

LANDSURFACE PROCESSES AND ENVIRONMENTAL
CHANGES IN RIVER HEADWATER
REGIONS OF QINGHAI-TIBET PLATEAU

王根绪 李元寿 王一博 等著

青藏高原河源区地表 过程与环境变化



科学出版社

www.sciencep.com

青藏高原河源区 地表过程与环境变化

王根绪 李元寿 王一博 等著

科学出版社
北 京

内 容 简 介

本书以青藏高原多年冻土地带的长江黄河源区为主要研究对象,系统介绍了过去 50 年来该区域特殊的冻土生态学变化过程及其与气候和冻土环境的关系,在冻土生态学过程方面重点阐述了冻土河源区高寒生态系统变化及其功能影响、高寒冻土生态系统生产力变化、高寒生态系统物质与能量平衡变化以及由此引起的区域 LUCC 及其驱动机制。在环境影响方面,重点论述了冷生土壤环境变化、水土流失和土地荒漠化状况以及植被覆盖变化的水循环效应等。本书是较长时期野外考察、定位与半定位观测试验的成果,突出理论结合实践,全面阐述了长江黄河源区的生态与环境变化、驱动因素与演变趋势。

本书可供从事寒区生态学、寒区水文学、自然地理学、冻土环境以及青藏高原现代环境变化等方面的科研工作者,以及高等院校相关专业的师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

青藏高原河源区地表过程与环境变化/王根绪等著.

—北京: 科学出版社, 2010.6

ISBN 978-7-03-027514-1

I. ①青… II. ①王… III. ①青藏高原-冻土学: 生

态学-研究 IV. ①P642.14②Q14

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 084281 号

责任编辑: 张展

封面设计: 陈思思

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>

四川煤田地地质制图印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010 年 5 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2010 年 5 月第一次印刷 印张: 22.75

印数: 1—1 000 字数: 520 000

定价: 60.00 元

前 言

一、开展青藏高原冻土生态过程与环境变化研究的意义

青藏高原是亚洲中部最大的高原和世界上最高的高原,平均海拔在 4000m 以上,有“世界屋脊”和“第三极”之称。高原周围大山环绕,南有喜马拉雅山,北有昆仑山和祁连山,西为喀喇昆仑山,东为横断山脉。高原内还有唐古拉山、冈底斯山、念青唐古拉山等。高原内部被山脉分隔成许多盆地、宽谷,且湖泊众多。高原是亚洲大部分主要河流的发源地,长江、黄河、澜沧江(下游为湄公河)、怒江(下游称萨尔温江)、森格藏布河(印度河)、雅鲁藏布江(下游称布拉马普得拉河)以及塔里木河等都发源于此,水资源丰富。地球上中低纬度地区的冰川主要集中在高原上,青藏高原冰川覆盖面积约 4.7 万 km^2 ,占全国冰川总面积 80% 以上。这些冰川是陆地上极其重要的的固体水储存库,每当夏季冰雪融水沿坡面而下,对山麓沼泽发育十分重要,是高原面上高寒沼泽湿地形成与分布的主要因素。沼泽水往往又汇成河源水网,河水与沼泽水互补共济,遂造成平缓的河源区沼泽广布的态势,也是发育众多河流的区域,如长江与澜沧江共源的当曲源区,发育沼泽面积为 67.8 万 km^2 ,是世界上海拔最高的湿地。高原气候条件总体上较为严酷,但由于高原地形的复杂和多变,青藏高原上气候本身随地区的不同而变化很大,同时,青藏高原本身也是影响地球气候的一个重要因素,青藏高原的隆起使全球的气候发生了巨大的变化。青藏高原是世界上中低纬度多年冻土发育区,冻土面积大约 150 万 km^2 ,占亚洲多年冻土总面积的 71%。多年冻土分布以羌塘高原北部和昆仑山为中心(青南藏北高原),向周围地区展开,长江和黄河源区处于其核心部位。

从上述对于青藏高原的一般性描述,不难认识到:

(1) 青藏高原是中国乃至亚洲名副其实的“水塔”,其水循环与水文过程的变化对整个亚洲地区的经济社会发展都将产生深刻影响,但是分布在高原内部盆地和宽谷地貌的河源区的水文过程,与周边高山及内部冰冻圈过程密切相关,受冰川、冻土以及与其相连的冰缘沼泽湿地等过程的制约;因冰冻圈对气候变化的高度敏感性所导致的地表过程对于高原面上的水循环和水文过程的作用巨大,无论是大江大河的水资源合理开发利用、流域水旱灾害防治以及国际河流的科学管理等等,都迫切需要辨识该区域地表过程中水分循环的时空演化、与其他相关要素间的相互作用以及未来趋势等。

