

# 寒区生态水文学 理论与实践

Ecohydrology in Cold Regions:  
Theory and Practice

王根绪 张寅生 等著



科学出版社

# 寒区生态水文学理论与实践

王根绪 张寅生 等 著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书以我国青藏高原冻土流域为对象,结合泛北极河流研究进展,详细阐述寒区大气-植被-积雪-土壤间的能水交换与传输过程,坡面尺度不同植被盖度下的产流过程以及集水单元流域产流过程,并论述冻融循环对于寒区流域径流形成与汇流过程的作用,发展了寒区产流机制模型和流域生态水文模型。

本书可供从事水文学、地理学、冰冻圈科学以及生态学等专业的科研人员、高等院校相关领域师生参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

寒区生态水文学理论与实践 / 王根绪, 张寅生等著. —北京: 科学出版社, 2016.8

ISBN 978-7-03-049576-1

I. ①寒… II. ①王… ②张… III. ①寒冷地区-生态学-水文学-研究 IV. ①P33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 190868 号

责任编辑: 张 展 李 娟 / 责任校对: 王 翔

封面设计: 墨创文化 / 责任印制: 余少力

### 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>

四川煤田地质制图印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2016年8月第一版 开本: 787×1092 1/16

2016年8月第一次印刷 印张: 23 1/8

字数: 490千字

定价: 180.00元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

# 序 一

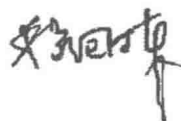
寒区水文学的发展已有近百年历史。基于能量平衡和物质平衡理论,冰川水文学和单纯的积雪水文学的相关理论认识与定量化模式发展迅速;相比而言,由于缺乏相对完善的理论和方法体系,冻土水文学的发展要滞后一些,归因于冻土水文过程的高度时空变异性及其能水交换过程的复杂性。一方面,土壤水文学本身尚存在较多的未知领域,包括生物因素参与后的土壤生态水文过程,尚未形成有效的刻画方法,在这一过程中叠加冻融作用的能量传输与水体相变作用,就使得活动层土壤水文过程的认知更加复杂和困难。另一方面,以冻土界面为隔水层的冻结层上地下水,其高度异质性的含水层特性、复杂多变的水力参数、多种因素共同作用的地下水补给-径流-排泄系统等,迄今为止尚未在这一领域取得突破性进展。而冻土地下水系统还包括冻结层下和冻结层间地下水,三种典型的地下水类型相互联系又存在显著的动力学差异,如何在传统的地下水水文学理论上,发展适合于冻土地下水过程的理论与描述方法,始终是水文学领域的前沿难点。总之,深入研究冻土生态水文过程、机理与模拟方法,既是冻土水文学发展的迫切需要,也是现代寒区水文学最希望取得突破的方向。冻土学的核心就是对大气-植被-土壤-冻土系统水热交换过程的科学认识,寒区陆面过程中最具挑战性的问题也在于对冻土参与下的陆面能水交换过程的准确刻画。在长期的冻土学研究中,尽管明确了生物因素(如植被覆盖、土壤有机质层、根系以及微生物等)对土壤水热耦合过程的巨大影响及其形成机制,但始终没有建立高精度刻画这些作用过程的普适性定量模式,成为制约冻土模型、寒区水文模型和陆面过程模型以及寒区生态模型发展的瓶颈。

生态水文学是一个新兴交叉学科,大致在1999年,我非常偶然的获得了Baird和Wilby教授编著于1999年刚印发的*Eco-hydrology. Plants and water in terrestrial and aquatic environments*一书,认识到生态水文学将无疑是解决流域生态环境与水资源合理利用等方面诸多矛盾与问题最有效的理论,也认识到其将是未来水文学和生态学发展的重要方向。为此,我及时委托王根绪和赵文智两位博士进行中文翻译并付诸出版,成为最早向国内介绍生态水文学理论的开创性文献。生态水文学在其诞生之初,就形成了两个方向并头发展的格局:一是基于生态学或植物学的生态水文学,另一个是基于水文学的水文生态学。前者以相对微观的植物学和生态学理论为基础,探索植物生理过程或生态过程中耦合的水文学问题;而后者则以水文学的理论和方法为基础,探索水文过程的生物因素,或水文过程变化的生态效应。王根绪博士就是沿后一个方向发展的,这就使得本书具有一个显著特点:以陆面水循环、坡面水文学和流域水文学理论涉及的生态因素角度,探索生态水文过程的规律和机制。

