

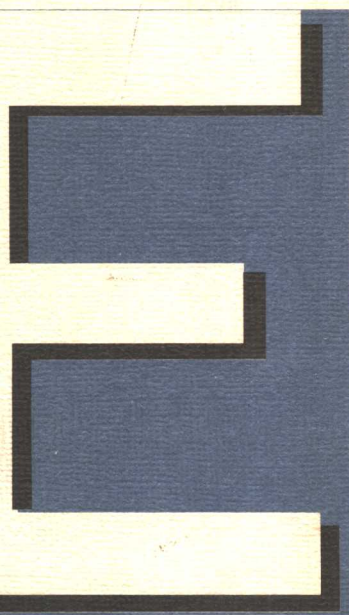


国家自然科学基金研究专著
NATIONAL NATURAL SCIENCE FOUNDATION OF CHINA



青藏高原中部 冰冻圈动态特征

姚檀栋 等著



earth

地质出版社



国家自然科学基金研究专著
NATIONAL NATURAL SCIENCE FOUNDATION OF CHINA



青藏高原中部 冰冻圈动态特征

姚檀栋 等著

地质出版社

· 北 京 ·

内 容 提 要

本书对青藏高原中部冰冻圈动态特征进行了系统研究,这对该区的地质、地貌、冰川、气候的研究具有重要的意义。本书内容包括冰雪化学特征,不同下垫面微气候学特征,土壤的水热分布特征、冻融过程和水分循环、影响土壤水热变化的一些因子,夏季降水的时空分布特征,水文过程及特征,现代冰川物质平衡与冰川变化,多年冻土退化与沙漠化及甲烷释放,陆面过程中的冻土参数化,气候与冰冻圈变化及未来趋势等。

本书可供从事气候、冰川、土壤、沙漠等方面研究的生产、科研人员及大专院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

青藏高原中部冰冻圈动态特征/姚檀栋等著. -北京:地质出版社,2002. 11
ISBN 7-116-03685-7

I. 青… II. 姚… III. 青藏高原-冰川-研究 IV. P343.727

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 077422 号

QINGZANGGAOYUAN ZHONGBUBINGDONGQUAN DONGTAITEZHENG

责任编辑:王大军 党顺行 白 铁

责任校对:王素荣

出版发行:地质出版社

社址邮编:北京海淀区学院路 31 号,100083

电 话:(010)82324508(邮购部);(010)82324579(编辑部)

网 址:<http://www.gph.com.cn>

电子邮箱:zbs@gph.com.cn

传 真:(010)82310759

印 刷:北京印刷学院实习工厂

开 本:787mm×1092mm ¹/₁₆

印 张:20.5

字 数:500 千字

印 数:1—800 册

版 次:2002 年 11 月北京第一版·第一次印刷

定 价:50.00 元

ISBN 7-116-03685-7/P·2307

(凡购买地质出版社的图书,如有缺页、倒页、脱页者,本社发行处负责调换)

国家自然科学基金研究成果专著出版基金资助出版

本专著得到下列项目资助：

国家自然科学基金委员会创新群体基金

国家自然科学基金项目(40201012)

前 言

所谓冰冻圈就是由固体形式存在于地表面的水,包括海冰、河冰、湖冰、积雪、山地冰川、冰盖和冻土(包括多年冻土)。在高亚洲地区,可以遇到除海冰以外的冰冻圈所涵盖的所有问题。

过去 100 年里,全球平均海平面上升了 10~25cm。对这一数值的解释,普遍接受的观点是由于海水热扩散的结果引起的上升估计为 2~7cm。其余的上升量主要来自陆地冰冻圈的变化。陆地冰冻圈占地球淡水的 90%。其中南极冰盖含陆地冰量的 90%,格陵兰占 9%。山地冰川、冰帽虽不足 1%,但由于冰川和冰帽对气候的反应时间较短,因而在几十年到百年尺度上,山地冰川对全球平均海平面上升所起的作用是非常重要的。过去的 100 年里,全球山地冰冻圈确实发生了明显变化。这在青藏高原、阿尔卑斯、天山、斯堪的纳维亚、中亚、喜马拉雅、新西兰、高加索及热带(南美、中非等地)冰川都可见到。山地冰川对海平面上升的贡献,估计在过去 100 年中达 2~5cm。