(2) 巨大的地貌差异和显著的气候分异,形成了青藏高原异常丰富的动植物资源,是中国乃至世界上动、植物物种资源极为宝贵的遗传基因库。生态过程是地表过程十分重要的组成部分,这里脆弱的生境条件和易变的气候等因素,使得生态过程的变化十分剧烈,不仅导致生态系统结构与功能自身发生深刻变化,而且具有改变与其相关的水分、土壤等要素的特性。

(3) 河源区大部分地域正好分布在青藏高原多年冻土区,以唐古拉山和昆仑山区间的多年冻土区为主,是羌塘高原的主体,气候上属于那曲果洛半湿润区和羌塘半干旱区,多年冻土分布孕育了该区域大面积的高寒草甸和高寒沼泽湿地。冻土不仅是该区域生态系统发育与分布的重要控制因素,而且通过独特的水热交换,直接参与生态系统的演化过程。

因此,青藏高原独特的冻土生态学过程不仅是青藏高原多年冻土区重要的地表过程之一,而且这一过程广泛地参与其他诸如区域水循环过程、冻土过程、生物地球化学循环过程以及冷生土壤过程等等。开展该区域特殊的冻土生态学过程研究,可以回答以下国际社会广泛关注的科学问题:在全球气候变化影响下,我国青藏高原寒区生态系统发生了何种变化?冻土协同气候和生态变化对我国众多大江大河将产生何种影响?这些问题不仅是国家层面迫切需要解决的关键科学问题,而且也是国际全球变化研究关注的焦点。

二、典型研究区域选择

青藏高原是众多河流的发源地,就举世著名的三江源而言,包括长江、黄河和澜沧江三大河流源区。从青藏高原陆面特性、河源区生态和环境的重要性等方面来区别,在众多河源区中,黄河与长江源区独具其特色和科学与区域发展的重要性,主要缘于该区域具有青藏高原最具代表性的气候、生态、环境与水文等方面的特性,如强烈的冰冻圈作用、与地球上其他两极可类比的苔原、丰富多样的高寒生态系统、多样的冰缘地貌、独特的冻融景观以及冷生土壤等。另外,黄河与长江源区也是我国第四大草地畜牧业重要基地——青藏高原高寒草地的核心组成部分,是我国三江源国家自然保护区的核心。这里有世界上分布海拔最高、面积最大的高寒沼泽湿地,有世界上中低纬度分布面积最大的冻土。冻土所产生的土壤活动层特殊的水热交换是维持高寒生态系统稳定的关键所在,冻土及其孕育的高寒沼泽湿地和高寒草甸生态系统具有显著的水源涵养功能,是稳定江河源区水循环与河川径流的重要因素,对于区域的生态环境和水资源安全具有极其重要的影响。再者,青藏高原多年冻土分布区,重要的冻土工程如青藏铁路稳定性和安全性维护是现阶段这些大型工程营运中面临的主要问题,其中以水分运移为主导因素的次生冻胀灾害防治,核心在于对冻土地区生态与冻土协同的演变过程的深刻认识和定量模拟。

青藏高原多年冻土具有地温高、厚度薄、活动层浅、稳定性差的特征,在全球气候变暖背景下,呈现持续性退化趋势。自20世纪70年代末至90年代中期,青藏高原年平均地温升高 $0.1\sim 0.5^{\circ}\text{C}$,在边缘地带垂向上形成不衔接冻土和融化夹层。调查表明,位于青藏高原冻土北部下界附近的西大滩也发生了较大规模的冻土退化,在 220 km^2 的调查范围内,多年冻土面积从1975年的 160.5 km^2 减少到2002年的 141.0 km^2 ,缩小约12%。全球气候变化将导致多年冻土的退化,对水文、生态系统和土壤生物地球化学产生很大的影响。普遍认为,近几十年内,随着全球变暖的持续发展,活动层厚度将发生显著变化,影响地表产流、土壤含水量、地表蒸散发、植物生长周期及工程地质稳

定性等。对江河源区而言,高寒生态系统的稳定性和冻土环境变化程度还与一系列重大的冻土工程密切相关,高寒生态系统与冻土环境的耦合系统对全球气候变化所产生的次生灾害直接关联着冻土工程的稳定和安全运营。

