱地区的新疆更是压力巨大。

新疆位于中国西北边陲，地处亚欧大陆腹地，“三山夹两盆”的特殊地形，使融雪及融冰成为其河流的重要补给水源，尤其是“大河”大多发源于高山冰川及多年积雪区，至出山口河流落差多在 4000m 左右，即使在夏季，山上仍有落雪现象。山区是径流形成区，平原为径流散失区，但是雨量站却大都布设



在农区或出山口附近。高寒山区由于特殊的地形条件和高寒气候，所形成的积雪的物理和水文特性与其他气候条件（如海洋性气候条件）下形成的积雪有很大的不同。高寒山区冰川广布，积雪与冰川有着千丝万缕的联系，因此，与内陆干旱环境下的积雪水文特性也有一定的差异，其积雪水文过程具有独特的高原地域性特点。但是，由于该区地势高度差异悬殊，地形复杂，气候异常恶劣，没有观测站点，更无从谈及积雪观测资料，时至今日，山区积雪水文过程的研究仍是空白。因 2500m 以上山区雨量站寥寥无几，山区降水资料不足，对产流区的情况掌握不准确，阻碍了高寒山区水文研究的深入发展，洪水预报方法与技术研究严重滞后，远不能满足国民经济发展的需要。而近年来随着地理信息系统（GIS）和遥感（RS）的快速发展及在水文上的成功应用，积雪信息的方便获取为研究高寒山区积雪水文特性提供了新的手段和一定的技术平台。

降水是全球水分和能量循环中最关键的因素，但人们对其了解较少。降水具有很大的时空变化性，且是较难测量的大气参数之一，成为制约相关研究发展的瓶颈，尤其是制约水文预报精度的主要因素。由于受到地形、山脉走向、坡度和水汽来源方向等多种因素的影响，山区降水的垂直分布规律较复杂，并不是简单的随高度线性增加，各地降水相差悬殊。山地能够产生局地环流及气流遇山脉拦截被迫抬升，加之受风速、风向和海拔高度等因素的影响，造成了降水在垂直方向上分布极不均。降水分布的不均匀性是造成不同区域不同高程带植物种群的差异性、自然景观多样性和复杂性因素之一。新疆现有水文气象站点一般都设置在高程 2000.00m 以下的中低山带，尤其是雨量站点在面上分布不均，70% 的站点布设在天山南北坡的低山带和山前平原区，其中气象站点多设在平原城镇，水文站多设在河流出山口处，中、高山以上地区站点稀少且分布极不均匀。由于受到地形条件、自然条件、财力、物力等方面的限制，严重制约了山区降水量的观测，并且现有的观测站点通常一般都布设在中低山带并且是沿河谷布设，尽管近年来随着水利工程建设部分流域也布设了遥测站点，但这些站点通常也是沿河谷布设。这些增加的水文遥测站点对山区降水量分布的研究有一定的帮助，但由于布设位置较低并不能反映降水在垂直方向上的分布规律，并且遥测站点对降水量的捕捉受到捕捉器架设高度、风速、地形等因素的影响，捕捉到的降水量与实测情况有一定的偏差，这使得研究山区降水垂直分布规律及自然灾害的防御带来一定困难。在高寒山区由于受气象条件的限制，遥测站点一般在冷冻期（每年 1—3 月和 11—12 月）开始停测，在非冷冻期（4—10 月）才正常监测，因此资料的完整性受到一定的影响，进而影响到了与之相关方面的研究，如洪水预报、水资源评价等。获取精确的降雨空间分布特征的一种方法就是建立密度极高的雨量站网。虽然我国已建立了相当



多的遥测雨量站和气象站，但这只是有限的观测点，其资料密度远不能满足流域水文模型的需求。近年来随着卫星和遥感技术的快速发展及其在相关方面的成功应用，为研究降水提供了一种新的手段和更为稳定的平台，这对研究山区降水分布和对降水结构的认识有很大的帮助，进而为其他相关方面的研究提供一定可靠的依据。

