
丛书序一

青藏高原是地球上最年轻、海拔最高、面积最大的高原，西起帕米尔高原和兴都库什、东到横断山脉，北起昆仑山和祁连山、南至喜马拉雅山区，高原面海拔 4500 米上下，是地球上最独特的地质—地理单元，是开展地球演化、圈层相互作用及人地关系研究的天然实验室。

鉴于青藏高原区位的特殊性和重要性，新中国成立以来，在我国重大科技规划中，青藏高原持续被列为重点关注区域。《1956—1967 年科学技术发展远景规划》《1963—1972 年科学技术发展规划》《1978—1985 年全国科学技术发展规划纲要》等规划中都列入针对青藏高原的相关任务。1971 年，周恩来总理主持召开全国科学技术工作会议，制订了基础研究八年科技发展规划（1972—1980 年），青藏高原科学考察是五个核心内容之一，从而拉开了第一次大规模青藏高原综合科学考察研究的序幕。经过近 20 年的不懈努力，第一次青藏综合科考全面完成了 250 多万平方千米的考察，产出了近 100 部专著和论文集，成果荣获了 1987 年国家自然科学奖一等奖，在推动区域经济建设和社会发展、巩固国防边防和国家西部大开发战略的实施中发挥了不可替代的作用。

自第一次青藏综合科考开展以来的近 50 年，青藏高原自然与社会环境发生了重大变化，气候变暖幅度是同期全球平均值的两倍，青藏高原生态环境和水循环格局发生了显著变化，如冰川退缩、冻土退化、冰湖溃决、冰崩、草地退化、泥石流频发，严重影响了人类生存环境和经济社会的发展。青藏高原还是“一带一路”环境变化的核心驱动区，将对“一带一路”20 多个共建国家和 30 多亿人口的生存与发展带来影响。

2017 年 8 月 19 日，第二次青藏高原综合科学考察研究启动，习近平总书记发来贺信，指出“青藏高原是世界屋脊、亚洲水塔，是地球第三极，是我国重要的生态安全屏障、战略资源储备基地，



是中华民族特色文化的重要保护地”，要求第二次青藏高原综合科学考察研究要“聚焦水、生态、人类活动，着力解决青藏高原资源环境承载力、灾害风险、绿色发展途径等方面的问题，为守护好世界上最后一方净土、建设美丽的青藏高原作出新贡献，让青藏高原各族群众生活更加幸福安康”。习近平总书记的贺信传达了党中央对青藏高原可持续发展和建设国家生态保护屏障的战略方针。

第二次青藏综合科考将围绕青藏高原地球系统变化及其影响这一关键科学问题，开展西风—季风协同作用及其影响、亚洲水塔动态变化与影响、生态系统与生态安全、生态安全屏障功能与优化体系、生物多样性保护与可持续利用、人类活动与生存环境安全、高原生长与演化、资源能源现状与远景评估、地质环境与灾害、区域绿色发展途径等 10 大科学问题的研究，以服务国家战略需求和区域可持续发展。

“第二次青藏高原综合科学考察研究丛书”将系统展示科考成果，从多角度综合反映过去 50 年来青藏高原环境变化的过程、机制及其对人类社会的影响。相信第二次青藏综合科考将继续发扬老一辈科学家艰苦奋斗、团结奋进、勇攀高峰的精神，不忘初心，砥砺前行，为守护好世界上最后一方净土、建设美丽的青藏高原作出新的更大贡献！

孙鸿烈

第一次青藏科考队队长

丛书序二

青藏高原及其周边山地作为地球第三极矗立在北半球，同南极和北极一样既是全球变化的发动机，又是全球变化的放大器。2000年前人们就认识到青藏高原北缘昆仑山的重要性，公元18世纪人们就发现珠穆朗玛峰的存在，19世纪以来，人们对青藏高原的科考水平不断从一个高度推向另一个高度。随着人类远足能力的不断加强，逐梦三极的科考日益频繁。虽然青藏高原科考长期以来一直在通过不同的方式在不同的地区进行着，但对于整个青藏高原的综合科考迄今只有两次。第一次是20世纪70年代开始的第一次青藏科考。这次科考在地学与生物学等科学领域取得了一系列重大成果，奠定了青藏高原科学研究的基础，为推动社会发展、国防安全和西部大开发提供了重要科学依据。第二次是刚刚开始的第二次青藏科考。第二次青藏科考最初是从区域发展和国家需求层面提出来的，后来成为科学家的共同行动。中国科学院的A类先导专项率先支持启动了第二次青藏科考。刚刚启动的国家专项支持，使得第二次青藏科考有了广度和深度的提升。