因此,选择最具寒区特色和全球气候变化研究热点区域之一的长江与黄河源区,针对寒区冻土生态过程的巨大影响,开展冻土草地生态系统变化、陆面过程与环境效应、高寒生态系统对全球变化的响应机制与水循环特征等方面的研究,对于揭示青藏高原特殊的冻土生态学过程及其环境影响,在学科发展和国家需求方面均具有显著的意义和价值。

三、研究的主要相关科学问题及其相互关系

围绕青藏高原多年冻土区域的长江和黄河源区现代生过程,突出基于冻土环境的生态学过程及其环境影响,核心内容包括以下几个方面:

(1) 近 50 年来的区域气候变化特征。在全球气候变化背景下,青藏高原多年冻土区的气候变化具有何种特征,是否与全球同步或具有其特性,是我们首先关注的一个科学问题。主要从气温、降水等角度详细论述了多年冻土区的长江和黄河源区的气候变化过程及其特性,明确该区域气候变化与全球气候变化的一致性及其特殊性。同时,利用河源区最为重要的水文过程,一方面反映气候变化的影响;另一方面反映区域水循环的变化趋势及其可能的地表下垫面特性的改变。

(2) 区域 LUCC 及其驱动机制。区域 LUCC 既是地表生态过程的体现,也是重要的区域性环境问题之一,是全球气候变化的区域响应中重要的表现方式和全球气候变化研究的核心内容之一。在全球气候变化背景下,研究多年冻土区的河源地区土地利用与覆被变化,可以揭示两个方面的问题:一是人类活动通过改变土地利用方式对区域生态环境的影响程度;二是区域土地覆盖变化所体现出的冻土生态系统变化的宏观表现,也同时反映地表环境变化趋势。土地覆被变化直接导致区域水循环、生物地球化学循环等陆面过程变化,也是影响草地畜牧业发展的重要因素,是区域重要的冻土生态学问题。

(3) 区域高寒生态系统变化及其功能影响。冻土生态系统在气候变化和人类活动影响下的变化过程,包括退化与自然恢复两个并存的过程,不同类型的高寒草地生态类型应具有不同的表现规律,同时可能存在由于地貌和冻土条件的不同而形成的空间异质性,辨识这些异质性演变规律,对于揭示气候变化下青藏高原特殊的冻土生态系统演化趋势、形成机制等具有重要意义,也是退化高寒生态系统恢复重建和三江源生态环境保育的重要科学基础。

(4) 气候协同植被覆盖变化对冷生土壤环境的影响。冻土环境形成的特殊冷生土壤,既是高寒生态系统重要的生境要素,也是冻土生态系统重要的组成部分。伴随气候变化及其驱动的冻土环境退化,植被覆盖剧烈改变的结果将直接导致冷生土壤环境发生显著变化,这种变化不仅是冻土生态系统演化的组成部分,也是重要的区域环境问题之一。通过认识土壤物理化学性质变化,有助于理解冻土生态系统碳氮循环与源汇变化、水土流失以及高寒生态系统自然恢复潜力等。

(5) 以水土流失和土地荒漠化为重点的区域环境变化。承继土地利用与覆被变化,水土流失和土地荒漠化是冻土河源区最为重要的环境问题,是冻土退化、植被退化的必然产物,如何防治土地荒漠化和水土流失是区域生态环境保护的重点。在多年冻土区,该问题的复杂性主要是冻融侵蚀和冻融荒漠化的甄别、成因机制等难以明确回答。

(6) 高寒草地水循环规律与植被覆盖变化的水循环效应。陆面水循环既是重要的生态过程和陆面过程的组成部分,也是河源区极其重要的生态功能和环境问题。高寒草地水循环是国际上生态水文学领域研究较为薄弱的方面,国际上在环北极地区,开展了较多的冻土地区生态水循环系统观测试验,其结果主要倾向于支持全球气候变化下冻土退化将导致区域水循环加剧、水量增加。但是青藏高原的实际是径流趋于减少,这就可能存在与北极地区显著不同的冻土生态水文学机制,这部分内容将重点通过实际观测试验揭示草地植被覆盖变化的水循环效应,以期为解决上述问题提供科学依据。