在寒区水文学以及与之相关的冻土学和寒区陆面过程研究的发展过程中,生态水文

学同样具有不可替代的重要作用，甚至可以预判是取得突破性进展的最具希望的途径。当然，寒区生态水文学更是新的多学科交叉边缘学科，完全属于创新探索领域。王根绪博士是在1998年前后才被我引入青藏高原冻土地区的，当初是以江河源区的生态环境退化及其对流域水文影响这一问题为对象，试图去解释引发江河源区生态退化和水文过程变化的形成原因。从那时起，王根绪博士带领自己的团队对上述这些冻土学和寒区水文学的“硬骨头”展开了挑战，并坚持了15年，本专著就汇集了他们在上述问题上取得的研究进展，包括在寒区水循环理论方面十分重要的大气-植被-冻土水热交换及传输过程与机制、寒区冻融循环控制下的坡面产流过程和流域径流形成机理以及寒区流域基于生态过程与冻土水文过程耦合机制的水文模型等。特别是在寒区流域径流形成的温度变源机制的认识，并在传统的土壤水分饱和和容量产流理论基础，提出的土壤温度阈值产流的机理模型等，对寒区流域水循环及产汇流理论和分析方法是重要的发展。作者坚持了15年，得到的这些进展均汇集在这部专著中。在中国，比较系统地总结寒区生态水文研究成果的著作可以说是凤毛麟角。这部专著以“十年铸一剑”的努力，使我国寒区生态水文的研究上了一个新的台阶。

值得一提的是，中国西部高山高原均位于寒区，是寒区水资源的形成区。青藏高原号称“亚洲水塔”，高原上的“三江源”是包括长江、黄河在内的十几条亚洲大河的源区。中国西部的高山则是干旱区的水资源源区，千百年来维系着干旱区人民的生产、生态和生活。认识和合理利用这些珍稀的水资源，其重要性是不言而喻的，而寒区生态水文学正是认识和科学利用寒区水资源的重要基础。希望有更多的科学家和团队投入到这一研究行列中来。



2016年8月5日于兰州

## 序 二

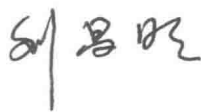
全球变化下，人类社会的可持续发展需要协调与平衡人类对水资源的需求量日益增加和生态环境需水之间的关系，并寻求科学管理水环境功能日趋严峻的流域水资源系统，全球性的水安全问题的现实需求推动了生态水文学的形成与发展。自 20 世纪 90 年代初生态水文学在全球范围内开始兴起，经过 20 多年的发展，生态水文学日益成为连接自然科学(水文学、生态学)、人文科学(社会学、经济学)以及人类社会(可持续发展)的桥梁，为变化环境下流域的可持续管理以及更为广泛的区域生态安全和环境安全提供科学依据与理论支撑。可以预见的是，未来伴随全球气候变化对水文系统和陆地生态系统的影响不断加剧，人类社会的可持续发展将面临更加严峻的水安全和环境安全制约，生态水文学被国际上大量应用研究证实是有效减缓全球变化对水安全压力影响，并寻求应对气候变化的适应性流域管理模式的强有力科学工具。

科学前沿的创新进展，结合社会生产和学科自身发展的需要，是推动学科发展的动力，这就需要从理论到应用又从应用到理论的不转化，在转化中不断提升理论认知水平和系统性。在水文科学理论前沿，由于冰雪水文和冻土水文学等分支学科自身缺乏完善的理论体系和精确的数值分析方法，寒区水文过程的形成、时空格局与演化、对变化环境的响应规律与机理、水文过程的分析与模拟等，都存在较多的未知问题和挑战。然而，全球范围内，一方面寒区往往是众多河流的发源区，是淡水资源供给的核心区域，如青藏高原河流水系之于亚洲地区、北冰洋河流水系对于泛北极大陆、落基山水系之于北美以及阿尔卑斯山区河流之于欧洲等，人类社会的持续发展不断增加对这些淡水资源的需求，其水安全保障功能的重要性日益突出；另一方面，寒区存在大量对气候变化极度敏感的环境因子，特别是一些重要的水循环要素如冰川、积雪和冻土等，不仅对气候波动响应强烈，而且其变化过程具有巨大的能水效应和生态效应。同时，寒区生态系统对气候变化具有高度脆弱性，过去的气候变化已经对全球大部分寒区生态系统产生了显著影响，如北极地区的灌丛替代苔原、沼泽湿地取代森林等，青藏高原高寒草地生态系统格局与生产力也发生了较大改变。陆面生态系统的这些变化无疑将改变原有水循环过程，对区域水文情势的影响十分深刻。正因如此，过去 20 多年来寒区水文系统的显著变化，对区域乃至全球的水安全和环境安全方面产生了较大影响和威胁，成为全社会广泛关注的焦点之一，国际上也陆续开展了大量寒区水文科学问题的探索，包括我国对西南河流域水文变化的持续关注和研究等。这些日益突出的社会需求，有力推动了寒区生态水文学的理论探索，本书产生的科学价值与实践意义就在于此。