正因为如此,冰冻圈的重要性受到国际科技界越来越强烈的关注。已酝酿了 3 年,最近就要启动的又一个国际研究计划“冰冻圈与气候计划”就是这一态势的最好标志。

冰冻圈作为全球气候系统的基本组成部分,对全球气候具有重要的响应和反馈作用。冰冻圈主要因子包括雪冰表面的反照率、同冰-水相位变化有关的潜热变化、冰盖释放淡水或海上浮冰的冷却效应、由雪和冰盖引起的年际能水循环的滞后作用、束缚在多年冻土中的温室气体释放等。通过这些因子和相关的反馈过程,冰冻圈在全球气候变化和响应全球变化中起了重要作用。

冰冻圈作为全球气候-环流系统的重要组成部分,不仅对气候变化有敏感的响应,而且能够调节气候环境变化的节奏和强度,加强或减弱环境演化过程。它与大气圈、水圈、生物圈、岩石圈一起构成了地球的 5 大圈层,并通过五个圈层的相互作用引起地球表层过程的各种变化。

中国是世界上山地冰川最发育的国家。冰川面积 59000 多平方公里,所储存的水资源总量达 59000 多亿立方米,同加拿大、美国、前苏联一起组成全球的 4 个冰川大国。在第四纪时,中国的冰川面积是现在的好几倍,对社会的影响更为深远。

青藏高原是中国冰川最发育的地区。青藏高原冰川面积达 44851km²,占我国冰川总面积的 76%。青藏高原及周围地区,冰川在一些河流中比重可达 60%以上,如果加上积雪,则可达 90%以上。随着全球气候变暖的加剧,高亚洲地区冰川积雪对河流的补给作用会进一步加强。同积雪比较,冰川的存在时间更长。因此,水在冰川上的滞留时间也长。冰盖中水的滞留时间可达 10 万年或 100 万年之久。因此,对于任何气候扰动(冰期和间冰期),其响应缓慢。山谷冰川对气候波动能比较快地产生响应,典型的响应时间是 10~50 年。20 世纪 80 年代以来的变暖,已造成了高亚洲冰川积雪的显著变化。

青藏高原的冻土在气候变化、工程建设等方面起着重要作用。冻土面积和厚度受土壤含

水量、植被覆盖度、冬季积雪深度等的影响,冻土边缘区更易受气候变暖的影响。目前存在的大多数冻土是以前更冷气候的产物。在目前全球气候变暖的影响下,冻土可能处于失衡状态。

冰冻圈也是中国西部社会经济发展必不可少的重要水资源。每条冰川就是一座固体水库。同时,许多冰川又是不同类型河流的发源地。长江黄河源头径流变化也与冰冻圈密切相关。研究冰川时空变化可以为开发和利用冰川水资源提供决策和依据。冰川也是孕育灾害的根源之一。如冰川作用区的冰崩、雪崩、草场雪灾、冰川洪水以及冰川泥石流等灾害在中国西部地区自然灾害中占有突出地位。因此,研究冰冻圈过程及其与气候的相互作用机制、研究冰川-气界面间的物质和能量交换和冰川的空间分布及其变化,不仅能进一步推动冰川学的发展,而且其研究结果将会直接应用于人类与自然协调发展的长远规划和宏观决策。

1989年开始,中国科学院兰州冰川冻土研究所在唐古拉山冬克玛底冰川设立了青藏高原唯一的冰川变化长期监测点。这一观测截止2002年已连续进行了13年。与此同时,通过中国科学院重要方向项目的支持,国家自然科学基金的支持和国家自然科学基金优秀创新群体基金的支持,在青藏高原降水同位素特征、化学特征、冰面过程、冻土变化与过程、冰冻圈过程对地气相互作用过程的影响等方面进行了大量的实地观测和研究。这些研究的目的在于评价青藏高原冰冻圈分布特征;以长江源头为典型研究区,研究冰川变化基本规律,揭示冰冻圈变化与气候变化的关系;阐明这个地区冰冻圈变化对径流的影响。