习近平总书记高度关怀第二次青藏科考，在2017年8月19日第二次青藏科考启动之际，专门给科考队发来贺信，作出重要指示，以高屋建瓴的战略胸怀和俯瞰全球的国际视野，深刻阐述了青藏高原环境变化研究的重要性，希望第二次青藏科考队聚焦水、生态、人类活动，揭示青藏高原环境变化机理，为生态屏障优化和亚洲水塔安全、美丽青藏高原建设作出贡献。殷切期望广大科考人员发扬老一辈科学家艰苦奋斗、团结奋进、勇攀高峰的精神，为守护好世界上最后一方净土顽强拼搏。这充分体现了习近平生态文明思想和绿色发展理念，是第二次青藏科考的基本遵循。

第二次青藏科考的目标是阐明过去环境变化规律，预估未来变化与影响，服务区域经济社会高质量发展，引领国际青藏高原研究，促进全球生态环境保护。为此，第二次青藏科考组织了10大任务和



60多个专题,在亚洲水塔区、喜马拉雅区、横断山高山峡谷区、祁连山—阿尔金区、天山—帕米尔区等5大综合考察研究区的19个关键区,开展综合科学考察研究,强化野外观测研究体系布局、科考数据集成、新技术融合和灾害预警体系建设,产出科学考察研究报告、国际科学前沿文章、服务国家需求评估和咨询报告、科学传播产品四大体系的科考成果。

两次青藏综合科考有其相同的地方。表现在两次科考都具有学科齐全的特点,两次科考都有全国不同部门科学家广泛参与,两次科考都是国家专项支持。两次青藏综合科考也有其不同的地方。第一,两次科考的目标不一样:第一次科考是以科学发现为目标;第二次科考是以摸清变化和影响为目标。第二,两次科考的基础不一样:第一次青藏科考时青藏高原交通整体落后、技术手段普遍缺乏;第二次青藏科考时青藏高原交通四通八达,新技术、新手段、新方法日新月异。第三,两次科考的理念不一样:第一次科考的理念是不同学科考察研究的平行推进;第二次科考的理念是实现多学科交叉与融合和地球系统多圈层作用考察研究新突破。

“第二次青藏高原综合科学考察研究丛书”是第二次青藏科考成果四大产出体系的重要组成部分,是系统阐述青藏高原环境变化过程与机理、评估环境变化影响、提出科学应对方案的综合文库。希望丛书的出版能全方位展示青藏高原科学考察研究的新成果和地球系统科学研究的新进展,能为推动青藏高原环境保护和可持续发展、推进国家生态文明建设、促进全球生态环境保护做出应有的贡献。

姚檀栋

第二次青藏科考队队长

前言

“亚洲水塔”是西风和季风交互作用最显著的地区。气候变化引起的青藏高原动态变化是能量与水量耦合的地球系统多圈层综合演变过程。近年来，在全球气候变化和人类活动的双重影响下，青藏高原及周边区域冰川退缩、冻土退化，造成区域水资源和生态环境显著变化，同时也对我国乃至南亚、东南亚及中亚等国家水资源安全产生重要影响。青藏高原也正在经历逐渐变暖和变湿，大量的雨量计、站点观测数据和研究表明青藏高原的降水、湖泊面积和水位呈现出逐渐增加和上升的趋势。因此，准确地认识青藏高原地区能量和水循环系统的时空分布和变化特征是认清亚洲水塔变化的成因和主控因素的核心问题之一，同时进一步支撑着国家对水资源合理分配、区域可持续发展等重要决策的制定。

然而，青藏高原具有复杂的地形、环境和大气情况多变的特征，使得实地考察能量循环、水循环和水量平衡的时空分布及变化特征，观测水分相变、储存、转换过程具有极大的挑战；复杂地形加剧了能量和水循环要素在山区与地形平坦区的时空分布异质性，导致了有限的地面观测站网难以覆盖和全面刻画高原全域复杂地表上水量平衡的时空分布和变化特征；当前粗分辨率（几十千米）的大气模式和再分析数据无法反映复杂地形影响和局地对流云生成过程，在局地水循环研究中具有重大缺陷。同时，这种粗分辨率再分析数据驱动下的陆面过程、水文和生态模型也不能有效地体现地表的非均一性对地-气交互作用和水量平衡的影响；国际上已有用不同卫星针对能量-水循环不同要素的全球反演产品，但均未考虑山区地形对反演不同要素的影响，很难形成对青藏高原区域能量-水循环系统特征及变化的分析能力，以及对模型的验证改进能力。