寒区生态与水文间的耦合关系可能要比其他任何地方更加紧密而复杂，水文过程的生物作用更加强烈而深刻。要破解寒区水文过程形成与演化的诸多机理问题，首先就需

要系统认知寒区特殊的大气-植被-积雪-冻土间的水热耦合交换规律及其机理，理解陆面水热交换中的生物作用。基于大量观测试验研究结果，本书提出了刻画生态系统变化驱动土壤水热运动过程分异的新的参数体系，构建了寒区大气-植被-积雪-冻土间水热耦合关系理论与模式，增进了寒区陆面水热交生物因子的理论认识。此外，本书中还有三个方面的进展需要给予高度关注，一是关于寒区冻土下垫面产流规律及其成因中的土壤冻融温度阈值和生态因素的阐述；二是对于寒区流域径流形成的温度变源机制的系统论述，并在传统的土壤水分饱和和容量产流理论基础上，提出了土壤温度阈值产流的机理模型，发展了寒区流域水循环和产汇流理论和分析方法；三是在寒区陆面过程模型以及耦合积雪、冻土和生态水循环的寒区流域分布式生态水文模型取得的新进展。值得指出的是，本书从水文学系统理论角度，在水热交换的机制与模式、坡面水循环过程以及流域尺度水文过程等方面，全面阐述了寒区生态水文学的基本理论、范式和分析方法，是迄今为止针对某一典型水文气候区较为系统的生态水文学理论描述，有助于生态水文学理论体系的进一步完善，并进而推动寒区水文学理论的发展。寒区严酷的环境限制了实验水文学的发展，可以想象在青藏高原海拔 4500m 以上多年冻土流域常年开展生态水文过程观测试验的艰辛，因此，本书提出的诸多创新成果十分可贵。

学科之间的交叉、融合与分化成为科学发展的重要标志，本书展示的学术成果就是水文学、生态学交叉并与冰冻圈科学和地理科学相互渗透与融合的产物，因而具有显著的学科研发意义，寄望于本书成果对于寒区水文科学、寒区生态学以及冰冻圈科学等学科的发展产生较大贡献。毋容讳言，对于极具挑战的寒区生态水文学前沿发展的难题而言，方兴未艾，还有很长的路要走，希望本书的作者依旧秉承“知行合一”的理念，以本书为起点，继续潜心研究，“精益求精，止于至善”，进一步提高对寒区水文过程的准确识别能力，深化对寒区生态水文学理论体系的研究，为推动我国生态水文学和寒区水文学发展做出更大贡献。



2016年6月于北京

## 序 三

寒区在全球水循环和淡水资源供给方面占据着十分重要的地位，我国主要河流如发源于青藏高原的西南诸河流、发源于西北高寒山区的干旱内陆流域以及发源于东北地区的松花江和黑龙江等，在我国经济社会发展中具有举足轻重的作用。在全球变化作用下，寒区对气候变化的高度敏感性导致区域水循环和水文过程的变化十分剧烈，不仅对区域水安全、能源安全产生较大影响，而且在环境安全、生态安全方面也产生了一系列显著效应，引发全社会广泛关注。系统阐明气候变化下寒区流域水文过程变化的基本格局与趋势、水沙演化进程与水环境效应、河流生源要素通量变化及其区域碳氮平衡影响、寒区生态系统与水循环的互馈影响与生态功能变化等，成为寒区流域水文科学迫切需要解决的焦点问题。

然而，一方面由于寒区水循环诸要素的观测十分缺乏、相关水文数据获取困难，我们对这些寒区流域水文过程的了解十分有限，始终是水文学前沿 PUB(无资料流域水文预报)问题的典型代表区域；另一方面，寒区冰冻圈作用下的水文学理论与分析方法存在诸多未知领域，缺乏大气-植被-冻土水热交换与传输过程的系统理解及其定量模型，对冻融循环控制下的坡面产流和流域径流形成过程与机制的认知也十分有限，严重制约了对寒区流域水文过程的定量分析能力。寒区水文过程的复杂性，还在于水循环对陆面生态过程和下垫面能量分配变化的高度敏感性。寒区生态系统在能水两方面对水循环的影响程度远高于其他区域，能量分配格局所制约的水分相变直接决定水循环规律。因此，要科学识别寒区水循环的形成与演变机理，需要对水循环及其伴生过程进行综合分析 with 定量表达，特别是生态过程与水文过程在能水两方面的系统耦合，对于客观揭示寒区水循环规律和准确判识流域径流变化，具有决定性的作用，这既是现代水文水资源研究的前沿核心问题，更是寒区水文学理论和分析方法发展的关键。

《寒区生态水文学理论与实践》这本汇聚多个重大科研项目成果的专著，正是以上述这些水文科学前沿核心问题为切入点，在寒区水循环迫切需要认知的大气-植被-冻土水热交换与传输过程与机制方面，系统阐明了寒区生态类型、植被覆盖以及与植被协同演化的土壤质地等因素影响下，寒区特殊的 SPAC 系统的能水交换和传输过程，并在定量模式方面取得了突破性进展；在寒区冻融循环控制下的坡面产流过程和流域径流形成机理方面，全面揭示了气候与寒区生态系统协同影响下的能量传输和温度变化对地表径流形成与演化的作用本质、方式、阈限及其数值解析途径，基于这些方面的进展，在寒区流域基于生态过程与冻土水文过程耦合机制的水文模型方面，也开展了一些很有价值的探索。寒区精细的水文学研究工作难度较大，所涉及的水循环陆面过程因素复杂，在现代水文学前沿发展的重点研究领域，积极倡导水循环的气-陆耦合研究，以求解决这类无