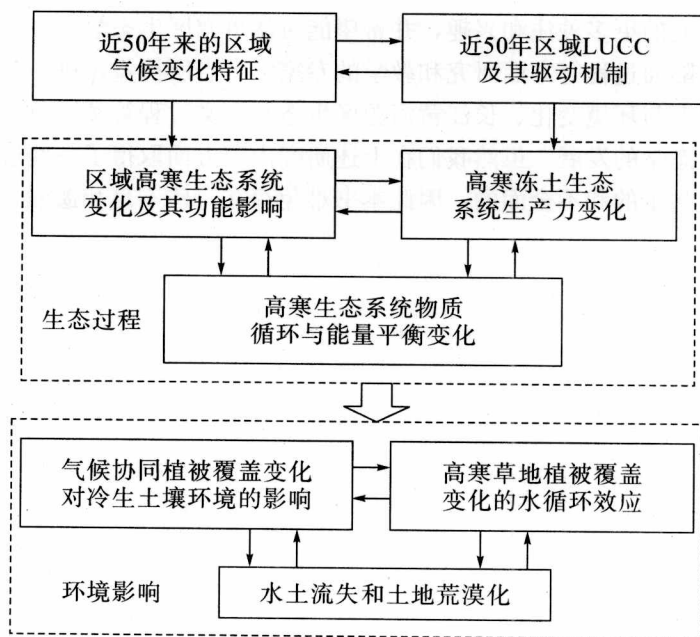
(7) 高寒冻土生态系统生产力变化。植被生产力是描述生态系统质量和健康状况的重要指标之一,植被 NDVI 指数、NPP 以及现存生物量等常被用来指示陆地生态系统的生产力状况和动态变化。引入遥感数据的参数模型或过程模型来估算与预测区域植被生产力空间分布与动态变化,是目前国际上重点发展的方向。开展冻土生态系统的植被生产力动态变化研究,有助于深刻理解冻土生态系统对全球气候变化的响应特征与演变趋势。

(8) 变化环境下高寒生态系统物质与能量平衡变化。生态系统的能量和物质循环是其重要的生态过程,冻土生态系统的碳氮循环因其对于气候变化的高度敏感性而备受关注。在全球气候变化背景下,青藏高原陆面能水平衡、生物地球化学循环过程的演变,不仅是区域重大环境问题之一,而且广泛涉及亚洲季风以及区域气候和水文情势变化。近年来国家区域气候乃至全球气候模式发展中考虑的重要因素之一就是高原陆面过程的参数化问题,而分析冻土生态系统在不同气候变化、植被覆盖变化下的碳排放规律,有助于认识气候变化和植被覆盖变化对高寒生态系统碳库及其源汇功能的影响。在陆面过程方面,主要关注了三个问题:一是植被覆盖变化的地表能量平衡变化及其对冻土活动层土壤水热传输与分布的影响;二是高寒草地区域蒸散发及其空间分布与变化;三是高寒草地植被水分利用效率及其空间分布格局与动态变化。

上述基本研究内容的基本框架和相互关系下图所示,区域气候变化及其关联的区域 LUCC 变化是区域冻土生态过程变化的主要驱动因素,生态过程变化和 LUCC 变化促使区域环境产生一系列响应。这些相互关联内容的研究,在本成果中大部分属于阶段性探索,尚有很多问题需要进一步系统研究。

四、成果集成的若干问题

本专著是多个科研项目研究成果的系统化集成,主要是国家自然科学基金项目“长江黄河源区高寒生态与水文耦合系统对全球变化的响应研究”(No. 90511003)和“黄河源区景观空间格局变化的生态功能影响研究”(No. 30270255),中国科学院“百人计划”项目“长江源区草地生态水文过程研究”,以及国家重大基础研究计划(973)项目



研究内容基本框架及其相互关系示意图

第四课题“江河源区积雪冻土变化对高寒生态系统的影响研究”（2007CB411504）等。在这些科研项目支持下，经过2002~2008年艰苦的工作，先后有16人参与野外调查、观测试验以及遥感分析等，从1999年首次开展江河源区科学调查以来，先后在2002年、2008年进行过2次较大规模的样带考察，穿越黄河和长江源区大部分地带，共计开展综合生态调查样地230余个，设置定位、半定位调查、观测与试验样地16处。在完成上述科研项目的既定目标基础上，形成了围绕江河源区高寒生态与环境不同方面的研究成果，并产生了硕士学位论文6篇、博士论文3篇。目前，在上述国家973项目支持下，结合国家自然科学基金重点项目“典型山地水文生态系统水循环多尺度耦合的对比试验研究”（40730634），上述研究工作的大部分内容仍然在继续进行，有望未来在高寒草地生态水文学规律、冻土水热变化的生态系统响应机制等领域取得有影响的成果。