在第二次青藏高原综合科学考察（简称青藏高原二次科考）研究专项支持下，项目组开展了“亚洲水塔区水循环动态监测与模拟”



专题研究,通过发展适应青藏高原特殊条件下的能量和水循环系统的时空分布和变化特征的卫星组网观测方法、超分辨率的大气-陆面模型,以及多圈层水文模型的模拟能力,评估其水量平衡的时空分布和变化特征,揭示青藏高原变化的成因和主控因素。针对该目标,项目组采用观测和模型这两大研究工具有机结合的方式,提升区域高时空分辨率的能量-水循环观测和模拟能力,提高对能量和水分相变、传输、储存过程的时空分布和变化特征的认识。卫星遥感作为获取青藏高原观测资料的重要途径之一,能够为大气-陆面模型、多圈层水文模型的评估和改进以及亚洲水塔变化成因分析提供关键支撑。因此,针对青藏高原的特点以及复杂地形的影响,开展反演理论和方法研究,形成能量和水循环系统的观测能力是本书涉及的主要内容。

本书由施建成和胡斯勒图负责总体框架设计,参与科考工作的一线科研人员共同完成各章节内容,姬大彬完成统稿,各章节内容简介如下。

第1章为概述,介绍了青藏高原的环境和气候特点,总结了本书所聚焦的青藏高原能量和水循环方面的科学问题和国家重大需求,分析了能量和水循环关键参数卫星遥感反演现状及发展趋势,阐述了本书研究内容的必要性以及科学意义。主要由施建成、姬大彬完成。

第2章针对当前云卫星遥感领域中的关键问题,基于静止卫星观测数据,提出了云量、云顶高度和云分类遥感探测新算法,结合研制的新遥感产品,分析了高原地区云特征时空变化特征。主要由胡斯勒图、尚华哲、旭日、包芳玲、王宇彤、汤臣乾、伟乐斯等完成。

第3章介绍精确估算亚洲水塔区的地表下行辐射的算法,并基于辐射产品分析其时空分布特征。研究结果将为全球变暖背景下深入理解气候变化与地球能量循环提供参考。主要由王天星、胡斯勒图、杜艺涵、马润、冼宇阳、王高峰、余沛以及王硕等完成。

第4章介绍了基于分类逐步回归法的微波地表温度反演经验算法和热红外地表温度与微波地表温度融合算法、热红外地表温度与再分析地表温度的融合算法,并基于生产的数据集分析了青藏高原地表温度的时空分布特征和变化趋势。主要由程洁、刘伟汉、吴晨泽完成。

第5章介绍了一种耦合地形因子的多源遥感数据协同反演 BRDF/ 反照率模型,利用极轨和静止卫星数据生产了高精度 BRDF 和反照率数据集,分析了青藏高原地区的地表反照率的时空分布特征和变化趋势。主要由游冬琴、闻建光、唐勇、韩源、林兴稳完成。

第6章介绍了亚洲水塔区大气水汽总量产品反演算法、精度评估以及青藏高原地区大气水汽总量的时空分布特征和变化趋势等内容。主要由姬大彬、王永前、李薇、

张红星、孙启翔、杨春洁、赛罕娜、刘璇和冯玉琦等完成。

第7章介绍了基于辐射模型的多通道协同反演算法和人工智能反演算法,开展了亚洲水塔区高精度长时序的土壤水分产品生产及评估,分析了亚洲水塔区土壤水分的时空分布特征和变化趋势。主要由赵天杰、郭鹏、姚盼盼、彭志晴、白瑜等完成。

第8章介绍了适用于青藏高原地区的冻融判识算法,并制作了高质量长时序冻融状态数据集,分析了整个青藏高原地区的冻融状态时空变化趋势,为亚洲水塔区水循环动态变化研究提供了支撑。主要由赵天杰、寇晓康、张子谦、冯得封等完成。