本书所反映的是这些研究的初步成果。本书第一章由姚檀栋、章新平、田立德执笔;第二章和第六章由张寅生、姚檀栋执笔;第三章、第四章和第五章由杨梅学、姚檀栋执笔;第七章由蒲健辰、姚檀栋执笔;第八章由王绍令执笔;第九章由李新执笔;第十章由王宁练、姚檀栋执笔。

目 录

前 言

第一章 冰雪化学特征	(1)
第一节 稳定氧同位素及其理论基础	(1)
一、概述	(1)
二、同位素的概念和表示方法	(1)
三、稳定同位素的分馏	(1)
四、水循环过程中稳定同位素变化的一般特征	(2)
第二节 全球稳定氧同位素分布特征	(3)
一、全球 $\delta^{18}\text{O}$ 的分布	(3)
二、 $\delta^{18}\text{O}$ 与气温之间的相关关系	(5)
三、 $\delta^{18}\text{O}$ 与降水量之间的相关关系	(6)
四、 $\delta^{18}\text{O}$ 与水汽压之间的相关关系	(7)
第三节 青藏高原北部降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的气候意义	(9)
一、青藏高原降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的空间变化	(9)
二、 $\delta^{18}\text{O}$ 的天气尺度变化	(13)
三、 $\delta^{18}\text{O}$ 的季节尺度变化	(15)
四、不同时间尺度 $\delta^{18}\text{O}$ -温度梯度的比较	(18)
五、不同天气系统与 $\delta^{18}\text{O}$ 的关系	(18)
六、冰芯中 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度的对比	(19)
第四节 冰川污化有机化学分析	(21)
一、雪冰中有机物的分类、来源及研究意义	(21)
二、从冰川污化层中提取有机物及分析的实验方法	(22)
三、我国青藏高原冰川污化层的有机化合物特征	(23)
第五节 冰川作用区水化学	(28)
一、样品的采集与分析	(28)
二、水体的化学组成	(29)
三、水化学的时空分布特征	(36)
四、高原中部与其他地区水化学的差异	(38)
第六节 冰雪化学区域特征	(43)
一、pH 值及影响 pH 值的主要因素	(44)
二、矿化度及水化学类型	(45)
三、冰雪化学的环境特征	(45)
四、冰雪中离子的淋溶特征	(52)
五、冰雪中化学物质的来源	(56)

参考文献	(56)
第二章 不同下垫面微气候学特征	(60)
第一节 冰川表面的微气候学特征	(61)
一、气温	(61)
二、湿度	(62)
三、风	(64)
第二节 永久冻土区的微气候特征	(66)
一、气温	(66)
二、湿度	(67)
三、风	(68)
四、地温	(70)
五、气压	(70)
第三节 不同下垫面的辐射气候学特征	(71)
一、冰雪表面的辐射平衡	(72)
二、永久冻土表面的辐射平衡	(77)
第四节 不同下垫面的能量特征	(80)
一、冰雪表面的能量交换	(81)
二、永久冻土区的能量交换	(84)
三、对于几个问题的探讨	(89)
第五节 不同下垫面间及区域间的气候差异	(93)
一、不同下垫面之间的气候差异	(93)
二、气候的区域差异性	(98)
第六节 小结	(101)
参考文献	(102)
第三章 土壤水热分布特征、冻融过程和地气之间的水分循环	(103)
第一节 数据的采集及各点概况	(103)
一、数据的采集	(103)
二、各点概况	(104)
第二节 土壤温度和含水量的时空分布特征及其相互关系	(105)
一、月平均土壤温度和含水量的时空分布特征	(105)
二、各点日平均土壤温度和含水量的时间变化特征	(114)
三、土壤温度的日变化	(115)
四、土壤温度与含水量的关系	(119)
第三节 土壤的冻融过程及其与含水量和温度的关系	(120)
一、土壤的冻融过程	(120)
二、土壤含水量的分布特征	(122)
三、冻融过程与含水量及温度的关系	(122)
第四节 土壤的水热分布特征及冻融过程与地气系统的能水循环	(125)
第五节 地气系统之间的水分循环	(127)
第六节 小结	(133)