本书可以看成是作者已出版的另一部专著《江河源区生态环境变化及其综合保护研究》的姊妹篇，许多工作是在以前研究工作基础上的深化和延伸。研究成果是上述项目组成员群体艰辛劳动的结果，全书共分十章，其中第一章、第二章由王根绪和刘光生合作撰写，第三章、第四章由王根绪和周国英执笔撰写，第五章和第七章由李元寿和周国英执笔撰写，第六章由王一博、李元寿和王根绪合作撰写，第八章由王根绪和张春敏合作撰写，第九章由王峻峰和李娜合作撰写，第十章由周剑和张春敏合作撰写。最后，由王根绪和李元寿负责全书统稿和整编工作，中国科学院寒区旱区环境与工程研究所王建研究员、井哲帆研究员等协助完成遥感和航测资料的解译分析与制图。

高寒环境下基于冻土过程的表生环境变化是一个新兴交叉学科领域，是回答江河源区众多资源、环境问题的主要学科基础，但是其理论和方法尚处在发展和完善之中，作者希望本书的出版能够引起各界有关人士对青藏高原生态环境，尤其是江河源区生态环

境与相关问题研究的更多关注和兴趣，并希望能对从事寒区生态学、江河源区生态环境变化、冻土地区陆面过程等方面研究和教学的专家学者有所裨益，进一步推动青藏高原多年冻土地区生态与环境变化、长江黄河源区生态与水文过程等领域研究以及寒区生态水文学和冻土生态学的发展。虽然我们在上述研究内容方面取得了一些进展，但对于很多领域的认识是初步的和不全面的，因此本书难免存在一些不足和遗漏，敬请读者批评赐教。

王根绪

2009年7月于成都

本书其他主要作者

(按姓氏拼音排序)

刘光生 李 娜 龙训建 王竣峰
张春敏 周 剑 周国英

本书由以下项目联合资助

- 国家重大基础研究计划(973)冰冻圈项目第四课题“江河源区积雪冻土变化对高寒生态系统的影响研究”(批准号: 2007CB411504)
- 中国科学院“百人计划”项目: 长江源区草地生态水文过程研究(2005 年)
- 国家自然科学基金项目: 长江黄河源区高寒生态与水文耦合系统对全球变化的响应研究(批准号: No. 90511003)
- 国家自然科学基金项目: 青藏高原多年冻土区高寒草甸植被覆盖变化对水循环影响的实验研究(批准号: No. 40701022)

目 录

前 言	(i)
第一章 河源区地理、生态与环境概况	(1)
第一节 河源区自然地理概述	(1)
一、地理范围	(1)
二、地质与地貌概况	(2)
三、江河源土壤特征	(4)
四、江河源区的气候	(5)
五、河流与湖泊	(8)
第二节 河源区生态与环境概述	(11)
一、江河源区的主要植被类型	(11)
二、河源区的生态系统与分布	(13)
三、河源区的冰川与冻土环境	(15)
第三节 河源区经济社会发展概述	(19)
一、区域经济社会概况	(19)
二、经济社会发展动态	(19)
三、江河源区自然保护与区域可持续发展	(21)
第二章 近 50 年来区域气候、水文与冻土环境变化	(23)
第一节 区域气候特征变化	(23)
一、资料说明及数据处理	(24)
二、近 45 年气候变化趋势分析	(25)
三、近 45 年气候变化因子的 R/S 分析	(29)
四、近 45 年气候变化因子的周期波动分析	(31)
第二节 区域水文特征变化	(35)
一、区域主要河流径流特征	(35)
二、区域径流的变化趋势及周期分析	(37)
三、径流过程的 FDC 分析	(39)
四、流域水源涵养指数变化	(39)
五、径流系数与降水—径流关系变化	(40)
第三节 区域冰川与积雪变化	(41)
一、区域冰川分布与变化	(41)