第9章介绍了积雪覆盖度、积雪深度和雪水当量反演相关模型和算法以及积雪时空分布特征和变化趋势等方面内容,分析了青藏高原地区近20~40年来的积雪变化特征及影响。主要由蒋玲梅、熊川、潘金梅、李广、潘方博、郑一非完成。

第10章介绍了青藏高原地区湖泊水体面积和水位提取算法、产品精度评估以及水体的时空分布特征和变化趋势。主要由计璐艳、柳彩霞、袁翠完成。

第11章针对传统遥感手段观测陆地水储量变化的不足,基于卫星重力观测,计算并分析了青藏高原地区整体及不同流域水储量变化的趋势。主要由冯伟、熊宇昊、白鸿炳、黄俊完成。

第12章介绍了基于卫星遥感观测开展的青藏高原蒸散发估算方法、产品精度评估以及青藏高原蒸散发及其组分的空间分异特征和长期变化趋势。主要由郑超磊、贾立、张选泽、胡光成等完成。

第13章阐述了基于水量平衡方程来计算 $P-ET$ (降水量与蒸散发量的差值)的方法,开展了精度评估、时空分布特性以及变化趋势研究,分析了 $P-ET$ 与陆地可获取淡水资源变化之间的关系。主要由雷永荟和李睿完成。

本书是第二次青藏高原综合科学考察研究任务二“亚洲水塔动态变化与影响”专题6“亚洲水塔区水循环动态监测与模拟”遥感科考团队的协同攻关的成果,同时也得到国家自然科学基金(批准号42025504)的支持。感谢每一位科研人员辛苦付出,他们在野外科考工作中展现了不怕苦、不怕累的坚韧精神。本专题的顺利执行以及本书的圆满出版离不开第二次青藏科考项目管理办公室在项目执行上的缜密组织与协调,在科考过程中也得到了西藏、青海沿途各地科技、水利、气象以及林草等各职能部门工作人员的大力支持。对上述相关单位和工作人员致以衷心的感谢!

鉴于作者水平有限,疏漏难免,不妥之处恳请读者批评指正。

《亚洲水塔区能量和水循环关键参数的卫星遥感研究》

编写委员会

2025年10月

摘要

在全球变暖背景下，以青藏高原为核心的亚洲水塔区呈现变暖变湿的趋势，地表能量和水分交换发生变化，水相态转化加速，对地区和周边国家近 20 亿人的生存和社会经济发展产生了重要影响。准确认识亚洲水塔区的能量平衡和水循环关键参数的时空分布及变化特征具有重要意义。然而，亚洲水塔区具有复杂的地形、环境和大气情况多变的特征，使得实地考察和有限的地面观测站网难以覆盖和全面刻画高原能量循环、水循环和水量平衡的时空分布及变化特征；国际上已有不同卫星针对能量－水循环不同要素的全球反演产品，但很少专门考虑亚洲水塔区特殊环境的影响，很难形成对亚洲水塔区区域能量－水循环系统特征及变化的分析能力。

本书聚焦亚洲水塔区能量平衡和水循环关键要素系统性观测需求，充分利用国内外已有卫星观测数据，开发了云、辐射、地表温度、地表发射率、地表反照率、大气水汽总量、土壤水分、近地表冻融、积雪、水体动态变化、陆地水储量、蒸散发以及 $P-ET$ 等多种能量平衡和水循环关键要素的遥感反演方法或估算方法，初步形成了用于亚洲水塔区的能量平衡与水循环关键要素卫星组网观测系统，形成能量和水循环系统的观测能力，系统性研制了 13 类高质量能量平衡和水循环关键参数遥感数据集，支撑了大气－陆面和多圈层水文模型的改进，并基于该数据集分析了亚洲水塔区能量和水循环关键参数的时空分布特征和变化趋势，发现近 20 年来青藏高原地区云量变化呈现微弱的降低趋势，但不显著；长波下行辐射、大气水汽、土壤水分、水体面积、蒸散发呈现升高趋势，而近地表冻融面积、积雪覆盖、雪深和雪水当量呈现出降低的趋势，这与该地区地表温度总体的升高趋势具有较好的关联性，总体呈现出变暖变湿的趋势。



全球气候变化和人类活动双重影响使得亚洲水塔区的水资源和生态环境发生了显著变化，同时也对我国乃至南亚、东南亚及中亚等国家水资源安全产生重要影响。亚洲水塔区能量平衡和水循环关键参数遥感数据集的生产，有助于支撑该地区的大气—陆面和多圈层水文模型的改进，对于准确认识亚洲水塔区能量和水循环系统的时空分布和变化特征以及研究亚洲水塔变化成因分析具有重要的意义，可以有效地支撑国家对水资源合理分配、区域可持续发展等重要决策的制定。

