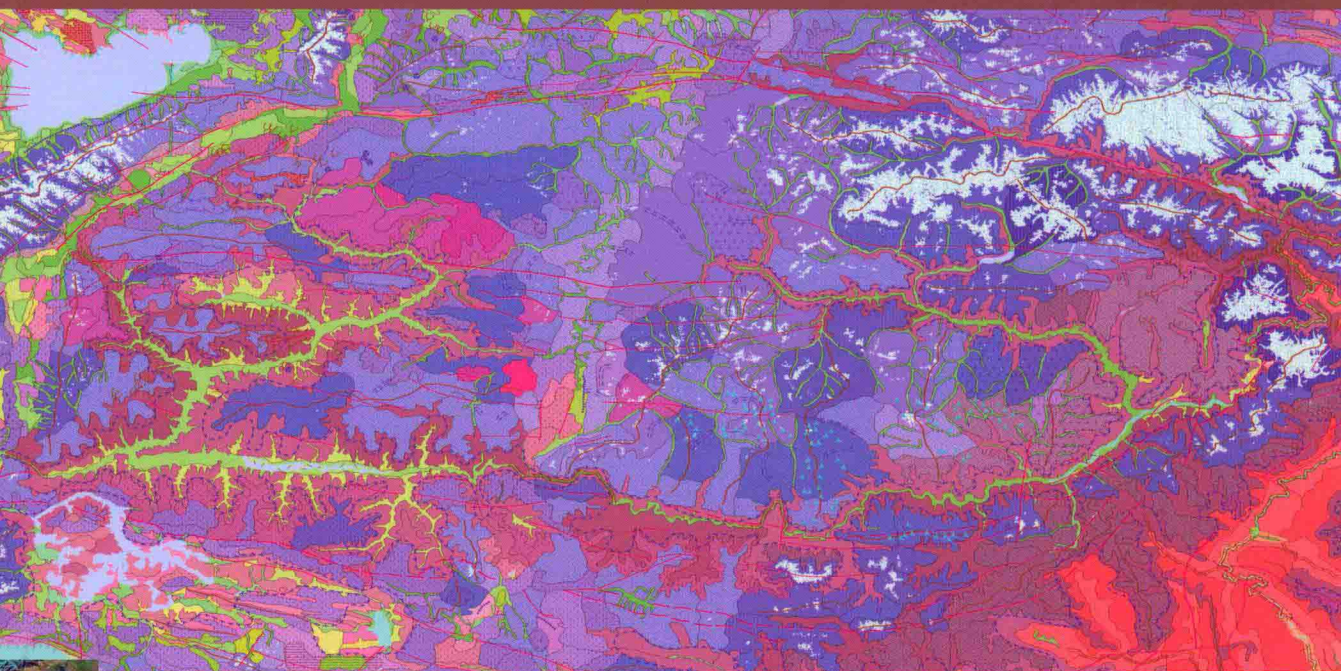


# 青藏高原高寒地貌 格局与变化

程维明 赵尚民 叶庆华 张文杰 著



科学出版社

# 青藏高原高寒地貌格局与变化

程维明 赵尚民 叶庆华 张文杰 著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书基于中国数字地貌类型数据、地貌区划数据、遥感影像数据、气象数据、SRTM3 DEM 和 ASTER GDEM 等多源数据,以青藏高原为研究区,对青藏高原高寒地貌的空间分布格局进行了分析,并对其动态变化进行研究和预测。首先,通过获取青藏高原的山系分布,分析冰川地貌在青藏高原及各个山系的空间分布格局;然后,利用多源遥感影像和 DEM 数据、气象数据等多源数据,获得青藏高原典型山峰高海拔冰川的空间分布动态变化,分析重要流域冰川-湖泊变化特征,并对冰川-湖泊变化及其对气候的响应进行研究和探讨;再次,基于地貌数据对青藏高原进行地貌区划,并分析冰缘地貌在青藏高原及不同地貌区的空间分布特征;最后,利用各种数值模拟模型,对青藏高原冰缘地貌的空间分布和动态变化进行数值模拟,并通过响应模型和气候预测数据,对青藏高原多年冻土的未来变化进行预测和分析。

本书可供从事地貌、遥感和地理信息系统等学科的科研人员以及高等院校相关专业的师生参考使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