传统的方法在对高寒山区融雪径流模拟或预报过程中受各种条件的限制并不能真实地反映高寒山区物理过程，而是以一种黑箱模型的形式来再现融雪径流过程，只注重输入和输出结果是否与实际相符合，对中间过程不加以考虑，这样有可能出现融雪径流中间过程与实际不符或出现极大反差的情况，且模型参数的确定受人为主观因素制约较大。近年来随着 RS 与 GIS 技术的快速发展及其在水文中的广泛应用，对研究资料不足地区水文规律和建立具有物理基础的融雪径流模型提供了可靠的技术支持，基于这种技术平台的分布式水文模型与实际情况更相符，更能够真实地再现融雪径流过程。

高寒山区降水规律及融雪径流模拟问题的研究，对于架起理论研究与生产实际之间互动的桥梁，深入开展降水相关方面研究、水文预报模型的扩展与深入具有重要的理论与现实意义。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 降水空间分布规律

降水是水文循环中最重要的、最活跃的物理过程之一。降雨的时空分布对流域产汇流的影响非常大。常规获取降雨资料的手段是雨量站网，而比较新的手段则是雷达测雨和遥感。雨量站观测的降雨资料称为点雨量，它只表示区域中某点或者一小范围的降雨情况；相对而言，遥测技术具有大范围获取信息的能力。

雨量站网观测的降雨量在空间上是非规则离散分布的，并不能完全反映实际降雨在空间上的连续分布。在水文学研究及实际运用中，常常需要从雨量站网观测值来合理提取降雨空间分布的特征值（如流域平均雨量）或者模拟降雨空间分布（如等雨量线）。例如在集总式水文模型中，常常需要流域的平均降雨量（面雨量）作输入；在分布式水文模型中，则需要估计流域数字高程模型中每个网格点上的雨量值。因此，根据雨量站网观测值进行降雨量空间分析具有十分重要的实际意义。

1.2.1.1 国外研究现状

影响降水空间分布的因素很多，主要包括：气象站点的经纬度、站点高



程、坡向、坡度、离水体的距离等。此外,风速对降水也有一定的影响,适当的风速有助于提高降水的强度;在低海拔地区,降水大致与高程和风速成正比;当海拔增加到一定的高度,降水会随着海拔的增加而降低。降水有时还呈现很强的季节变化,这些都为准确地进行降水空间分布的研究带来了一定的困难。由于日降水、月降水和年降水的时间尺度不同,在考虑地形影响的情况下,影响降水的变量参数随着时间尺度的增大而减少,因而,所采用的确定降水量空间分布模型就存在一定的差异。Jeffrey 等在对日降水和月降水进行插值时,忽略了一些短时间效应的微观变量对月降水插值的影响。

影响降水空间分布的因素不同,所选择的降水插值方法和降水模型也不相同。对区域降水插值精度影响最大的是气象站点的数量及空间插值方法,在站点数量不变的情况下,影响区域降水空间插值精度的主要因素就是空间插值方法。

1911 年荷兰气象学家 A. H. Thiessen 提出的一种用垂直平分法来划分计算单元的方法。最初用于从离散分布气象站的降雨量数据中计算平均降雨量,现在在 GIS 和地理分析中经常采用泰森多边形进行快速地赋值。根据计算区域(流域)内的雨量站网,以雨量站为顶点连接成若干个嵌套的三角形,并尽可能使构成的三角形为锐角三角形。然后对每个三角形求其重心(三角形三边垂直平分线之交点)。利用这些三角形的重心,就可以将计算区域(流域)划分成若干个计算单元。此方法也被称为是泰森多边形法或加权算术平均法或最近临近点插值法,是一种近似估值算法。泰森多边形的一个隐含的假设是任何地点的空间属性数据(如降雨量)均使用距离它最近的观测站点的数据。而实际上,除非是有足够的观测数据,否则这个假设是不恰当的,因为降雨、气压、温度等现象是连续变化的,用泰森多边形法得到的结果图变化只发生在边界上,在边界内都是均质的和无变化的。如果站网稳定不变,采用此方法是比较好的,且方便,并能用计算机迅速运算。但是如果站网经常变化,采用此方法可能较麻烦,这种方法适用于站点密集的地区,并且该地区的地形应该大致相同。但是,泰森多边形法对于逐渐变化的空间变量(如温度、降水)的插值不太合适。同时,该方法忽略了高程的影响,对于高程变化较大的区域,用泰森多边形插值所得的插值数据的误差很大。