目 录

第 1 章 概述.....	1
1.1 研究背景	2
1.2 国内外研究现状	2
1.3 小结	8
参考文献	8
第 2 章 亚洲水塔区云的遥感观测与时空分布特征.....	11
2.1 引言	12
2.2 云遥感产品算法	13
2.2.1 遥感数据简介	13
2.2.2 基于静止卫星日均云量对极轨卫星长时间日均云量的校正方法研究	16
2.2.3 云顶高度反演技术介绍	20
2.2.4 云分类算法介绍	21
2.2.5 对流云识别算法	24
2.3 云遥感产品验证	26
2.3.1 基于静止卫星日均云量对极轨卫星长时间日均云量的验证	26
2.3.2 云顶高度验证	30
2.3.3 云分类验证	33
2.3.4 对流云识别算法验证	35
2.4 时空变化分析	37
2.4.1 青藏高原云量的日变化和季节变化特征	37
2.4.2 云类型分析	38
2.4.3 对流云时空变化分析	40



2.5 小结	44
参考文献	45
第3章 亚洲水塔区地表下行辐射的遥感观测与时空分布特征	49
3.1 引言	50
3.2 地表下行长短波辐射反演算法	51
3.2.1 短波辐射相关云参数算法	51
3.2.2 地表下行短波辐射算法	53
3.2.3 地表下行长波辐射反演算法	61
3.3 地表下行长短波辐射产品研发与精度评估	66
3.3.1 云参数与短波辐射产品研发及验证	66
3.3.2 青藏高原山区辐射校正与精度验证	69
3.3.3 长波辐射产品研发与精度验证	73
3.4 地表下行长短波辐射时空分布特征与变化趋势	75
3.4.1 短波辐射时空变化	75
3.4.2 山区辐射效应时空变化	77
3.4.3 长波辐射时空变化	82
3.4.4 长短波辐射多分量时序变化分析	85
3.5 小结	86
参考文献	87
第4章 亚洲水塔区地表温度与地表发射率的遥感观测与时空分布特征	93
4.1 引言	94
4.2 地表温度产品算法	95
4.2.1 ELITE 1 km 空间无缝地表温度产品算法	95
4.2.2 ELITE 2 km 空间无缝地表温度产品算法	97
4.3 地表温度精度评估	100
4.3.1 ELITE 1 km 空间无缝地表温度精度评估	100
4.3.2 ELITE 2 km 空间无缝地表温度精度评估	103
4.4 地表温度的时空分布特征和变化趋势	105
4.4.1 青藏高原地表温度空间分布特征和时间变化趋势分析	105

4.4.2 青藏高原流域地表温度空间分布特征和时间变化趋势分析	108
4.5 地表发射率产品算法	110
4.5.1 ELITE 1 km 空间无缝地表发射率产品算法	110
4.5.2 ELITE 3 km 空间无缝地表发射率产品算法	112
4.6 地表发射率精度评估	112
4.6.1 敏感性分析	112
4.6.2 地面验证	113
4.7 地表发射率的时空分布特征和变化趋势	113
4.7.1 青藏高原地表发射率空间分布特征和时间变化趋势分析	113
4.7.2 青藏高原流域地表发射率空间分布特征和时间变化趋势分析	115
4.8 小结	116
参考文献	118
第 5 章 亚洲水塔区地表反照率遥感观测与时空分布特征	123
5.1 引言	124
5.2 地表反照率算法	125
5.2.1 理论基础	125
5.2.2 耦合地形的多源协同反演算法 EMCBI	130
5.3 地表反照率产品精度评估	137
5.3.1 产品数据集	137
5.3.2 相对验证比较	138
5.3.3 平坦区域非冰雪覆盖产品比较	142
5.3.4 平坦区冰雪区产品比较	144
5.3.5 山区产品比较	146
5.3.6 反照率日变化验证	148
5.3.7 与冰雪覆盖度产品的比较	149
5.4 地表反照率时空分布特征和变化趋势	150
5.4.1 研究区地表类型及地形	150
5.4.2 年际变异分析指标	151
5.4.3 反照率时空变化结果	152