青藏高原高寒地貌格局与变化/程维明等著. —北京:科学出版社, 2017.3

ISBN 978-7-03-052316-7

I. ①青… II. ①程… III. ①青藏高原-寒冷地区-地貌-研究  
IV. ①P942.774

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 052759 号

责任编辑:彭胜潮 赵 晶/责任校对:何艳萍

责任印制:肖 兴/封面设计:铭轩堂

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

\*

2017年3月第一版 开本:787×1092 1/16

2017年3月第一次印刷 印张:19 3/4

字数:470 000

定价:158.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

# 序

作为世界第三极的青藏高原，气候严寒，地貌类型复杂多样，是世界上难得的高寒地貌研究的天然实验室。一批又一批的地貌学家、地质学家克服重重困难，深入高原内部，对冰川与冰缘地貌开展调查，获取了大量第一手地貌资料，发表了一系列原创性、高质量的论文与专著。例如，如斯文·赫定(Sven Hedin, 1894年, 1899年, 1906~1908年)、海登(H. Haydan, 1903~1904年, 1921年)等在西藏地区率先开展了高原考察，刘慎谔、徐近之和孙建初等学者分别对青藏高原西北部、南部和东北部进行过植物、地理和地质的科学考察。特别是20世纪50年代后，中国的科学家对青藏高原深入开展了一系列科学大考察：在1956~1967年和1963~1972年两次国家科学发展规划中，都把青藏高原科学考察列为重点科研项目；中国科学院在20世纪50~60年代先后对青藏高原进行了4次综合科学考察，1973~1976年又组织50多个专业联合进行了青藏高原综合科学考察，它集聚了地球物理、地质、地理、生物和农林牧业等的科研人员，对青藏高原进行了历时4年的科学考察，并出版了《青藏高原科学考察丛书》等一系列书籍；单地貌方面，就对西藏地貌、西藏冰川、西藏泥石流和西藏自然地理等进行了介绍，并取得了重大成果。自20世纪90年代起，国家启动了“青藏高原形成演化、环境变迁与生态系统研究”“青藏高原环境变化与区域可持续发展研究”“青藏高原形成演化及其环境、资源效应”等一系列重大科研项目，特别是从全球变化的视角展开更加系统的研究。在这些研究中，高寒地貌一直是其中的组成部分，并取得了丰硕成果，先后出版了《西藏地貌》《西藏冰川》《西藏泥石流》等专著。

程维明研究员带领团队从20世纪90年代开始开展中国数字地貌研究，出版了《中华人民共和国地貌图集(1:100万)》《数字地貌遥感解析与制图》等图集与专著。这本《青藏高原高寒地貌格局与变化》专著则是这项研究的延续与发展，以中国数字地貌数据为基础，详细分析青藏高原及各重要山脉分布区冰川地貌的空间分布格局特征，对重要山峰地区冰川地貌的空间分布动态变化特征进行分析，利用SRTM-DEM、ICESat和Cryosat卫星数据，分别获得念青唐古拉山西段地区冰川的冰面高程和冰储量变化，利用气象站点数据统计长时间序列气候特征，并进一步分析重要流域冰川-湖泊的空间分布变化及其对气候的响应关系。

对于冰缘地貌，该书首先利用中国数字地貌数据对青藏高原进行了地貌区划，并对青藏高原及其不同地貌区冰缘地貌的空间分布格局与特征进行了详细分析；然后，基于DEM与经纬度数据、多年平均气温数据，分别对青藏高原冰缘地貌的空间分布范围进行了提取，并与遥感解译结果进行了对比分析；同时，利用响应模型和逻辑回归模型分别对青藏高原冰缘地貌自20世纪60年代以来每个年代的空间分布进行了数值模拟，从而获得冰缘地貌空间分布动态变化特征；最后，通过气候模式获得未来气候变化数据，

并利用数值模拟模型，对青藏高原冰缘地貌的未来分布趋势进行了预测。

该书是我国青藏高原高寒地貌研究的第一本系统性学术著作，它的出版有助于全面、详细和深入地理解青藏高原高寒地貌的空间分布格局与动态变化特征，同时对青藏高原及其周边地区经济发展、生态环境保护和灾害监测等具有一定的作用，并扩大了青藏高原地貌研究的科学知识库，具有较大的科学意义和社会实践价值。

中国科学院院士



2016年11月

# 前 言

青藏高原位于中国西南部，其分布范围主要在我国西藏自治区和青海省境内，因此而得名。由于印度板块和亚欧板块的挤压，青藏高原在近几百万年来迅速隆升，并成为地球上海拔最高、面积最大、最年轻的高原。作为独特的地貌单元，青藏高原成为科学研究的热点区域而备受重视。但恶劣的自然条件、高寒缺氧、交通不便和地广人稀等因素，使得青藏高原的科学考察和研究变得相当困难。

遥感技术的快速发展和大量高分辨率遥感影像的不断出现，GTOPO30、SRTM 3 DEM、ASTER GDEM 等一系列覆盖全球陆地的数字高程模型(DEM)数据的发布与免费下载，中国数字地貌类型数据遥感解译的完成，青藏高原各种数据资料的日益丰富和功能强大的地理信息系统(GIS)分析技术，为青藏高原地区地貌研究提供了基础和条件。青藏高原高峻的海拔和寒冷的气候造成了地球上独特的高寒地貌，即高海拔的冰川地貌和冰缘地貌，它们的空间分布及其变化特征对区域的水资源安全、环境保护、荒漠化、生物化学过程、植被分布、基础设施建设和保护等具有重要影响，对全球气候变化也具有一定的指示作用。

鉴于此，本书基于中国数字地貌类型数据，对青藏高原高寒地貌(冰川地貌和冰缘地貌)的空间分布格局进行了详细分析，并对青藏高原冰缘地貌的空间分布动态变化进行了数值模型模拟，最后对青藏高原多年冻土未来的空间分布变化进行了预测。本书共分9章：第1章叙述本书的研究背景，研究意义，国内外研究进展，研究目标、内容及技术路线等；第2章主要介绍青藏高原的区域概况，包括地形特征、地质特征和气候特征等；第3章介绍本次研究的主要数据源的获取、初步处理及分析，包括地貌数据、数字高程模型数据和遥感影像数据等；第4章基于青藏高原重要山脉的分布，分析冰川地貌在整个青藏高原和各重要山脉的空间分布格局和分布特征；第5章利用多期遥感影像和卫星数据，获得并分析青藏高原重要山峰地区冰川的空间分布面积、高程变化和冰储量变化；第6章基于遥感影像和气象数据，研究青藏高原重要流域冰川-湖泊的变化，并对青藏高原重要山峰地区冰川变化和重要流域冰川-湖泊变化对气候的响应进行探索；第7章基于地貌数据，获得青藏高原地区数据，并对冰缘地貌在整个青藏高原和各个地貌区的空间分布特征进行详细分析；第8章对青藏高原冰缘地貌的空间分布动态进行了数值模型模拟，包括空间分布界线的数值模拟和空间分布动态的模型模拟；第9章利用响应模型预测青藏高原多年冻土未来的空间分布。