20 世纪 60 年代末,首先由气象学家和地质工作者提出反距离加权插值法(inverse distance to a power)来计算区域(流域)平均雨量,后来由于 D. Shepard 的工作被称为谢别德法方法,近年来在美国天气局得到广泛应用。该方法以插值点与样本点之间的距离为权重的插值方法,插值点越近的样本点赋予的权重越大。对于山区或者降水站点不是很密集的地区反距离加权法(IDW)有助于提高所预测数据的精度。这种方法的优点是可以通过权重调整



空间插值等值线的结构, 缺点是该方法也没有考虑地形因素(如高程等)对降水的影响。

1971年法国地理数学家 Matheron 和南非矿山工程师 Krige 提出了克里金插值方法, 此方法又称为地学统计法, 最早用于矿山勘探。这种方法充分吸收了地理统计的思想, 认为任何在空间连续性变化的属性是非常不规则的, 不能用简单的平滑数学函数进行模拟, 但可以用随机表面给予较恰当的描述。这种连续性变化的空间属性称为区域化变量或者空间变量, 可以描述像降雨、气压、高程及其他连续性变化的描述指标变量, 应用相当广泛。较常规方法而言, 它的优点在于不仅考虑了各已知数据点的空间相关性, 而且在给出待估计点数值的同时, 还能给出表示估计精度的方差。经过多年的发展与完善, 克里金插值法已经有了好几个变种, 如普通克里金法 (ordinary kriging)、通用克里金法 (universal kriging)、泛克里金法 (kriging with extensive)、协克里金法 (co-kriging) 等, 这些方法分别用于不同的场合。普通克里金插值法不能考虑地形因素(如高程等)等的影响, 而泛克里金法、协克里金法等可以将高程因素考虑进去, 取得的插值效果也比较好。

样条法也是一种常用来研究降雨平面分布规律的一种方法, 可以分为薄板滤波样条法 (thin plates smoothing splines)、规则变形插值法、张力规则变形样条插值法等。这种方法是通过 2 个样本点之间的曲线变形达到最佳拟合的插值效果, 优点是该方法相对比较稳健, 并且不怎么依赖潜在的统计模型; 缺点是不能提供误差估计, 并要求研究区域是规则的。Hutchinson 用薄板滤波样条法分析空间降水插值时提出了 5 种不同参数设置下的样条模型。Jeffrey 等就是利用三变量(经度、纬度和高程)对气象数据如温度和降水进行了插值, 并取得了较好的效果。

多元回归法主要是用数学表达式来描述相关变量之间关系的一种插值方法。可以利用气象站点的地理坐标和高程数据, 结合其他的影响因子如坡向、坡度等, 建立回归模型。Cross 等在预测菲律宾地区血吸虫病的发生率时以 Landsat 卫星遥感数据及各气象站点的气候变量(主要指气温和降水)数据为基础, 运用多元回归法对气温和降水的空间分布进行插值, 获得了研究区域内任意点的气温和降水数据, 进而分析区域内任意点的血吸虫病发生率。

Daly 等建立了 PRISM (parameter elevation regressions on independent slopes model) 插值模型, 该模型可对不同时间尺度的降水和温度进行插值分析, 属于多元回归法的一种。PRISM 模型假设在局部区域内, 高程是影响降水的主要因素; 模型以回归方程为基础, 利用气象站点数据、DEM (digital elevation model) 数据和其他的空间数据集, 对每个 DEM 单元格计算其特殊的气象—高程线型回归函数。该模型适宜于地形起伏较大的地区。



J. Marquinez 等为了将气象站点的降水数据反演到地形起伏较大的区域,利用多元回归方法和 GIS 技术,分析了降水和一系列地形变量的关系,并且指出最好的插值模型是将 5 个影响降水的地形变量因素(高程、坡度、坡向、离海岸线的距离和离相对西边的距离即任取研究区域西边的一条直线)作为影响因子来考虑。