5.5 小结	158
参考文献	159
第 6 章 亚洲水塔区大气水汽的遥感观测与时空分布特征	163
6.1 引言	164
6.2 大气水汽总量产品反演算法	165
6.2.1 陆地上空微波辐射计大气水汽总量反演算法	166
6.2.2 静止卫星红外遥感大气水汽产品算法	168
6.2.3 亚洲水塔区地基 GNSS 大气水汽总量产品算法	172
6.2.4 亚洲水塔区微波和红外大气水汽产品融合算法	175
6.2.5 亚洲水塔区高时空分辨率多源遥感大气水汽融合	179
6.2.6 亚洲水塔区长时间序列大气水汽总量产品	182
6.3 大气水汽总量产品精度评估	183
6.3.1 亚洲水塔区地基 GNSS 大气水汽产品精度评估	183
6.3.2 亚洲水塔区遥感大气水汽总量产品精度评估	185
6.3.3 亚洲水塔区多源遥感大气水汽总量融合数据精度评估	190
6.4 大气水汽时空分布特征和变化趋势	191
6.4.1 亚洲水塔区大气水汽总量数据的时空分布特征分析	191
6.4.2 亚洲水塔区大气水汽总量变化趋势分析	196
6.5 小结	198
参考文献	199
第 7 章 亚洲水塔区土壤水分遥感观测与时空分布特征	203
7.1 引言	204
7.2 被动微波亮温数据处理	205
7.2.1 亮温数据交叉定标	205
7.2.2 水体影响校正	208
7.2.3 地形影响校正	214
7.3 土壤水分被动微波反演算法	219
7.3.1 多通道协同反演算法	219
7.3.2 土壤水分反演算法参数标定	221

7.4 土壤水分产品精度评估与比较	223
7.5 土壤水分时空分布特征及变化趋势	227
7.5.1 研究数据介绍	228
7.5.2 研究方法	228
7.5.3 结果与讨论	229
7.6 小结	233
参考文献	234
第 8 章 亚洲水塔区近地表冻融遥感观测与时空分布特征	237
8.1 引言	238
8.2 近地表冻融状态监测算法	239
8.2.1 冻融判别物理基础	239
8.2.2 冻融判别指标	239
8.2.3 冻融判别公式	241
8.3 冻融状态产品精度评估	243
8.3.1 评估区域与数据	243
8.3.2 评估指标	248
8.3.3 评估结果	249
8.3.4 误差分析	252
8.4 近地表冻融过程时空分布特征和变化趋势	254
8.4.1 近地表冻融时空分布特征	254
8.4.2 近地表冻融过程时空变化趋势分析	254
8.5 小结	258
参考文献	259
第 9 章 亚洲水塔区积雪遥感观测与时空分布特征	263
9.1 引言	264
9.2 积雪遥感产品算法	265
9.2.1 积雪覆盖度产品算法	265
9.2.2 雪深 / 雪水当量产品算法	274
9.3 积雪产品精度评估	284



9.3.1 积雪覆盖度产品精度评估	284
9.3.2 雪深 / 雪水当量产品算法精度评估	293
9.4 积雪时空分布特征和变化趋势	297
9.4.1 青藏高原积雪面积时空特征	297
9.4.2 青藏高原积雪雪深 / 雪水当量时空特征	305
9.5 小结	315
参考文献	316
第 10 章 亚洲水塔区水体动态变化遥感观测与时空分布特征	321
10.1 引言	322
10.2 水体动态变化产品算法	322
10.2.1 高时空分辨率水体制图	322
10.2.2 湖泊水位提取	325
10.3 水体动态变化产品精度评估	328
10.3.1 评价指标	328
10.3.2 水体面积精度	328
10.3.3 湖泊水位精度	330
10.4 水体时空分布特征和变化趋势	331
10.4.1 水体面积及水位时空分布	331
10.4.2 典型水体时空变化分析	334
10.4.3 水体季节性变化特点	344
10.5 小结	346
参考文献	347
第 11 章 亚洲水塔区陆地水储量遥感观测与时空分布特征	351
11.1 引言	352
11.2 基于卫星重力水储量变化产品研制	353
11.2.1 基于 GRACE 和 GRACE-FO 的时变重力场反演	353
11.2.2 卫星重力反演陆地水储量变化数据后处理	355
11.2.3 基于卫星重力和降水资料重构的中国地区陆地水储量变化产品	360
11.3 亚洲水塔区域陆地水储量时空变化与趋势分析	363