全书由程维明负责通稿和定稿，程维明负责第1章、第4章的编写，赵尚民负责第2章、第3章、第7章和第8章的编写，叶庆华负责第5章和第6章的编写，张文杰负责第9章的编写。郭柳平硕士、仲振维硕士、赵瑞硕士和赵永利硕士提供了重要的数据和资料；李炳元研究员、钱金凯研究员、申元村研究员和房金福研究员、田莉博士、章

诗芳硕士、武文娇硕士、王莉硕士、邢永鹏硕士、何维灿硕士、王娇博士、赵敏博士、王楠硕士、方月硕士、王睿博硕士、刘樯漪硕士、高晓雨硕士、宋扬工程师、路小娟工程师等参加了文字校对和图件编辑的相关工作。

本书的顺利编写与众多老师、同事、学生和亲人们的大力支持和无私奉献是分不开的，在此向他们表达深深的敬意和感谢。在本书编写过程中，始终得到中国科学院、科学技术部、国家自然科学基金委员会、国家测绘地理信息局和中国水利水电科学研究院等有关部门领导的大力支持，并得到测绘地理信息公益性行业科研专项项目(201512033)、国家山洪灾害调查项目(SHZH-IWHR-57)、国家重点基础研究发展计划(2015CB954101)、国家自然科学基金项目(41171332、41301469)和科技基础性工作专项项目(2011FY110400-2)等的资助，在此谨以谢忱。

青藏高原区域广阔，地势高峻，气候严寒，很难开展野外考察工作；遥感与GIS等高新技术日新月异，各种新的分析方法和研究手段层出不穷，分析手段不断创新；同时，青藏高原高寒地貌分布广泛，类型复杂多样，且一直处于动态变化中。由于作者能力有限，书中疏漏之处在所难免，恳请广大同行专家和读者批评指正。另外，作者承诺在本书中出现的一切学术问题，全部责任由作者自行承担。

程维明 赵尚民 叶庆华 张文杰

2016年5月1日

# 目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究意义	3
1.3 国内外研究进展	4
1.4 研究目标、内容及技术路线	17
第 2 章 青藏高原概况	21
2.1 青藏高原的地形特征	22
2.2 青藏高原的地质特征	24
2.3 青藏高原的气候特征	28
2.4 本章小结	30
第 3 章 主要数据源	32
3.1 地貌数据	32
3.2 数字高程模型数据	39
3.3 遥感影像数据	43
3.4 本章小结	44
第 4 章 青藏高原冰川地貌空间分布格局	45
4.1 青藏高原冰川地貌总体分布特征	47
4.2 青藏高原冰川地貌基本形态成因分布特征	53
4.3 青藏高原数字冰川地貌空间分布特征	61
4.4 青藏高原数字冰川地貌形态结构类型空间分布特征	82
4.5 本章小结	85
第 5 章 青藏高原冰川地貌空间分布动态变化	88
5.1 冰川分布的遥感提取方法	88
5.2 喜马拉雅山脉西段纳木那尼峰地区冰川变化的遥感监测	97
5.3 念青唐古拉山脉西段冰川空间分布变化的遥感动态监测	109
5.4 基于遥感影像的珠穆朗玛峰地区冰川面积及高程变化	116
5.5 基于 SRTM DEM 和 ICESat 数据的冰川冰储量变化研究	136
5.6 基于 SRTM DEM 和 CryoSat 数据的冰川冰储量变化研究	151
5.7 本章小结	157
第 6 章 青藏高原冰川-湖泊变化及其对气候变化的响应	161



---

6.1	青藏高原冰川-湖泊变化研究	161
6.2	青藏高原冰川对气候变化的响应研究	171
6.3	青藏高原冰川-湖泊变化对气候的响应研究	181
6.4	本章小结	188
<b>第7章</b>	<b>青藏高原冰缘地貌空间分布格局</b>	<b>191</b>
7.1	青藏高原冰缘地貌总体分布特征	191
7.2	青藏高原冰缘地貌基本形态成因类型分布特征	197
7.3	青藏高原数字冰缘地貌空间分布特征	198
7.4	青藏高原数字冰缘地貌形态结构类型分布特征	212
7.5	本章小结	214
<b>第8章</b>	<b>青藏高原冰缘地貌动态变化的数值模拟</b>	<b>216</b>
8.1	青藏高原冰缘地貌空间分布范围的自动提取研究	216
8.2	基于响应模型的冰缘地貌空间分布动态变化的数值模拟	225
8.3	基于逻辑回归模型的冰缘地貌空间分布动态变化的数值模拟	240
8.4	本章小结	272
<b>第9章</b>	<b>青藏高原多年冻土未来变化预测</b>	<b>274</b>
9.1	影响青藏高原多年冻土分布的主要因素选取	275
9.2	方法介绍	277
9.3	模拟结果分析	279
9.4	高程响应模型评价	286
9.5	本章小结	288
	<b>参考文献</b>	<b>289</b>

# 第 1 章 绪 论

青藏高原是世界上海拔最高、面积最大的高原，其严寒的气候发育了中纬度地区分布最广的高寒地貌，包括冰川地貌和冰缘地貌(有时又称冻土地貌)。高寒地貌的空间分布及其动态变化特征对基础设施建设和保护、水资源安全、生态系统和全球海平面变化等具有重要影响。基于中国数字地貌类型数据库，本书利用遥感与地理信息系统(geographical information system, GIS)技术，对青藏高原高寒地貌的空间分布格局进行了详细分析，并对其动态变化进行了长时间序列的深入研究，从而为理解青藏高原高寒地貌的空间分布及其动态变化奠定了基础。