资料流域和复杂水循环系统下的水文预报和高精度水文模型的发展问题，本书中所展示出的大部分进展，充分体现了研究者重视寒区陆气耦合的水循环过程研究思想。在陆面过程模式发展的基础上，通过大气-植被-冻土水热交换与传输过程，探索陆面过程模型中对于植被-冻土耦合过程以及积雪-植被耦合系统方面的有效改进，进而实现与流域水文模型的结合，为寒区利用一个共同的陆面模式耦合大气模式和水文模式，实现区域尺度水文过程的准确模拟和预测，奠定了重要基础。

现代水文学发展的一个十分重要的技术变革趋势是由传统的物理模型向“原型观测+数值模型”相结合转变。为客观描述变化环境下水循环的演变规律，在现代水文水资源研究中，高度注重野外原型观测实验，在大量原型观测实验数据的知识挖掘的基础上，获取水循环客观演变规律。对于寒区冰冻圈要素控制下的水循环和水文过程研究，在极度缺乏相应水文学成熟理论和方法支持下，开展系统的原型观测实验就显得更加重要。本书所提供的几乎所有进展均是源于在青藏高原多年冻土流域开展长期观测实验研究的结果，这是对本书成就需要充分肯定的另一个基点。本书中对于寒区水文过程的完整流域观测实验工作，应该称得上系统而全面，在河源集水流域尺度上，充分开展了水循环的地表过程、土壤过程和地下水过程以及寒区特殊的积雪过程、冻土过程以及生态过程等的系统监测。通过获取大量实验观测数据，探索了符合寒区水循环过程的数值模拟途径和方法，为寒区水文学乃至其他区域水文学的研究和发展提供了值得借鉴的技术途径。

鉴于寒区水文学本身的复杂性和理论与方法的缺乏，本书所展示的进展在其涵盖的方向上是较大的进步，但远不是终点，很多方面甚至只能说是初步的认识，因而任重而道远。开卷有益在于举一反三和基于当前的进一步思考，为此，在本书已经取得的多方面进展的基础上，正如第9章对于未来发展趋势的论述中所提出的一些展望，我提出以下几方面进一步深入研究的建议供读者思考：①在基于过程的现代水文水资源研究中，进一步加强寒区陆气耦合研究，在寒区陆面过程与冻土水文过程耦合研究基础上，促进寒区大气过程、地表过程、土壤过程和地下水过程4个基本水循环过程相互作用的有机性和整体性；探索基于物理机制的区域大气模式、陆面过程模式和水文模式的紧密双向耦合。②水循环及其伴生过程的综合集成研究和模拟。在变化环境下，寒区下垫面生态系统以及岩土等的敏感性和脆弱性，水循环伴生的水化学、水生态和水沙过程变化更加剧烈，这些伴生过程的区域环境和生态安全威胁值得予以高度关注。③寒区“自然-人工”二元水循环与水文过程演变机理及其模拟，寒区的人类经济活动日趋活跃，人工侧枝的水循环不断加剧，对自然水循环过程的影响可能比其他地区更加显著，为客观和科学地表达全球变化和人类活动影响下寒区水循环的演变特征，需要加强二元水循环过程、机制与数值模拟方面的研究。

2016年6月于北京

# 前 言

生态水文学是研究有关生物圈与水文圈之间的相互作用关系以及由此产生的水文、生态以及环境问题的一门新兴学科，因其内涵和研究思想很好地融合了当前人类社会可持续发展中面临的诸多生态安全、环境安全、水安全等方面的学科需求，近年来迅速发展并在多种生态气候和地貌类型区域开展了应用，并在应用中不断完善和发展了这一新型学科的理论体系。相比其他地区，以冰冻圈要素为主要区域环境和下垫面条件活跃因子的寒区，能量传输过程在水循环中起着更为重要且十分复杂的主导作用，生态-水之间的相互作用关系不仅体现在水循环本身，而且其相互间的能量关系强烈介入水循环过程，其生态水文学过程具有不同于其他地区的特殊性和复杂性，因而具有不同于其他区域生态水文学的理论体系和定量描述的模式与方法。寒区生态水文过程是联结寒区生态-水文与水资源的纽带，并通过生态过程和水文过程广泛作用于区域生物及生物地球化学、冻融次生灾害、淡水供应等多个领域，从而显著影响着寒区生态系统过程与功能、寒区环境安全和水资源安全等。由于寒区环境要素对全球变化的高度敏感性，且寒区水循环关键因子的冰雪、冻土等对气候变化的脆弱性及其巨大的能水效应，寒区生态水文过程对全球变化响应更加强烈且具有广泛的反馈效应，如寒区脆弱生态系统的稳定性、寒区水文系统和水资源保障能力以及寒区各种自然灾害的减控等。因此，在应对全球变化的区域响应与适应方面，寒区生态水文学具有更加紧迫的现实需要。