二、冰川水资源变化·····	(42)
三、区域积雪分布与变化·····	(44)
第四节 区域的冻土环境变化·····	(50)
一、冻土活动层厚度变化·····	(50)
二、多年冻土地温变化·····	(52)
三、冻土分布变化·····	(54)
第五节 小 结·····	(55)
第三章 河源区土地覆盖/利用变化与驱动因素分析 ·····	(57)
第一节 概 述·····	(57)
一、关于土地利用与土地覆盖·····	(57)
二、江河源区土地利用与覆盖变化研究的意义·····	(58)
三、分类与数据源·····	(60)
第二节 近 40 年来江河源区土地利用与覆盖变化 ·····	(62)
一、主要高寒草地覆盖变化·····	(62)
二、江河源区水域系统变化·····	(64)
三、难利用土地系统变化·····	(66)
第三节 江河源区高寒生态系统空间格局变化·····	(67)
一、高寒草地生态系统的演变趋向特征·····	(67)
二、高寒生态系统的空间格局变化·····	(68)
三、高寒生态系统草地群落结构变化·····	(70)
第四节 区域土地利用与覆盖变化的驱动因素分析·····	(71)
一、LUCC 的驱动因素分析概述·····	(71)
二、江河源区 LUCC 驱动因素分析 ·····	(72)
三、LUCC 的驱动力模型与主要因素贡献分析·····	(78)
第五节 土地覆被变化对土壤有机质和总氮含量的影响·····	(81)
一、不同草地类型不同植被覆盖下的土壤有机质和总氮含量变化·····	(81)
二、植被覆被变化导致的土壤有机碳和氮流失评估·····	(83)
第六节 小 结·····	(84)
第四章 高寒生态系统演化及功能变化·····	(86)
第一节 高寒草地生态系统的基本特性·····	(86)
一、高寒草甸生态系统·····	(86)
二、高寒草原生态系统·····	(87)
三、高寒湿地生态系统·····	(87)
第二节 高寒生态系统退化演替规律·····	(88)
一、不同退化程度高寒草甸生态系统演化·····	(88)
二、高寒草原草地生态系统退化演替·····	(93)
三、高寒沼泽草甸生态系统退化演替·····	(94)
第三节 生态综合指数与生态退化评价·····	(96)

一、生态综合指数·····	(96)
二、高寒生态系统变化评价·····	(97)
第四节 高寒生态系统退化的土壤生物学响应·····	(98)
一、土壤微生物量变化·····	(99)
二、土壤微生物酶活性变化·····	(101)
第五节 高寒草地退化的土壤有机碳库变化·····	(103)
一、土壤有机碳库及其分布·····	(103)
二、土壤碳库中不同组分随土地覆盖的变化·····	(105)
三、1986~2000 年间土壤有机碳损失估计 ·····	(106)
第六节 退化高寒生态系统的自恢复能力评价·····	(107)
一、自恢复力指数与评价方法·····	(107)
二、生态恢复程度与潜力评价·····	(108)
第七节 高寒生态系统工程干扰迹地生态自然恢复过程·····	(110)
一、高寒草原工程干扰迹地生态自然恢复过程·····	(110)
二、高寒草甸草地工程迹地植被自然恢复过程·····	(114)
三、工程迹地植被恢复演替进程中土壤种子库特征·····	(115)
第八节 小 结·····	(119)
第五章 冷生土壤环境演化与空间变异性·····	(121)
第一节 河源区土壤的物理性质变化·····	(122)
一、研究方法·····	(122)
二、土壤物理性质变化·····	(123)
第二节 河源区土壤化学性质变化·····	(127)
一、土壤养分含量变化·····	(128)
二、土壤 pH 及微量元素的变化·····	(132)
三、工程迹地人工恢复区土壤的矿质元素含量变化·····	(133)
第三节 土壤水分特性变化·····	(135)
一、土壤含水量变化·····	(135)
二、土壤导水率的变化·····	(137)
第四节 河源区冷生土壤空间变异特性·····	(139)
一、土壤水分的空间变异·····	(140)
二、河源典型区域土壤水分空间分布·····	(145)
三、土壤养分的空间变异性及其影响因素·····	(148)
第五节 基于冻融作用的植被与土壤环境的耦合关系·····	(152)
一、冻土环境变化对不同生态系统土壤的影响·····	(153)
二、冻融循环中的土壤温度和水分变化·····	(154)
三、植被覆盖变化对土壤冻融过程的影响·····	(156)
第六节 小 结·····	(158)