## 1.1 研究背景

青藏高原位于中国西南部，其分布范围主要在我国西藏自治区和青海省境内，因此而得名；其轮廓仿佛“无脚无尾”的鸵鸟，头部在帕米尔高原，颈部在喀喇昆仑山和西昆仑山，脊背线为昆仑山、阿尔金山和祁连山，腹部线为全球最高的喜马拉雅山，东缘的横断山则仿佛是其下垂的尾端(徐近之，1960)。青藏高原主要分布在  $25^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$ ， $72^{\circ}\sim 105^{\circ}\text{E}$ ，总面积为 250 多万平方千米；其主体海拔在 4000m 以上，四周均耸立高大的山脉，中部为相对平缓的羌塘高原及东北部平坦的柴达木盆地(郑度等，1985；李炳元，1987；张懿铨等，2002)。关于青藏高原这样一个重要地貌单元的名称和范围的演变，20 世纪初被称为“西藏高原”，到 20 世纪中期则为“青康藏高原”，直到 20 世纪 50~60 年代，任美锷、周廷儒、黄秉维和徐近之等才陆续提出“青藏高原”的概念与区域范围，对高原名称和范围的认识才基本一致；而李炳元于 80 年代、张懿铨于 21 世纪初对青藏高原范围及面积的研究，才比较彻底地确定了青藏高原的边界(李炳元，1987；张懿铨等，2002)。

青藏高原是地球上海拔最高、面积最大、最年轻的高原，其地貌形成与隆升过程是地球构造史上近几百万年来最重要的事件(郑度，2003；郑度和姚檀栋，2004)，它在晚新生代的快速隆升改变了大气环流形势，促进了亚洲季风形成与全球气候变冷(赵洪壮等，2009；李吉均，1999)，并为中国及东亚第四纪地形地貌及水文分布的形成奠定了基础(向芳和王成善，2001)，因此对高原本身及其周围广大地区的地貌景观、自然界和人类活动都有重大影响(孙鸿烈等，1997)。自 20 世纪 60 年代板块构造兴起之后，这里成了大陆动力学研究的最佳“野外实验室”和揭开地球科学奥秘的“金钥匙”，因此其成为科学研究的热点区域而备受重视(高明星和刘少峰，2008；中国科学院青藏高原综合科学考察队，2000)。然而，由于青藏高原独特的自然地理条件，高寒缺氧，气候干燥，交通条件很差，地广人稀，生活工作条件极其恶劣，因此给科学考察和研究带来了很大

困难。中华人民共和国成立前及成立后,虽然对青藏高原进行过多次科学考察,特别是中华人民共和国成立后,曾进行过大规模、多科学的综合科学考察,然而由于青藏高原演变过程及其影响问题的复杂性和不可复制性,目前对此尚无统一的认识,还需要多指标、多学科、多种方法的相互印证来解决(李吉均,1999)。

遥感技术是20世纪60年代兴起并迅速发展起来的一门综合性探测技术,它主要在远离地面的不同工作平台(如气球、高塔、飞机和卫星等)上,利用传感器记录地表物体不同波段的电磁波信息,从而获得地球表面的资源与环境等信息,因此其在土壤、植被、水域、地质构造、自然历史变迁、全球性研究等多个领域得到广泛应用(陈述彭和赵英时,1990)。遥感技术的快速发展带来了全球多时相、多波段和不同分辨率的影像数据,从而为研究自然条件恶劣地区的典型地貌空间分布格局提供了条件。其中,美国国家航空航天局(NASA)完成的全球镶嵌的 Landsat TM 和 ETM+ 影像,具有全球统一的色调、波段组合和投影,这为利用遥感影像和 GIS 技术对青藏高原高寒地貌进行研究提供了重要的数据源。

数字高程模型(digital elevation model, DEM)自20世纪50年代被提出以来,就受到科学界和工程界的极大关注并进行了大量研究。DEM 作为数字化的地形图,其中包含着大量的地形信息,是提供地形分析、地形属性计算和特征提取等地表空间信息的重要基础数据(周启鸣和刘学军,2006)。目前,著名的全球 DEM 数据有 GTOPO30 数据、SRTM3 DEM 数据和 ASTER GDEM 数据等。GTOPO30 的水平分辨率为 30", SRTM3 DEM 的水平分辨率则为 3", ASTER GDEM 的水平分辨率只有 1"。DEM 数据质量的不断提高和数字地形分析技术的飞速发展,为青藏高原高寒地貌的空间分布格局的详细研究提供了数字条件下的新途径。

以遥感影像和 DEM 数据为主要数据源,利用 GIS 技术完成的《中华人民共和国地貌图集(1:100 万)》为在较大尺度上对青藏高原地貌类型进行研究奠定了基础(中华人民共和国地貌图集编辑委员会,2009),它不仅具有统一的数值地貌分类系统,而且采用定位、定量和定性相统一的地貌单元遥感解析模型,以及“统一科学名词、统一基础数据、统一系统分类、统一解析方法”的地貌遥感综合定量解析方法,实现了各图幅数据在内容上的一致性和无缝拼接,从而为研究整个青藏高原的地貌分布情况提供了条件。另外,本次地貌图编制采用数字方法和先进的遥感影像解译手段,并综合数字高程模型数据、地质数据等多源数据,不仅保证了准确性,也保证了时效性(周成虎等,2009)。通过对青藏高原典型地貌的空间分布格局进行研究,根据其分布特征推测其形成原因与作用机制,可以对青藏高原地貌演化过程进行预测,并为促使其向良性方向发展发挥作用(张世熔等,2003)。