然而，由于寒区所具有的严酷环境条件和寒区生态水文过程的复杂性，加之研究手段和技术方法的限制，长期以来人类对寒区生态水文学过程与机制的认识十分有限，缺乏相关理论、适宜性技术方法和模式的系统研究。进入 21 世纪以来，冰冻圈科学的兴起与发展，极大促进了寒区水文学的发展，特别是冰雪水文学和冻土水文学理论、方法与数值模型的进步，为寒区生态水文学的深入系统研究创造了新的契机。自 20 世纪 90 年代以来，不断加强的寒区生态系统对全球变化响应研究，带动了寒区生态学研究的深化，特别是在冰冻圈要素和生态系统间相互作用关系与机制方面的一系列进展，为寒区生态水文学研究起到了极大推动作用。得益于寒区水文学理论与方法的支撑，但又不同于寒区水文学，寒区生态水文学迅速成为寒区水文学、生态学、地球表层科学和环境科学最为活跃的交叉发展前沿。其显著的学科交叉特性使得寒区生态水文学为阐明寒区生态系统过程与功能，促进寒区水文循环理论体系发展，理解全球变化的冰冻圈响应及其在寒区的影响，发展寒区流域应对全球变化的适应性管理与生态保育技术提供了有力的科学依据和技术支撑。

鉴于寒区生态水文学在寒区水循环与水资源保护、生态系统过程与功能维持、区域应对全球变化的可持续发展等方面的重要作用，特别是冰冻圈科学体系中对于系统阐释

冰冻圈水文学和冰冻圈生态学的学科内涵的学科交叉作用,自2005年中国科学院部署的“百人计划”方向项目开始,至2015年的10年间,仅中国科学院成都山地灾害与环境研究所就先后有5项国家自然科学基金项目(其中重点基金项目2项)、3项国家基础专项973计划项目课题支持开展了以青藏高原多年冻土区为核心的寒区生态水文学系统研究。近十多年来,开展相关领域研究的还有中科院寒区旱区环境与工程研究所的寒区水文学团队(以祁连山区为主要研究区域)、中科院青藏所的高原水循环研究团队(以藏北高原为主要研究区域)等,取得了众多创新研究进展,逐渐形成了寒区生态水文学理论体系雏形。本著作主要汇集了中科院山地所和青藏所部分代表性的研究成果,其主要目的是对我们过去已取得的寒区生态水文学的主要理论认识、方法与模式等方面的进展,较为系统地进行归纳和总结,并凝练出寒区生态水文学未来发展关注的核心科学问题,明确未来发展趋势与方向,为今后进一步深入和更加全面发展寒区生态水文学学科体系奠定重要基础。

生态水文学是多学科高度交叉融合的新型学科和前沿研究领域,本质上既是水文学的分支学科,又可以是生态学的分支领域。因而,国际上生态水文学理论体系进展就体现在相互关联但又显著区别的两个方面:一是以传统水文学为主,通过坡面和流域水循环与水文过程角度,探索生态系统的作用本质、机理与数值分析方法,突出较大尺度或宏观生态水文学的理论与方法;二是以植物生态学为主导,从微观的叶片、冠层尺度探索植物生理生态学为基础的水碳关系、水分行为及其机制等出发,探索植被类型与结构、生产力变化等对水循环和大尺度水文过程影响的生物学机理与定量描述的数值方法。毫无疑问,两个方向的有机融合与相互耦合,是生态水文学发展的必由之路。前一个方向的发展中,与地学相关的不同学科如冰冻圈科学、环境科学、地理学等都在生态水文学领域进行广泛的渗透融合,可以较好地阐释地理要素和冰冻圈要素在多大程度上和如何作用于生态水文过程。由于奠定本书内容的主要研究项目及其成果均建立在地学基础上,因而,本著作沿用水文学从点、坡面到流域等尺度演进的学科问题为导向,进行研究内容的编排。

全书共包含9章:第1章,简略阐述寒区陆面能水交换与水循环的一般特性,在简述寒区水文学基本内涵的基础上,对寒区生态水文学的基本概念、内涵以及核心科学问题及其国内外进展状况等进行全面综述。第2章较为系统地阐述大气-植被-冻土系统为主体建立的寒区SPAC系统水热耦合传输过程,论证植被类型与覆盖变化、有机质层结构与变化等生态系统因素对大气-冻土间水热传输关系的影响程度、方式与机制,提出寒区SPAC系统能水耦合传输过程的理论认识和耦合模式。第3章讨论寒区积雪-植被协同的土壤水热传输过程及其动态规律,区分积雪覆盖变化单因素、积雪和植被覆盖变化协同的双因素作用下的活动层土壤水热动态特征,阐述积雪-植被间的相互作用关系及其水热效应。第4章以水循环中关键的陆面蒸散发为对象,论述寒区冰雪与植被覆盖变化的陆面蒸散发过程、动态规律及其形成机制;重点讨论寒区植被因素在蒸散发中的影响方式以及特殊的凝结水形成过程及其对蒸散发的影响。第5章对寒区水循环的关键伴生过程——寒区生态系统碳氮过程及其对冻融过程的响应规律、驱动机制等进行较为系统的论述,介绍在这一领域取得的主要进展和存在的不足。第6章系统阐述寒区坡面关键水循环和产流过程的基本规律、土壤冻融过程和生态过程变化影响及其作用机理,总结冻土