第六章 河源区水土流失与土地荒漠化	(160)
第一节 河源区水土流失与土地荒漠化概述	(160)
一、土壤侵蚀的界定、类型与分布.....	(161)
二、土地荒漠化的类型与分布.....	(162)
第二节 水土流失评价	(163)
一、基于 ¹³⁷ Cs的水土流失评估.....	(163)
二、不同植被退化对土壤侵蚀影响的小流域对比评价.....	(168)
三、土地覆盖变化的土壤养分流失评估.....	(173)
第三节 土地荒漠化	(175)
一、研究方法.....	(175)
二、土地荒漠化时空分布.....	(175)
三、“黑土滩”型土地退化.....	(178)
第四节 土地荒漠化成因及未来趋势	(179)
一、土地荒漠化的成因分析.....	(179)
二、水土流失的主要驱动因素.....	(181)
第五节 河源区水土保持与生态建设对策	(183)
一、提高对河源区水土保持与生态建设的认识水平.....	(183)
二、坚持水土保持与生态环境保护的科学原则.....	(184)
三、建立科学的管理体制和模式.....	(185)
四、水土保持与生态环境建设的保障体系建设.....	(187)
五、加强河源区的科学研究.....	(188)
第七章 高寒草甸草地植被覆盖变化对水循环的影响	(189)
第一节 高寒草地水循环概述	(189)
一、国内外高寒草地水循环研究进展.....	(189)
二、影响冻土活动层土壤水循环过程的主要因素.....	(193)
三、冻土区水循环因素模拟研究.....	(195)
四、存在的问题与发展趋势.....	(196)
第二节 高寒草地入渗过程与动态	(198)
一、高寒草地入渗过程观测试验与研究方法.....	(199)
二、入渗基本理论评述.....	(201)
三、土壤水分入渗及其对高寒草甸覆盖变化的响应.....	(203)
四、不同植被覆盖土壤入渗特征.....	(205)
五、土壤水分入渗的数值模拟.....	(206)
第三节 高寒草地蒸散发及其动态变化	(210)
一、高寒草地蒸散发试验观测及计算方法.....	(210)
二、土壤蒸散发对覆盖度变化的响应.....	(211)
三、无降水影响下土壤蒸散发对覆盖变化的响应.....	(214)
四、日蒸散与植被覆盖度的相关关系分析.....	(216)

五、日蒸散与地表温度的相关关系分析·····	(217)
六、大气透射率的相关关系分析·····	(218)
第四节 高寒草地的产流过程·····	(219)
一、典型坡面降水-产流的特征及其变化·····	(219)
二、高寒草甸覆盖变化对坡面产流的影响·····	(225)
三、高寒草甸覆盖变化对坡面径流产沙的影响·····	(229)
第五节 植被覆盖与气候变化对源区地表径流影响的评估·····	(230)
一、长江源区气候与冰川变化动态及其径流效应·····	(230)
二、植被覆盖与冻土变化对径流的影响·····	(232)
第六节 小结·····	(233)
第八章 河源区植被生产力变化与预算测·····	(235)
第一节 河源区的 NDVI 空间分布与动态变化及其驱动因素分析·····	(235)
一、河源区 NDVI 空间分布与动态变化·····	(235)
二、NDVI 时空分布特征·····	(237)
三、河源区 NDVI 驱动因素分析·····	(240)
第二节 植被净初级生产力 (NPP) 动态变化及驱动因素分析·····	(244)
一、植被净初级生产力 (NPP) 概述·····	(244)
二、基于光能利用率的植被净初级生产力模型·····	(244)
三、植被净初级生产力 (NPP) 时空分布特征·····	(246)
四、植被净初级生产力 (NPP) 动态变化·····	(248)
五、河源区典型植被类型植被净初级生产力特征·····	(249)
六、河源区植被净初级生产力驱动因素分析·····	(250)
七、未来不同气候变化情景下草地生产力分布格局预测及评价·····	(254)
第三节 基于冻土-气候模型的草地生产力空间格局模拟与变化预测·····	(256)
一、研究方法与数据来源·····	(256)
二、高寒植被地上生物量与气候因子的相关模型·····	(258)
三、未来气候变化情景下高寒草地植被生物量的响应·····	(261)
第四节 小结·····	(264)
第九章 高寒草地碳循环及其动态变化·····	(265)
第一节 概述·····	(265)
一、高寒草地生态系统与全球碳循环·····	(265)
二、高寒草地生态系统净初级生产力 (NPP) 与生物量·····	(266)
三、高寒草地凋落物碳库·····	(268)
四、高寒草地土壤碳库与土壤呼吸作用·····	(268)
第二节 基于观测的高寒草地碳排放过程及其影响因素·····	(269)
一、观测与分析方法及其主要的影响因素·····	(269)
二、高寒草甸草地碳排放日动态和季节变化·····	(272)
三、高寒沼泽草甸草地碳排放日动态和季节变化·····	(272)