本书主要对青藏高原典型地貌的空间分布格局和动态变化特征进行深入分析。青藏高原最典型的地貌类型无疑是高寒地貌,即冰川地貌和冰缘地貌。青藏高原冰川为全亚洲高原冰川的核心,这些冰川消融后流入北部的干旱荒漠区,成为中国西北地区的主要水资源(姚檀栋等,2004)。了解青藏高原冰川地貌的空间分布格局无疑对区域水资源安全、生态系统和全球海平面上升具有重要影响(赵永利,2014; Xu et al., 2016)。通过获取青藏高原冰川空间分布动态及其对气候的响应,有助于全面理解冰川对气候变化的

响应,同时为区域气候变化差异和冰川灾害等研究提供科学依据。而遥感影像数据的出现和快速发展为研究青藏高原冰川变化提供了契机,同时多期 DEM 和卫星数据的生成则为研究青藏高原冰川冰面高程和冰储量变化提供了可行性,结合由气象站点观测数据获得的冰川分布区气候特征,也可同时对冰川变化对气候的响应进行探索和分析。

而冰缘地貌与多年冻土分布范围相似(周成虎等,2009)。巨大的海拔使青藏高原成为中纬度多年冻土分布面积最大和厚度最深的地区,多年冻土的分布范围及变化情况对青藏高原基础设施建设和保护、水资源保护、环境保护、荒漠化、生物化学过程和植被分布等具有重要影响(Cheng and Wu, 2007; Yang et al., 2010)。同时,青藏高原是我国天然气水合物的重要储存地,而天然气水合物主要分布在冻土地区(祝有海等,2009)。因此,对青藏高原多年冻土分布及演变情况进行研究不仅具有重要的科学意义,也具有重要的经济价值。各种高精度数据的不断出现和计算机处理技术的飞速发展,使利用不同数据源和分布模型对不同时期青藏高原冻土的分布进行模拟成为一个热点和重要课题。

鉴于此,本书主要从以下5个方面进行研究:首先,基于青藏高原地区1:100万统一的无缝拼接地貌数据,深入分析了青藏高原的数字空间分布格局特征;然后,利用多期遥感影像、DEM数据和卫星数据,对青藏高原冰川地貌空间分布动态特征进行了分析;同时,基于多期遥感影像和气象数据,探索了青藏高原冰川-湖泊变化及其对气候的响应关系;再次,通过多源数据,对青藏高原冰缘地貌的数字空间分布格局特征进行了研究;最后,对青藏高原冰缘地貌的空间分布及其动态变化进行了数值模型模拟,并对多年冻土的未来分布变化进行了数值模型预测。

## 1.2 研究意义

(1) 青藏高原是世界上中低纬度地区最大的冰川作用中心,青藏高原冰川占中国冰川总条数的79.5%、占冰川总面积的84%和占冰储量的81.6%(蒲健辰等,2004)。冰川作为冰冻圈的重要组成部分,已被公认为是气候变化的敏感指示器(Oerlemans, 1994),同时作为重要的淡水资源(Solomon, 2007),对局地气候、生态与环境、水资源均有重要影响(段建平等,2009)。因此,获取并分析青藏高原冰川地貌的空间分布格局具有重要的实践意义和科学价值。

(2) 众多实地观测显示,受气候变暖的影响,全球冰川普遍处于退缩状态,但是冰川变化幅度表现出较大的空间差异(Gardner et al., 2013)。遥感技术的快速发展为了解青藏高原冰川地貌的空间分布动态变化提供了途径,多期 DEM 和卫星数据则为探索冰川冰面高程和冰储量变化提供了可能性。研究青藏高原冰川地貌空间分布动态变化及其冰面高程和冰储量变化,对评估冰川变化、生态与环境、水资源安全、全球海平面升高等的影响及其所体现的区域气候变化差异具有重要的科学价值(赵永利,2014; Xu et al., 2016)。

(3) 青藏高原冰川-湖泊变化及其对气候响应的研究是研究全球变化中不可缺少的内容之一,其为建立冰川变化对气候变化的响应模型和区域水量平衡模型奠定了基础,

分析青藏高原重要冰川-湖泊变化对水资源的影响、综合评估中国西部气候变化的资源环境效应,以及揭示全球气候变化规律,对气候变化预测等方面都具有重要的理论和实际意义(王景华,2006;郭柳平,2007)。

(4) 冰缘地貌是青藏高原分布最广泛的地貌类型(赵尚民,2011),它的分布范围与多年冻土相似,其分布及变化研究是研究自然环境及其变化的可靠的定量方法之一(蒋复初等,2003)。同时,青藏高原是中纬度多年冻土分布面积最大和厚度最深的地区,其多年冻土成为中国乃至世界最重要的高海拔多年冻土,它的分布对青藏高原基础设施建设和保护、水资源保护、环境保护、荒漠化、生物化学过程、植被分布等具有重要影响(Cheng and Wu, 2007; Jin et al., 2000; Yang et al., 2010)。另外,青藏高原是我国天然气水合物的重要储存地,而天然气水合物则主要分布在冻土地区。因此,对青藏高原冰缘地貌的空间分布格局进行研究具有重要的科学意义和经济价值。