随着降雨规律研究的深入,部分研究者把两种或两种以上的降雨规律研究方法结合在一起形成了一种混合插值方法,该方法是通过改正整体插值法中存在的残差来进一步提高插值精度。Serrano 等利用反距离插值法和样条法对整体插值后存在的残差(整体插值法是不精确的插值器,所预测的站点数据必然和已知数据之间存在一个残差)再次进行插值,生成一个降水残差修正图,最后将这个残差修正图与整体插值后的降水数据进行叠加。

2000 年,Goovaerts 提出了 3 种利用 DEM 信息的克里金法,并与泰森多边形法、距离反平方反比法、降雨—高程线性回归法及普通克里金法的结果进行了比较,结果发现 3 种利用 DEM 信息的克里金法所得到的结果较理想。

1.2.1.2 国内研究现状

国内对降水规律也有一定的研究,许多的学者作了多方面的工作,提出了一些新的方法,并对已有的方法根据所在研究区域的实际情况做了一定的改进,为与降水相关方面的研究提供可靠的技术支持。

由于受观测条件、自然条件、财力、物力等方面的限制,我国对降水规律尤其是山区降水规律的认识不够完全,只能定性地说明地形、经纬度与季节的不同对降水的分布规律有一定的影响,但是无法精确对中高山区的降水进行定量分析,而对低山区的研究较多,了解较全面。

1983 年,章淹结合多年研究成果和部分文献系统地阐述了地形对降水的作用,认为地形对降水的影响是多方面的,并且地形对降水的作用是与大气条件的变化相结合的,并非固定不变,研究地形对降水的作用将有助探查降水形成的机理与规律,可以提高降水预报的精度。

1985 年,汤懋苍对祁连山区降水的地理分布特征进行了研究。由于山地降水量的地理分布是相当复杂的,为了方便讨论他把山地任一点的实际降水量分解为由大尺度地理因素、高度因素和局地地形因素等 3 部分所组成,并建立降水与这 3 者之间的关系对祁连山区降水的地理分布特征进行了分析。认为祁连山区年降水与海拔高度呈现出三次曲线的关系,有一“极大高度”和一“极小高度”。“极大高度”自东向西逐渐升高,而降水量随高度的递增率则逐渐减小。

1988 年,蒋忠信对山区降水的垂直分布模式进行了探讨。他对傅抱璞在降水规律研究中提出的抛物线模式进行了讨论,并认为傅氏公式在一些地区降



水垂直分布计算中与实际误差较大,并对傅氏公式进行了改进,利用现有的观测站点的降水资料进行验证发现结果优于傅氏公式,并指出降水与地理位置密切相关,地区影响和海拔高度的影响是交织重叠的,各公式的模式也不是唯一的,改进的方法也有使用区域的限制,并不是一个通用的公式。

1989年,孙安健应用美国山地降水资料进行了降水量垂直分布的研究。主要依据宏观地理因素和局地海拔高度因素从各种气候区域和不同纬度上选择典型的坡地来揭示降水量的垂直分布规律。通过分析发现美国山地降水量的垂直分布是多种形式的,并不总是简单地随高度而增加,而是和坡地的地理位置、坡向以及季节有着密切的关系;降水量随高度的递增(减)率不是均一的;年最大降水量高度几乎不随年份的不同而改变,但其年降水量却有着很大的年际变化。

1992年,傅抱璞进行了地形和海拔高度对降水的影响的研究,并提出了一个表示降水与地形、海拔高度与地区气候条件关系的数学模式,并对各个参数的确定进行了研究。通过研究发现地形对降水的最大影响发生在盛行风向与向风坡坡向的交角附近。

1994年,张克映等根据哀牢山脉北段迎风坡和背风坡地8个气象站的资料,讨论了山地总降水和冷、暖平流降水的垂直分布、降水要素与海拔高度的关系及山地总降水与东西坡地的对比特征。

1995年,陈明等分析了各种不同的自然条件下山区地形对暴雨的影响,指出山区复杂的下垫面热力和动力作用对暴雨有触发、加强或削弱、消亡的影响,在不同的区域地理背景下,地形的影响各不相同。