坡面不同降水产流模式、季节交替规律及其与土壤冻融关系方面的进展。第7章着重从流域尺度,论述径流特征、形成规律及其与冻融过程的关系,生态系统在流域径流形成与变化中的作用等,阐明寒区流域温度变源产流理论及其数值解析方法。第8章在概述目前国际上较为先进的寒区流域水文模型的基础上,介绍对寒区陆面过程模型、流域水文模型的改进与耦合发展,提出未来发展途径。第9章是对全书的总结,全面归纳寒区生态水文学理论与方法研究的进展、前沿问题与未来主要发展方向。全书由王根绪整体设计与组织,其中第1章、第6章、第7章、第8章和第9章由王根绪研究员基于课题组研究取得的进展独立完成撰写。第2章由刘光生撰写,第3章由张寅生和常娟撰写,第4章由张寅生撰写,第5章由孙向阳、常瑞英、张涛、毛天旭合作完成,第8章由周剑、张伟和王根绪共同完成,最后由王根绪负责全书统稿。

值得指出的是,对本书各章节内容,作者尽可能追踪国际上对于寒区生态水文学领域研究的前沿进展,并尽量着眼于学科的理论体系和方法论,相对系统地总结了目前有关寒区生态水文学领域的主要研究进展,但客观地说不可能涵盖这一领域的所有方面,特别是微观尺度的植物生态水文机理和北半球寒带大尺度生态水文学方面的一些认识,存在遗漏、不足与缺陷,甚至出现一些错误理论与方法也在所难免,期待相关领域的科学家给予批评和指导。新型学科交叉领域的理论探索,是基础研究中最具挑战性的方面,总是存在较多的不确定性和不可预见性,科学家的好奇心和自由探索永远是基础科学发展的重要动力。本书相当于我们在寒区生态水文学领域抛砖引玉,希望能够为这一前沿交叉学科领域的发展提供一些有益的基础,并期望能够在学科理论体系引导方面做出些许贡献。这里,我们要衷心感谢多年来支持本项研究的国家自然科学基金委员会、中国科学院等部门,感谢持续关注和支持我们的诸多冰冻圈领域、生态学领域和水文学领域的科学家。特别的,我们要衷心感谢我国著名的冻土学家、寒旱区流域生态-水文-社会系统科学研究的首席科学家程国栋院士,他是作者开展本领域研究的主要引导者,并对本研究给予了长期关注和指导。感谢国际著名的冰冻圈科学创建者秦大河院士,在他极具前瞻性的学科发展谋划中,十分重视寒区多学科领域的交叉融合,在国家973计划相关冰冻圈科学的两期项目执行中,对本研究给予持续强有力支持,充分保障了一支团队长期开展寒区生态水文学领域的系统研究。同时,本书编撰过程中,还得到刘昌明院士和王浩院士给予的精心指导,在此一并表示衷心感谢。本书后期研究及最终出版得到国家重点基础研究计划项目“冰冻圈变化及影响(2013CBA01807)”、国家自然科学基金重点项目“三江源区径流形成与变化机制及其冻土生态水文过程模拟(91547203)”等的资助。

王根绪

2016年6月于成都

# 目 录

第 1 章 寒区生态水文学概述 .....	1
1.1 寒区的基本陆面特性 .....	1
1.1.1 寒区的陆面水热特性 .....	1
1.1.2 寒区的陆地生态系统 .....	2
1.1.3 寒区的基本水循环与径流特征 .....	4
1.2 寒区水文学的概念与组成 .....	7
1.2.1 寒区水文学的基本内涵 .....	7
1.2.2 冰川水文学 .....	7
1.2.3 冻土水文学 .....	9
1.2.4 积雪水文学 .....	10
1.3 生态水文学与寒区生态水文学 .....	12
1.3.1 生态水文学概述 .....	12
1.3.2 寒区生态水文学的基本概念 .....	17
1.3.3 寒区生态水文学的基本内涵 .....	21
1.4 寒区生态水文学的核心科学问题与研究进展 .....	24
1.4.1 生态水文学的核心挑战：理论体系与学科范式的发展 .....	24
1.4.2 大气-积雪-植被-土壤水热耦合过程 .....	25
1.4.3 水文与生态变化的敏感性和适应性及其反馈作用 .....	27
1.4.4 从群落到全球等不同尺度上水与生态系统的相互关系 .....	28
1.4.5 寒区生态水文模型的发展 .....	30
1.4.6 寒区水资源管理决策中的生态水文学 .....	32
参考文献 .....	34
第 2 章 冻土生态系统水热耦合传输过程 .....	37
2.1 理论基础与研究进展 .....	37
2.1.1 土壤-植被-大气系统 .....	37
2.1.2 冻土生态系统水热耦合传输过程 .....	38
2.1.3 冻土-植被-大气耦合模型 .....	41
2.2 研究方法 .....	43
2.2.1 研究区概况 .....	43
2.2.2 研究方法 .....	44