(5) 青藏高原多年冻土易受气候变化的影响,其在全球气候变化中起着中介和指示器的作用(Gugliemin and Dramis, 1999; 蒋复初等, 2003; Anisimov and Reneva, 2006)。全球气候变化,特别是全球变暖在很大程度上将导致高海拔多年冻土分布的消退(Osterkamp, 2005),而这可能引起一系列变化,包括地表过程、水文、工程基础,甚至气候等(Etzelmüller et al., 2006; Cheng and Wu, 2007; Yang et al., 2010)。随着青藏高原寒区工程的日益增多,对青藏高原多年冻土空间动态分布的监测及预测具有重要的科学价值和现实意义。

### 1.3 国内外研究进展

根据本书的主要研究内容(见 1.1 节 研究背景),国内外相关研究的进展主要包括以下 5 个方面:青藏高原地貌研究进展、空间格局分析研究进展、青藏高原冰川地貌空间分布动态研究进展、青藏高原冰川-湖泊变化及其对气候响应的研究进展和多年冻土分布模拟研究进展。对国内外研究进展的分析和理解,为本次研究提供了理论基础和重要参考,具有很强的借鉴作用。

#### 1.3.1 青藏高原地貌研究进展

地貌是指地球表面的形态特征,是大气圈、水圈、生物圈、岩石圈和地球内营力相互作用的产物,规模不同、形态各异的地貌类型是地球内、外营力长时期作用的结果(刘南威,2000;杨景春和李有利,2001)。地貌作为自然地域综合体的主导要素,在一定程度上控制着其他生态因子与环境因子的分布与变化,因此成为地形研究的核心与基础内容之一(程维明,2005)。青藏高原典型地貌空间分布状况、格局和动态变化的研究是青藏高原地貌研究的重要内容。

对青藏高原典型地貌空间分布格局及其动态变化的研究,前期主要是通过科学考察,并逐渐从个别探险家、科学家的科学考察发展为多学科、大规模的综合科学考察;随着科技的发展,特别是遥感技术的出现,遥感影像与 GIS 技术等现代手段在青藏高

原地貌形态研究中发挥着越来越重要的作用,不断取得重要研究成果。

### 1. 科学考察研究进展

由于青藏高原自然条件恶劣,科学考察出现较晚。直到19世纪末20世纪初,以及20世纪20~30年代才有一些外国探险家,如斯文·赫定(Sven Hedin, 1894年, 1899年, 1906~1908年)、海登(H. Haydan, 1903~1904年, 1921年)、赫伦(A. M. Heron, 1921年)、韦杰(L. R. Wager, 1933年)、戴特拉(H. De. Terra, 1927~1928年)、诺林(E. Norin, 1931~1935年)、亨廷顿(E. Huntington, 1906年)、涂宁克尔(E. Trinkler)、沃顿(F. K. Ward, 1926年)等在西藏地区做过一些路线考察,并提供了相关地貌资料(杨逸畴等, 1983)。在我国,新中国成立前也有刘慎谔、徐近之和孙建初等学者分别对青藏高原西北部、南部和东北部进行过植物、地理和地质的科学考察(郑度, 2003)。总体来说,新中国成立前青藏高原的地貌考察更多的是一种个人行为在某些路线上的探索,规模和覆盖面极小,很多地区处于科学空白状态。

新中国成立后,国家十分重视青藏高原的科学考察工作,在1956~1967年和1963~1972年两次国家科学发展规划中,都把青藏高原科学考察列为重点科研项目。中国科学院在20世纪50~60年代先后对青藏高原进行了4次综合科学考察,分别为1958~1961年和1966~1968年的西藏综合科学考察、1959~1960年的珠穆朗玛峰登山科学考察和1964年的希夏邦马峰科学考察,并于50年代末出版了《中国地貌区划》一书,对青藏高原地区的地貌特征进行了较为系统的描述<sup>①</sup>(中国科学院地理研究所, 1959)。1973~1976年,中国科学院又组织进行了规模巨大的青藏高原综合科学考察,它集聚了地球物理、地质、地理、生物和农林牧业等50多个专业的科研人员,对青藏高原进行了历时4年的科学考察,并出版了《青藏高原科学考察丛书》等一系列书籍;单地貌方面,就对西藏地貌、西藏冰川、西藏泥石流和西藏自然地理等进行了介绍,并取得了重大成果(李吉均等, 1986)。

青藏高原早期的科学考察起到填补空白、积累基本科学资料的作用,自20世纪90年代起,青藏高原科学考察达到了一个新的高度:1993年,“青藏高原形成演化、环境变迁与生态系统研究”被列为国家攀登计划项目和中国科学院重大基础研究项目;1997年,“青藏高原环境变化与区域可持续发展研究”被列为国家“九五”攀登计划预选项目和中国科学院“九五”重大项目;1998年,“青藏高原形成演化及其环境、资源效应”被列为国家重点基础研究发展规划(973)的第一批项目。这标志着青藏高原综合科学考察进入了新的时期。它从定性研究转变为定性与定量相结合的研究;从静态研究转变为动态研究;从单一学科研究转变为综合研究;从区域研究转变为与全球环境变化相联系的研究(郑度, 2003; 孙鸿烈和郑度, 1998)。在方法和手段上,它也从传统的野外路线考察过渡到结合遥感和GIS等技术的野外考察与试验观测相结合的新的手段。

<sup>①</sup> 《中国地貌区划》一书中并未将“青藏高原”作为一个独立的地貌单元。

## 2. 利用遥感影像与 GIS 技术等现代手段的青藏高原地貌研究进展

早在 20 世纪 80 年代初, 梁凤仙和罗祥瑞(1981)、梁凤仙等(1982)就利用航空相片建立了青藏高原冰缘地貌现象的解译标志, 并对冰缘地貌现象的动态变化进行了研究。随着遥感技术的飞速发展和影像质量的不断提高, 利用遥感技术对青藏高原多种典型地貌, 如冰川、冰缘、湖泊和冻土等的研究的范围不断扩大, 程度逐渐加深, 甚至科学考察也开始和遥感技术等现代手段相结合, 以寻求更好的效果。