1995年,喻家龙等以傅抱璞公式为出发点,直接对傅抱璞公式中的抛物线进行二次响应面回归,计算简便、精确度高,同时还对山地降水高斯模式进行了简化,并将其应用于黄山降水分析中,效果较好。

1996年,王菱根据华北山区降水随海拔高度变化的不同参数将地形按不同坡地方位进行分区,研究降水随海拔高度和宏观地形高度变化规律,并求出宏观区域最大降水高度的分布。

1996年,喻家龙等针对蒋忠信对山地降水高斯模式计算中的问题,提出3个参数的高斯模式及其非线性回归计算方法,并将其应用于我国部分山地降水规律分析中,取得较好的效果。

近年来随着计算机技术和GIS技术的快速发展,为降水规律的研究提供了一个较好的平台,加速了降水规律方面的研究。国内许多学者都在尝试一些好的研究降水规律的方法,并把国外研究较好的分析方法在国内加以验证并加以改进。

由于区域的差异,不同区域降水规律研究方法与分析结果各不相同。因此



国内许多学者对各种方法如克里金插值、反距离加权、Delaunay 三角剖分线性插值、双谐样条 (biharmonic spline) 插值和 Cressman 客观分析、PRISM 和泰森多边形法等方法在不同区域的适用性和降水规律分析结果精度的高低进行了探讨, 并根据实际情况进行了一定改进, 得到了适宜不同地区的较好的方法, 为与降水相关方面的研究提供了一定的指导依据。

影响降水量分布的因素是多方面的, 如海拔高度、经纬度、坡度、坡向、风速等, 并且不同区域这些因素对降水量分布的主次关系是不同的。因此, 有些学者采用多元回归的方法建立了这些要素与降水量之间的关系来分析降水量的分布规律, 取得了较好的效果。2005 年, 舒守娟等利用卫星遥测数字化地形高程资料和西藏地区仅有的 27 个常规气象站的多年平均降水整编资料, 采用多元逐步回归方法, 建立西藏地区的年、季降水量和经度、纬度、海拔高度、坡度、坡向、遮蔽度等 6 个地理、地形因子之间的关系模型, 估算西藏地区降水量的空间分布。模型相关性显著, 平均绝对误差、相对误差分别为 0.93mm 和 1.16%, 回归效果较显著。分析表明, 估算降水能够定量、定性地再现西藏地区的实际降水分布。2006 年, 周锁铨等根据长江中上游 697 个气象观测站 1971—2000 年 30 年降水资料, 利用逐步回归方法和地理信息技术 (GIS), 建立了平均季降水和年降水与 4km 分辨率的 DEM、坡向、坡度等地形数据的回归方程。在此基础上发展了逐步插值方法 (SIA), 并与 GIS 技术和多元逐步回归方法结合, 显著提高了年、季降水空间分布的计算精度。

部分学者发现, 目前现有降水规律分析方法尽管与过去相比得到了很大改进, 适用范围更广, 但是在有些情况下并不与实际情况相符合。因此, 在现有方法的基础上, 根据研究区地理位置和地形条件加以改进, 取得了较好的效果。2005 年, 石朋等对常用的降雨空间插值方法进行了分析比较, 考虑到高程对降雨量影响较大, 在协克里金方法的基础上将高程作为第 2 类影响因素引入降雨量的空间插值方法中, 并提出了引入高程信息的协克里金方法。结果表明, 考虑高程信息的协克里金方法的插值效果较好。2007 年, 穆振侠等采用多种方法对天山西部山区降雨量的空间分布进行了探讨。考虑到高程、坡度、坡向三要素对降雨量影响较大, 在协克里金方法的基础上将上述三要素作为影响因素引入降水量插值方法中, 改进了协克里金方法, 分析发现改进的协克里金方法是可行的且插值结果较理想。

近年来随着计算机技术的快速发展以及神经网络技术一些方面的优势, 此技术也逐渐被用在研究降水规律分析方面。人工神经网络不要求对事物机制有明确的了解, 系统的输出只取决于系统输入和输出之间的连接权, 而这些连接权的数值则是通过训练样本的学习获得, 这种方式对解决机理尚不明确的问题特别有效。1995 年, Wong 等提出的空间降水局部插值新方法就是将 SOM