参考文献	(134)
第四章 影响土壤水热变化的一些因子	(136)
第一节 土壤温度分布的纬向效应和高度效应	(136)
一、夏季土壤温度与纬度和海拔高度的关系	(136)
二、冬季土壤温度与纬度和海拔高度的关系	(136)
三、年平均土壤温度与纬度和海拔高度的关系	(138)
第二节 土壤含水量分布的纬向效应和高度效应	(138)
第三节 雪灾对土壤温度的影响	(140)
一、不同地点土壤日最高温度和日最低温度的变化特征	(140)
二、不同地点土壤温度日温差的变化特征	(142)
三、讨论	(142)
第四节 小结	(145)
参考文献	(146)
第五章 夏季降水的时空分布特征	(147)
第一节 夏季降水的时间变化特征	(148)
第二节 夏季风降水的空间变化特征	(150)
一、7~8 月份降水量与纬度的关系	(151)
二、7~8 月份降水量与海拔高度的关系	(152)
第三节 唐古拉山南北坡夏季降水特征的对比分析	(153)
一、WADD 点和 D105 点夏季风降水的时间变化	(154)
二、WADD 点和 D105 点夏季风降水的日变化	(154)
第四节 夏季雨季的开始与结束和夏季风降水的活跃与中断	(158)
第五节 局地对流降水在总降水中的贡献	(160)
第六节 小结	(166)
参考文献	(167)
第六章 水文过程及特征	(169)
第一节 观测和研究区域概况	(170)
第二节 降水的时空变化特征	(175)
一、季节变化	(175)
二、日变化	(177)
三、空间分布	(180)
四、年降水量的估算	(183)
第三节 土壤蒸发过程特征	(184)
一、观测结果	(184)
二、蒸发过程特征	(185)
三、蒸发量的日变化	(188)
四、空间分布	(189)
五、年蒸发量的推算	(191)
第四节 径流特征	(192)

一、流量	(193)
二、径流特征值	(197)
三、河流水温和电导率	(198)
第五节 典型流域的水量平衡	(199)
一、降水	(199)
二、径流量	(200)
三、蒸发	(200)
四、地下冰的变化	(200)
五、结果与闭合差	(201)
第六节 径流过程的模拟计算	(202)
一、GWS 站控制区域(冰川区)	(202)
二、SWS 站控制区(冻土区)	(204)
三、LWS 站控制区(整个流域)	(204)
第七节 小结	(206)
参考文献	(206)
第七章 现代冰川物质平衡与冰川变化	(207)
第一节 青藏高原中部现代冰川资源数量与分布	(207)
第二节 冰川物质平衡基本特征	(209)
一、研究的冰川概况	(209)
二、冰川的消融	(210)
三、冰川的积累	(213)
四、冰川物质平衡	(214)
第三节 冰川物质平衡的区域特征	(215)
一、冰川物质平衡的基本状况及波动趋势	(215)
二、冰川物质平衡的区域特征	(216)
第四节 近 50 年来冰川物质平衡序列的重建	(218)
一、现代冰川物质平衡及各要素间的关系	(219)
二、近 50 年来的冰川物质平衡及其变化	(220)
第五节 冰川物质平衡对气候变化的响应	(224)
一、冰川物质平衡和气温、降水的关系	(224)
二、气温和降水变化对冰川物质平衡影响的估算	(225)
第六节 近代冰川变化	(226)
一、小冰期的冰川变化	(226)
二、冰川的近期变化	(230)
参考文献	(231)
第八章 多年冻土退化与沙漠化及甲烷释放	(234)
第一节 多年冻土分布特征	(234)
第二节 气候变暖与多年冻土退化	(235)
一、气候变化	(235)
二、多年冻土退化的证据	(235)