利用遥感影像和 GIS 技术对青藏高原不同地貌类型进行的研究有很多, 其中, 赵尚民等(2007)利用遥感影像、SRTM 数据等多源数据, 对青藏高原冰缘地貌分布进行了自动提取研究; 鲁安新等(2005)利用 TM 卫星遥感影像和其他数据, 对青藏高原冰川和湖泊变化进行了动态研究; 王品清和陈华(2008)利用 MODIS37-星图像, 借助热惯量方法, 对青藏高原东北部的多年冻土进行了分析, 监测结果与野外调查结果极为吻合; 李震等(1999)基于 ERS-1/2 图像, 利用差分干涉 SAR 技术, 对青藏铁路附近的冻土形变进行了监测; 以中国科学院地理科学与资源研究所为支持单位的中华人民共和国地貌图集编辑委员会(2009)则利用遥感影像、地质数据、数字高程模型数据等多源数据源, 按照 1:100 万标准分幅, 对青藏高原地貌类型进行了遥感解译的制图。青藏高原数字地貌类型图的完成, 是利用遥感和 GIS 技术对青藏高原地貌进行研究的最重要的成果, 它实现了对青藏高原地貌类型在较大比例尺上的完整显示, 为青藏高原地貌的研究奠定了基础。

随着遥感技术的快速发展和影像质量的不断提高, 利用遥感影像和 GIS 技术等现代手段, 对青藏高原高寒地貌进行空间分布格局及其动态变化的监测研究将成为青藏高原地貌研究的一个重要领域。

### 1.3.2 空间格局分析研究进展

空间格局主要指某一现象或事物在一定范围内的分布规律和特征, 通过对其分布规律和特征的研究, 揭示它的形成原因和作用机制, 从而为其向良性方向发展提供依据(张世熔等, 2003)。在空间格局研究中, 对景观空间格局开展的研究有很多, 不同学科对景观概念的理解存在分歧, 一般来说, 景观是一定区域内由地形、地貌、土壤、水体、植物和动物等所构成的综合体, 因此景观是一个地理单元、一个综合自然地理区。景观空间格局主要指不同大小和形状的景观类型在区域内的分布状况和规律, 它主要反映了景观异质性, 表现了各种生态过程在不同尺度上作用的结果(张金屯等, 2000)。同时, 土地利用类型的空间格局研究也是一个重要的方面, 通过分析土地利用空间格局分布特征及其与地形、气候等要素的关系, 为土地利用的改造提供帮助。除此之外, 作为自然地域综合体主导要素的地貌, 其空间格局分析的研究也逐渐受到关注。

在景观空间格局分析方面, 邬建国(2002)对景观类型在不同尺度上的空间分布特征及其计算方法进行了系统研究; 张世熔等(2003)对川西不同丘陵区景观斑块的空间格局特征进行了分析; 吴志峰(2003)利用 GIS 技术与景观分析软件, 对广东省灯塔盆地的

景观格局进行了分析;王妍(2006)分析了地形因子与景观格局分布的相关性;李宇(2006)以甘肃省凉州区为例,分析了景观格局变化与可持续发展的关系;张阳明等(2008)基于遥感影像和高程数据,分析了喀斯特地区景观空间格局随高程的分异特征;刘艳艳等(2009)在县域尺度上,分析了湖南省醴陵市不同地貌类型下的景观格局分布特征。在土地利用类型空间格局分析方面,除多(2002)对西藏拉萨地区的土地利用类型空间分布格局进行了研究;张希彪等(2006)利用多种数学模型,对陇东黄土高原土地利用的空间格局进行了研究;崔卫国等(2008)基于多源数据,对湖南省醴陵市土地利用空间格局与地形因子的关系进行了分析;陈凌维和周兴(2007)利用数学模型,对贵港市土地利用的数量结构和空间格局进行了分析;乔青等(2009)研究了川滇农牧交错区地形特征对土地利用空间格局的影响。除景观格局和土地利用格局外,地貌格局也是一个很重要的空间格局分析内容,刁承泰(1991)根据研制四川省1:100万地貌图的体会,分析了四川省地貌格局的形成及其特征;Stephen等(1998)从遥感和GIS角度,评价了地貌中尺度、格局与过程的关系;齐德利等(2005)通过对中国丹霞地貌的空间格局进行分析,将中国丹霞地貌划分为东南、西南和西北三大集中分布区;Napieralski等(2007)分析了GIS技术在冰川地貌空间格局研究中的巨大作用;张克信等(2007)利用1:25万地质填图资料,对青藏高原地貌空间格局的演化进行了研究;张国庆等(2007)按照流域区划思想,对江西省丹霞地貌的空间格局及地学背景进行了分区研究;程维明等(2009)利用地学统计和GIS空间分析方法,研究了新疆地貌的空间格局。

前人对地貌研究为青藏高原地貌空间格局分析提供了重要的基础和理论依据,而景观格局研究和土地利用空间格局分析则为青藏高原地貌格局研究提供了方法上的重要参考和借鉴。

### 1.3.3 青藏高原冰川地貌空间分布动态研究进展

青藏高原冰川地貌空间分布动态研究进展包括青藏高原冰川遥感研究进展、冰川遥感常用数据源研究进展、冰川遥感提取方法研究进展和冰川空间分布动态变化研究进展4个部分(赵永利,2014)。