2.3	植被覆盖变化对活动层土壤温度分布与动态的影响	48
2.3.1	高寒草甸活动层土壤温度动态变化	48
2.3.2	沼泽草甸活动层土壤温度动态变化	56
2.3.3	小结	58
2.4	植被覆盖变化对活动层土壤水分分布与动态的影响	59
2.4.1	高寒草甸活动层土壤水分动态变化	59
2.4.2	沼泽草甸活动层土壤水分动态变化	64
2.4.3	小结	66
2.5	表层土壤有机质含量对土壤热状况的影响	66
2.5.1	引言	66
2.5.2	研究方法	68
2.5.3	融化过程中土壤温度和 SOC 之间的关系	69
2.5.4	冻结过程期土壤温度和 SOC 之间的关系	70
2.5.5	土壤温度变化特征	72
2.5.6	讨论	73
2.5.7	小结	78
2.6	植被覆盖变化的能量平衡与热传导影响	78
2.6.1	分析方法	79
2.6.2	地表热状况及其对植被盖度变化的响应	80
2.6.3	植被覆盖变化的地表热力学响应	82
2.6.4	植被覆盖对活动层土壤热参数的影响	84
2.6.5	讨论	86
2.6.6	小结	87
2.7	植被-土壤有机质协同演化影响下的活动层水热过程模拟	88
2.7.1	考虑植被覆盖与土壤有机质含量的 Stefan 方程改进	88
2.7.2	改进的土壤水热过程模型的实例应用	90
2.7.3	小结	92
	参考文献	92
第3章	积雪-植被协同的土壤水热传输过程	99
3.1	理论基础与进展	99
3.1.1	积雪的能量平衡效应及其对土壤热状况的影响	100
3.1.2	积雪的生态效应与雪生态学进展	101
3.1.3	积雪的水文过程与模拟	104
3.2	单一积雪覆盖变化的土壤水热传输过程	105
3.2.1	土壤冻融时间的变化	106
3.2.2	有无积雪覆盖对活动层冻融过程中土壤温度的影响	107
3.2.3	有无积雪覆盖对活动层冻融过程中土壤含水量的影响	110
3.3	积雪-植被覆盖协同变化对土壤水热动态的影响	111

3.3.1	植被-积雪覆盖协同变化对活动层土壤水热动态的影响 .....	112
3.3.2	植被-积雪覆盖变化对活动层土壤水热动态的影响 .....	117
3.4	植被与积雪的相互作用 .....	120
3.4.1	植被与积雪相互关系概述 .....	120
3.4.2	森林对积雪遮断作用 .....	123
3.4.3	森林对积雪表面能量平衡的影响 .....	128
3.4.4	植被对积雪积累-消融过程的影响 .....	132
	参考文献 .....	134
<b>第4章</b>	<b>寒区冰雪与植被覆盖变化的陆面蒸散发过程 .....</b>	<b>139</b>
4.1	地表蒸散发的有关概念与估算方法 .....	140
4.1.1	地表蒸散发的一些概念 .....	140
4.1.2	实际蒸散发 .....	140
4.1.3	地表蒸散发的观测与估算方法概述 .....	143
4.2	寒区陆面蒸散发过程及其与冻融循环的关系 .....	147
4.3	蒸散发季节动态与土壤水分平衡变化 .....	149
4.4	植被覆盖变化对寒区陆面蒸散发的影响 .....	157
4.5	不同植被盖度下的积雪升华过程 .....	162
4.6	凝结水及其对蒸散发模拟的影响 .....	167
	参考文献 .....	169
<b>第5章</b>	<b>寒区生态水循环关键伴生过程与影响 .....</b>	<b>175</b>
5.1	概述 .....	175
5.2	寒区生态系统的水碳通量耦合过程与变化及影响因素 .....	176
5.2.1	青藏高原碳通量变化格局 .....	177
5.2.2	青藏高原水热通量变化格局 .....	179
5.2.3	青藏高原水分利用效率变化格局及影响机制 .....	181
5.2.4	青藏高原水碳通量耦合作用及影响机制 .....	183
5.2.5	小结 .....	186
5.3	高寒草地生态系统碳氮过程与水热耦合关系 .....	186
5.3.1	冻融扰动作用对增温的响应及其对土壤碳迁移的影响 .....	188
5.3.2	增温对多年冻土区土壤氮循环的影响 .....	190
5.4	土壤呼吸与土壤水热关系 .....	194
5.4.1	概述 .....	194
5.4.2	研究方法 .....	194
5.4.3	土壤呼吸日变化特征 .....	195
5.4.4	土壤呼吸季节变化特征 .....	197
5.4.5	不同季节土壤呼吸 CO <sub>2</sub> 排放量估算 .....	199
5.4.6	土壤呼吸不同组分特征 .....	201