三、多年冻土退化分析	(241)
四、多年冻土退化的社会和环境效应	(242)
第三节 多年冻土退化与沙漠化	(243)
一、青藏高原沙漠化现状	(243)
二、高原沙漠化诸因素分析	(243)
三、沙漠化区地温状况	(246)
四、从地表热量平衡讨论高原沙漠化对多年冻土的影响	(247)
五、多年冻土退化与沙漠化的相互作用	(247)
第四节 多年冻土退化与甲烷释放	(250)
一、概况	(250)
二、CH ₄ 释放观测	(251)
三、青藏高原 CH ₄ 年释放量评估及可能后果	(253)
第五节 小结	(254)
参考文献	(254)
第九章 陆面过程中的冻土参数化	(256)
第一节 冻土与气候系统的关系及研究综述	(256)
一、冻土对气候系统的响应模型	(257)
二、陆面过程中的冻土参数化方案	(257)
第二节 冻土参数化	(262)
一、参数化方案简介	(262)
二、水分平衡方程的修改	(262)
三、热模型	(263)
四、冻土参数化子模型与 SiB2 的连接	(265)
第三节 冻土参数化方案的验证	(265)
一、数据	(265)
二、模型标定	(268)
三、冻土参数化方案验证	(271)
第四节 小结	(274)
参考文献	(275)
第十章 气候与冰冻圈变化及未来趋势	(280)
第一节 高原冰冻圈的形成与演化	(281)
第二节 高原中部地区冰冻圈对于现代气候变化的响应	(289)
第三节 高原中部冰冻圈的未来变化趋势	(295)
一、冰川	(295)
二、冻土	(300)
三、积雪	(303)
第四节 小结	(305)
参考文献	(306)

CONTENTS

Chapter 1 Features of Chemistry in Snow and Ice	(1)
Section 1 Stable Oxygen Isotope and its Theoretic Base	(1)
1. Summary	(1)
2. Concept of stable isotope and definition	(1)
3. Stable isotope fractionation	(1)
4. General features of stable isotope in water cycle processes	(2)
Section 2 Global Distribution of Stable Isotope	(3)
1. Global $\delta^{18}\text{O}$ distribution	(3)
2. Relationship between $\delta^{18}\text{O}$ and temperature	(5)
3. Relationship between $\delta^{18}\text{O}$ and precipitation	(6)
4. Relationship between $\delta^{18}\text{O}$ and air moisture pressure	(7)
Section 3 Climate Significance of $\delta^{18}\text{O}$ in Precipitation in the Northern Part of Tibetan Plateau	(9)
1. Spatial variation of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation on Tibetan Plateau	(9)
2. $\delta^{18}\text{O}$ variation in synoptic time scale	(13)
3. $\delta^{18}\text{O}$ variation in seasonal scale	(15)
4. Comparison of gradient of $\delta^{18}\text{O}$ and temperature	(18)
5. Relationship of $\delta^{18}\text{O}$ in different weather system	(18)
6. Comparison of $\delta^{18}\text{O}$ and temperature in ice core	(19)
Section 4 Organic Chemistry Analysis in Glacial Ice	(21)
1. Classification and source of organic components in snow and ice and their significance	(21)
2. Experimental methods	(22)
3. Organic components in dusty ice in Tibetan Plateau	(23)
Section 5 Water Chemistry in Glacial Area	(28)
1. Sampling and analysis	(28)
2. Chemistry component in water	(29)
3. Spatial and temporal distribution of water chemistry	(36)
4. Difference of the water chemistry between middle plateau and other regions	(38)
Section 6 Regional Features of Snow and Ice Chemistry	(43)
1. pH and main factors affecting pH	(44)