#### 1. 青藏高原冰川遥感研究进展

《简明中国冰川目录》统计显示,中国发育冰川46298条,面积约为59406km<sup>2</sup>,冰川冰储量约为5590km<sup>3</sup>。近百年来,在全球变暖的大背景下,我国境内冰川退缩也在加剧(Bolch et al., 2012; 段建平等, 2009),估计过去40年中我国冰川储量减少了452.77~586.94km<sup>3</sup>(8.1%~10.5%),冰川融水导致冰川径流量的增加超过了5.5%(姚檀栋等, 2004)。

冰川的生长发育与气候条件密切相关,山地冰川被称为全球变化的敏感指示器,因此它成为了监测全球气候变化的“晴雨表”(鲁安新等, 2005)。青藏高原冰川主要集中在高原南部的喜马拉雅山、西部的喀喇昆仑山和北部的昆仑山西段等边缘山脉(蒲健辰等, 2004)。我国将卫星遥感影像资料应用于冰川研究始于20世纪70年代末80年代初,如



利用遥感资料编制冰川分布图(吴焕忠, 1980)、测量冰川的变化(米德生和罗祥瑞, 1983)等。随着遥感和地理信息系统技术的发展, 近年来, 青藏高原遥感监测的研究取得了丰硕成果。我国已利用卫星遥感监测资料对冰川面积变化进行了大量研究, 并建立了中国的冰川编目, 研究区域主要集中在祁连山西段、长江源头各拉丹冬地区、黄河源区阿尼玛卿山、玉龙喀什河源区、马兰冰帽、喀喇昆仑山、慕士塔格山、珠穆朗玛峰、纳木那尼峰、普若岗日冰原、朋曲流域等地区(段建平等, 2009)。广大学者对青藏高原冰川变化的研究多集中在冰川面积和长度变化监测(Pan et al., 2012a, 2012b)、冰川物质平衡监测(Gao et al., 2012; Pieczonka et al., 2013; Yu et al., 2013; Zhang et al., 2012a)和冰面高程变化监测(Neckel et al., 2012; Racoviteanu et al., 2008)等。

Gardner 等(2013)利用 ICESat 高程数据, 对整个青藏高原冰川冰面高程变化进行了估算, 2003~2009 年整个青藏高原冰川冰面高程变化存在较大的空间差异, 南部的喜马拉雅山和北部的天山地区冰川冰面高程降低最快( $-0.4\text{m/a}$ ), 青藏高原中部和南部冰川减薄速率约为 $-0.3\text{m/a}$ , 而在帕米尔高原、喀喇昆仑山和西昆仑山地区的冰川基本保持稳定。Gardelle 等(2012b)利用 SRTM DEM 和 SPOT 5 光学立体像对, 对喀喇昆仑山中部地区 2000~2008 年冰面高程变化, 以及冰川变化对于海平面上升的贡献率进行了估算, 发现 21 世纪初, 喀喇昆仑山中部地区冰川表现出微弱的正物质平衡, 假定整个喀喇昆仑山冰川变化与中部一致, 那么该地区对于海平面上升的贡献率应为 $0.006\text{mm/a}$ 。

1969~2000 年, 各拉丹冬地区的冰川减少了 1.7%, 冰川在这个地区的变化基本保持稳定(鲁安新等, 2002)。叶庆华等基于地学信息图谱方法, 研究各拉丹冬地区的冰川变化, 发现该地区冰川总面积 1969~2002 年减少了 $43\text{km}^2$ (Ye et al., 2006a)。受印度季风影响的岗日嘎布地区冰川自 1980 年开始普遍经历了冰川的退缩消融过程, 88 条冰川总共退缩了 $797.78\text{km}^2$ , 大约损失了 60% 的体积, 但另外有部分冰川处于前进状态(刘时银等, 2005)。

对喜马拉雅山脉西段的纳木那尼冰川变化和物质平衡的观测, 也证实了纳木那尼冰川正在经历强烈的萎缩(姚檀栋等, 2007)。叶庆华等通过遥感监测得出, 整个喜马拉雅地区的冰川在过去几十年退缩和前进并存, 但是以退缩为主导(Ye et al., 2009)。Yao 等(2012)对青藏高原及其周围地区的 7000 多条冰川做了大面积的研究, 发现这些冰川的平均退缩速率约为 $0.30\%/a$ , 青藏高原冰川变化区域差异很大, 从喜马拉雅山到青藏高原内陆冰川退缩速率变小, 东帕米尔高原冰川退缩最少, 而喜马拉雅东段冰川退缩最为严重。此外, 广大学者对念青唐古拉山脉地区的气候变化(游庆龙等, 2007)、冰川长度变化(康世昌等, 2007; 张堂堂等, 2004)、面积变化(上官冬辉等, 2008; 王旭等, 2012)、冰川储量变化(Bolch et al., 2010; 陈锋等, 2009)和物质平衡(Yu et al., 2013)也进行了初步的探索。其中, 关于纳木错流域冰川面积变化的研究结果差异较大, Bolch 等(2010)基于 1976 年 MSS、CoronaKH-4B、HexagonKH-9 等遥感数据, 以及 2000 年 ETM+ 数据, 采用人工目视解译和波段比值法, 提取了纳木错流域冰川信息, 发现纳木错流域 1976~2000 年冰川面积减少了 $(14.4\pm 6.5)\text{km}^2$ ; 而陈锋等(2009)基于 1970 年航测地形图和 2007 年 ASTER 遥感数据, 采用人工提取和双重提取冰川方法,