5.4.7	小结	203
5.5	冻土流域径流碳氮输移过程	204
5.5.1	河流碳的基本概念	205
5.5.2	多年冻土区河流碳的研究进展	206
5.5.3	风火山流域河流溶解碳浓度特征	207
5.5.4	风火山流域河流溶解碳输出通量特征	209
5.5.5	风火山流域河流碳输出的影响因素	210
5.5.6	冻融过程对河流溶解碳输出的影响	212
5.5.7	风火山流域河流碳输出与陆地生态系统气态碳输出的比较	214
5.5.8	风火山流域河流溶解氮输出特征及影响因素	216
	参考文献	219
<b>第6章</b>	<b>寒区坡面产汇流过程的生态作用</b>	<b>224</b>
6.1	不同高寒草地的植被截留	224
6.1.1	实验方法	225
6.1.2	降水截留观测结果	226
6.1.3	典型高寒草地植被截留模式	228
6.2	坡面降水产流过程的植被和温度效应	230
6.2.1	观测研究方法	230
6.2.2	寒区坡面产流过程及其对植被覆盖变化的响应	232
6.2.3	温度与植被变化对冻土区坡面产流过程的协同影响	234
6.3	不同植被盖度的坡面产流及其季节动态	236
6.3.1	坡面产流的季节动态及其对植被盖度变化的响应	236
6.3.2	高寒草地坡面壤中流动态及其与植被覆盖的关系	238
6.4	寒区坡面产流模式	239
6.4.1	坡面产流模式概述	239
6.4.2	寒区坡面产流模式与形成机制	240
	参考文献	244
<b>第7章</b>	<b>寒区流域径流过程与土壤冻融循环</b>	<b>246</b>
7.1	寒区流域降水径流的基本特征	246
7.1.1	多年冻土区小流域降水径流特征	246
7.1.2	寒区大流域尺度的降水径流特征	248
7.2	土壤冻融过程与径流动态的关系	250
7.2.1	活动层土壤融化及冻结过程与河流径流的关系	250
7.2.2	径流变化的冻融深度阈值分析	252
7.2.3	夏季径流过程及其影响因素	254
7.3	温度变源产流机制与模式	255
7.3.1	引言	255



7.3.2	研究方法	256
7.3.3	集水单元小流域尺度的温度变源模式	259
7.3.4	基于流域水文过程尺度效应的温度变源模式	262
7.4	寒区径流组分与季节动态变化	265
7.4.1	基于退水过程曲线的径流组分分析	265
7.4.2	基于同位素的冻土流域河水组成及其季节变化	266
7.5	近50年来寒区径流变化趋势及其成因分析	270
7.5.1	寒区主要河流径流变化的基本特征	270
7.5.2	寒区径流变化的冻土因素分析	277
7.5.3	寒区径流变化的气候与其他因素分析	280
	参考文献	282
<b>第8章</b>	<b>寒区水循环过程模拟</b>	<b>284</b>
8.1	寒区水循环过程模型研究进展	284
8.1.1	寒区水文过程模型发展	284
8.1.2	寒区陆面过程模型发展	286
8.2	分布式寒区流域径流过程模型进展	288
8.2.1	基于MMS框架改进的流域分布式降水-径流模型	288
8.2.2	基于模块化建模方法的寒区水文过程模拟	292
8.2.3	基于GEOtop模型的多年冻土区流域能水平衡过程模拟	299
8.3	基于陆面过程模型的土壤水热动态模拟	308
8.3.1	基于CoupModel的高寒土壤热运移过程模拟	308
8.3.2	积雪和土壤有机质含量对土壤热状态的影响模拟	311
8.3.3	基于陆面过程模型与包气带水分运移的耦合模拟	313
	参考文献	318
<b>第9章</b>	<b>寒区生态水文学理论发展的问题与展望</b>	<b>321</b>
9.1	寒区生态水文学面临的主要挑战和问题	321
9.1.1	寒区水循环与陆面过程	321
9.1.2	寒区流域径流形成与演化过程	325
9.1.3	寒区地下水运动过程与动力学机理	327
9.1.4	寒区冻融作用下的生态系统水碳氮耦合循环过程与机理	328
9.1.5	寒区土壤侵蚀与冻融地质灾害形成过程与机理	331
9.2	寒区生态水文学未来发展的主要方向	332
9.2.1	寒区生态系统对变化环境响应的区域水文效应	332
9.2.2	冻土流域径流形成理论与流域生态水文模型	334
9.2.3	寒区陆-气-水耦合与区域生态水文过程对变化环境的响应模拟	335
9.2.4	变化环境下寒区流域水循环关键伴生过程、反馈影响与模拟	336
9.2.5	寒区植被-土壤-冻土界面水碳氮耦合循环过程	338