2. Mineralization and water chemistry type	(45)
3. Environmental features of snow and ice chemistry	(45)
4. Eluviation features of ion in snow and ice	(52)
5. Source of chemical material in snow and ice	(56)
Chapter 2 Micro-Climatology Features on Different Surface	
Condition Area	(60)
Section 1 Micro-Climatology Features on Glacier	(61)
1. Temperature	(61)
2. Humidity	(62)
3. Wind	(64)
Section 2 Micro-Climatology Features in Permafrost Regions	(66)
1. Temperature	(66)
2. Humidity	(67)
3. Wind	(68)
4. Ground temperature	(70)
5. Air pressure	(70)
Section 3 Radiation Features in Different Surface Area	(71)
1. Radiation budget on ice and snow surface	(72)
2. Radiation budget in permafrost area	(77)
Section 4 Energy Budget in Different Surface Area	(80)
1. Energy exchange on snow and ice surface	(81)
2. Energy exchange in permafrost area	(84)
3. Discussion on several issues	(89)
Section 5 Climatic Difference on Different Surfaces Area and in Different Regions	(93)
1. Climatic difference on different surfaces	(93)
2. Climatic difference in different regions	(98)
Section 6 Summary	(101)
Chapter 3 Water and Energy Distribution in Soil, Freezing and Thawing Processes as well as Water Cycle	(103)
Section 1 Summary of Observation Sites and Data Collection	(103)
1. Data collection	(103)
2. Summary of observation sites	(104)
Section 2 Spatial and Temporal Distribution of Temperature and Humidity and their Interactions	(105)
1. Spatial and temporal distribution of monthly mean soil temperature and humidity	(105)
2. Spatial and temporal variation of daily temperature and humidity	

at different sites	(114)
3. Diurnal variations of soil temperature	(115)
4. Relationship between soil temperature and humidity	(119)
Section 3 Soil Freezing and Thawing Processes and Relationship	
between Temperature and Humidity	(120)
1. Soil freezing and thawing processes	(120)
2. Distribution of soil humidity	(122)
3. Freezing-thawing processes and its relationship to humidity and temperature	(122)
Section 4 Soil Moisture and Energy Distribution and Freezing-thawing	
Processes with Energy-water Cycle between Land and	
Atmosphere	(125)
Section 5 Water Cycle between Land and Atmosphere	(127)
Section 6 Summary	(133)
Chapter 4 Some Factors Affecting Variations of Soil	
Moisture and Energy Distribution	(136)
Section 1 Latitude and Altitude Effect of Soil Temperature	
Distribution	(136)
1. Latitude and altitude effect of soil temperature distribution in summer	(136)
2. Latitude and altitude effect of soil temperature distribution in Winter	(136)
3. Latitude and altitude effect of annual mean soil temperature	(138)
Section 2 Latitude and Altitude Effect of Soil Humidity Distribution	(138)
Section 3 Affect of Heavy Snowfall on Soil Temperature	(140)
1. Variations of daily maximum and minimum soil temperature at different observation sites ...	(140)
2. Variation of daily range of soil temperature at different sites	(142)
3. Discussion	(142)
Section 4 Summary	(145)
Chapter 5 Temporal and Spatial Distribution of Summer	
Precipitation	(147)
Section 1 Temporal distribution of summer precipitation	(148)
Section 2 Spatial distribution of summer precipitation	(150)
1. Relationship between latitude and precipitation in July and August	(151)
2. Relationship between altitude and precipitation in July and August	(152)
Section 3 Comparative Analysis of Summer Precipitation between	
southern and northern slope in Tanggula Mountain	(153)
1. Temporal variation of summer precipitation at WADD and D105	(154)
2. Diurnal variation of summer precipitation at WADD and D105	(154)

Section 4	Onset and End of Summer Rainy Season and Active and Inactive Periods of Summer Monsoon Precipitation	(158)
Section 5	Attribution of Local Convective Precipitation to Total Precipitation	(160)
Section 6	Summary	(166)
Chapter 6	Features and Hydrological Processes	(169)
Section 1	Summary of Observation and Study Area	(170)
Section 2	Temporal and Spatial Variation of Precipitation	(175)
1.	Seasonal variation	(175)
2.	Diurnal variation	(177)
3.	Spatial distribution	(180)
4.	Estimation of annual precipitation	(183)
Section 3	Features of Soil Evaporation Processes	(184)
1.	Observation results	(184)
2.	Evaporation processes	(185)
3.	Diurnal variation of evaporation	(188)
4.	Spatial distribution	(189)
5.	Estimation of annual evaporation	(191)
Section 4	Features of Runoff	(192)
1.	Discharge	(193)
2.	Runoff characteristics	(197)
3.	Water temperature and electricity conductivity of river	(198)
Section 5	Water Budget of Typical River Basin	(199)
1.	Precipitation	(199)
2.	Discharge	(200)
3.	Evaporation	(200)
4.	Changes of underground ice	(200)
5.	Discussion	(201)
Section 6	Simulation of Runoff Processes	(202)
1.	Area of GWS station (glacier area)	(202)
2.	Area of SWS station (permafrost area)	(204)
3.	Area of LWS station (whole river basin)	(204)
Section 7	Summary	(206)
Chapter 7	Mass Balance and Glacial Variation in Last Decades	(207)
Section 1	Glacier and its Distribution in Middle Part of Tibetan Plateau	(207)
Section 2	Main Features of Glacial Mass Balance	(209)