四、高寒草地碳排放动态的主要影响因素分析·····	(273)
第三节 高寒草地退化对土壤碳通量的影响·····	(280)
一、不同退化程度草地样点的选取·····	(280)
二、气体样品的采集、测定与通量计算·····	(280)
三、退化对沼泽草甸碳通量的影响·····	(282)
四、退化对高寒草甸碳通量的影响·····	(282)
第四节 气候变化对高寒草地生态系统碳循环的影响·····	(284)
一、概述·····	(284)
二、研究方法·····	(285)
三、气温升高不同幅度条件下高寒沼泽草甸草地 CO ₂ 浓度的变化 ·····	(286)
四、气温升高不同幅度条件下高寒草甸草地 CO ₂ 浓度及碳平衡变化 ·····	(293)
第五节 高寒草地生态系统碳、氮分配及其对气候变化的响应·····	(299)
一、研究方法·····	(299)
二、研究结果·····	(300)
三、结论与展望·····	(305)
第十章 河源区陆面过程与模拟·····	(307)
第一节 冻土区陆面过程模型概述·····	(307)
一、陆面过程模型概述·····	(307)
二、陆面过程模型中冻土参数化方案·····	(308)
第二节 高寒草甸草地生态系统的能量-水分平衡分析 ·····	(308)
一、研究区域与方法·····	(309)
二、结果与讨论·····	(313)
第三节 河源区的潜在蒸散发·····	(319)
一、河源区的潜在蒸散发估算·····	(319)
二、潜在蒸散发空间分布·····	(324)
第四节 高寒草地水分利用效率及其动态变化·····	(325)
一、评价模型与验证·····	(325)
二、河源区植被水分利用效率年际变化·····	(326)
三、植被 WUE 值年内变化·····	(328)
四、长江源区不同植被类型 WUE 值特征分析·····	(330)
五、长江源区 WUE 值变化与因子分析·····	(332)
第五节 小结·····	(334)
参考文献·····	(336)

第一章 河源区地理、生态与环境概况

第一节 河源区自然地理概述

一、地理范围

长江源区位于青藏公路以西的昆仑山和唐古拉山之间的广阔地区，青海省的西南部，青藏高原的中央部位，长江源区范围选择以直门达水文站为界，其大致范围介于 $90^{\circ}43' \sim 96^{\circ}45' \text{E}$ 与 $32^{\circ}30' \sim 35^{\circ}35' \text{N}$ 之间，流域控制面积约 $13.78 \times 10^4 \text{km}^2$ ；黄河源区以达日县吉迈水文站为界，大致位于 $33^{\circ}00' \sim 35^{\circ}35' \text{N}$ 与 $96^{\circ}00' \sim 99^{\circ}45' \text{E}$ 之间，面积约 $6.48 \times 10^4 \text{km}^2$ 。地貌上以高平原丘陵为主，河网发育，俗称江河源区（王根绪，2001），长江黄河源区域地理范围与位置见图 1-1。

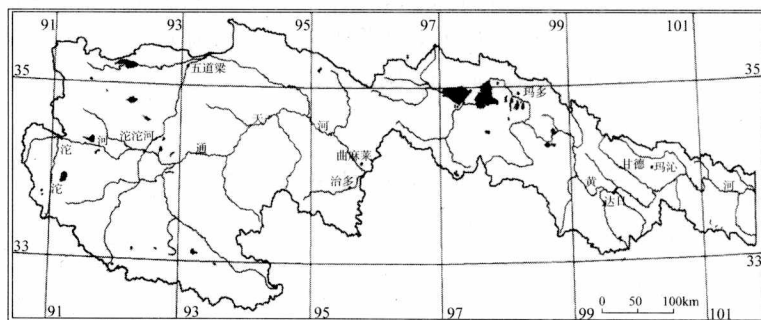


图 1-1 长江黄河源区域地理范围与位置

我国曾在 1956 年和 1977 年两次考察长江源头地区。在 1977 年的考察中，终于确定发源于各拉丹冬的沱沱河是万里长江的正源，源头位于唐古拉山脉格拉丹冬雪峰西南侧的姜古迪如冰川。长江源区由沱沱河、当曲、楚玛尔河、通天河等主要河流组成。河源区属于高原丘陵地带，降雨量存在着明显的季节性和地域性差异，降雨季节一般集中在 6~9 月份，该季节降雨占全年降雨量的 90% 左右。地域性差异表现为以沱沱河为界，呈现出西北低，东南高的不平衡降水分布，沱沱河以北的广阔河源地区年降水量在 221~243mm，楚玛尔河沿沱沱河向南至唐古拉山北麓地区，降水量逐渐增加，年降水量为 278~319mm。降水量的地域性差异还表现为通天河上、下游之间的差别，下游地区年降水量可达 384mm，明显高于上游地区的降水量。

长江源区地势由西向东逐渐降低，位于长江源头的格拉丹冬雪峰海拔 6621m，四周山峰一般海拔也在 5000m 左右，地形特点是山间盆地与高大褶皱山地相间，河流众多，多年冻土发育，冰川雪被、湖泊沼泽和源泉分布广泛。源区西部以山原地貌为主，为低