1. General Situation of Studied Glacier	(209)
2. Glacial ablation	(210)
3. Glacial accumulation	(213)
4. Glacial mass balance	(214)
Section 3 Regional Features of Glacial Mass Balance	(215)
1. Basic feature of glacial mass balance and its trend of fluctuation	(215)
2. Regional feature of mass balance	(216)
Section 4 Reconstruction of Glacial Mass Balance in the Last 50 Years	(218)
1. Existing glacial mass balance and relationship among their factors	(219)
2. Fluctuation of glacial mass balance in the last 50 years	(220)
Section 5 Response of Glacier Fluctuation to Glacial Mass Balance	(224)
1. Relationship among glacial mass balance, temperature and precipitation	(224)
2. Estimation of effect of temperature and precipitation on glacial mass balance	(225)
Section 6 Existing Glacial Fluctuations	(226)
1. Glacier fluctuation in Little Ice Age	(226)
2. Glacial fluctuation in recent years	(230)
Chapter 8 Permafrost Degradation, Desertification and CH₄ Release	(234)
Section 1 Permafrost Distribution	(234)
Section 2 Climate Warming and Permafrost Degradation	(235)
1. Climatic variation	(235)
2. Evidence of permafrost degradation	(235)
3. Analysis of permafrost degradation	(241)
4. Social and environmental effect of permafrost degradation	(242)
Section 3 Permafrost Degradation and Desertification	(243)
1. Desertification in Tibetan Plateau	(243)
2. Analysis of factors attributing to desertification in Tibetan Plateau	(243)
3. Ground temperature in desertification area	(246)
4. Affect of desertification in Tibetan Plateau on permafrost in view of surface energy balance	(247)
5. Interaction between permafrost degradation and desertification	(247)
Section 4 Permafrost Degradation and CH ₄ Release	(250)
1. General situation	(250)
2. Observation of CH ₄ release	(251)
3. Estimation of annual CH ₄ release in Tibetan Plateau and possible consequence	(253)
Section 5 Summary	(254)
Chapter 9 Permafrost Parameterization in Land Surface Processes	(256)
Section 1 Brief Review on Relationship between Permafrost and	

Climate System	(256)
1. Response pattern of permafrost to climate system	(257)
2. Permafrost parameterization scheme in land surface processes	(257)
Section 2 Permafrost Parameterization	(262)
1. Introduction of parameterization scheme	(262)
2. Modification in water balance equation	(262)
3. Energy model	(263)
4. Joint of sub-model of permafrost parameterization and SiB2	(265)
Section 3 Test of Permafrost Parameterization Scheme	(265)
1. Data	(265)
2. Data used in model test	(268)
3. Test of permafrost parameterization scheme	(271)
Section 4 Summary	(274)
Chapter 10 Climatic and Cryospheric Change as Well as their	
Future Trend	(280)
Section 1 Formation and Evolution of Cryosphere in Tibetan Plateau	(281)
Section 2 Response of Cryosphere in Middle Tibetan Plateau to	
Modern Climate	(289)
Section 3 Future Trend of Cryosphere in Middle Tibetan Plateau	(295)
1. Glacier	(295)
2. Permafrost	(300)
3. Snow	(303)
Section 4 Summary	(305)