11.3.1 陆地水储量变化时空特征分析	363
11.3.2 不同流域陆地水储量变化特征分析	365
11.3.3 百年尺度的陆地水储量变化时间序列	366
11.4 小结	367
参考文献	368
第 12 章 亚洲水塔区蒸散发估算与时空分布特征	371
12.1 引言	372
12.2 蒸散发产品算法	373
12.2.1 蒸散发遥感模型 ETMonitor	373
12.2.2 蒸散发遥感模型 PML-V2	381
12.3 蒸散发产品精度评估	386
12.3.1 验证方法和数据来源	386
12.3.2 验证精度	388
12.3.3 不同蒸散发产品对比	394
12.4 蒸散发时空分布特征和变化趋势	400
12.4.1 青藏高原蒸散发及分布格局	400
12.4.2 蒸散发变化趋势分析	402
12.5 小结	404
参考文献	405
第 13 章 亚洲水塔区 P-ET 估算与时空分布特征	411
13.1 引言	412
13.2 P -ET 产品算法	412
13.3 P -ET 产品精度评估	414
13.4 P -ET 时空分布特征和变化趋势	419
13.5 P -ET 与水资源变化	423
13.6 小结	426
参考文献	427
附录 亚洲水塔区水循环科考队考察日志	431



第1章

概 述

本章作者 施建成 姬大彬



1.1 研究背景

亚洲水塔区由面积约 10 万 km^2 的冰川、总面积超过 4.7 万 km^2 的 1200 多个湖泊、总径流量超过 4359 亿 m^3 的十多条大江大河的源头组成，它供给面积超过 1340 万 km^2 、影响 20 多亿人的水资源供给（ICIMOD, 2019; Yao et al., 2022; UNEP, 2016; Zhang, 2020）。它是全球高寒、干旱、高湿、巨灾等特征共存的特殊环境区，是地球上最强的两大环流——季风和西风碰撞（Yao et al., 2013; 黄凌昕等, 2023）并严重影响人类生存环境的区域。亚洲水塔区的能量和水循环系统时空分布特征直接决定了该地区的地表景观、不同生态系统和人类活动的格局。

在全球变化背景下，亚洲水塔区还是受气候变暖显著影响的区域，变暖幅度远大于除极地外的全球其他地区，因此也是未来全球气候变化影响不确定性最大的地区。该地区的能量和水循环系统的时空分布特征已经和正在发生重大变化，并直接导致了区域水资源的空间分布变化，进一步影响着西风和季风的强度和特征，乃至对区域气候系统产生重要的反馈作用，最终将影响该地区的地表景观、不同生态系统和人类活动格局的演变。这不仅关系到我国及东南亚、中亚等国家的水资源安全，还关系到这些国家的生态安全。深入研究该地区的能量、水循环过程变化规律对于认识该地区的水资源时空分布特征及其对周边各国的水资源供应影响具有深远意义。

习近平总书记在给第二次青藏高原综合科学考察研究队的贺信中指出：“青藏高原是世界屋脊、亚洲水塔，是地球第三极。揭示青藏高原环境变化机理，对推动青藏高原可持续发展、推进国家生态文明建设、促进全球生态环境保护将产生十分重要的影响”。气候变化引起的亚洲水塔区动态变化是能量与水量耦合的地球系统多圈层综合演变过程。近年来，在全球气候变化和人类活动双重影响下，亚洲水塔区及周边区域降水的增加和冰川退缩，造成区域水资源和生态安全的显著变化。亚洲水塔区也正在经历逐渐变暖和变湿，大量的雨量计、站点观测数据和研究表明青藏高原的降水、湖泊面积和水位呈现出逐渐增加和上升的趋势。那么，亚洲水塔区辐射能量和水循环系统发生着什么样的时空分布变化？内陆水循环过程对亚洲水塔区水量平衡的时空分布及变化特征的影响如何？亚洲水塔区降水逐渐增加的水汽来源是什么？亚洲水塔变化的成因和主控因素是什么？提高对这些科学问题的认识和研究水平将进一步支撑国家对水资源合理分配、区域社会可持续发展的重要决策。要实现亚洲水塔变化及水量平衡时空分布和变化特征科学规律认识上突破，实现国家重大需求问题的解决，核心是提高区域高时空分辨率的能量-水循环观测和模拟能力，并将观测和模型这两大研究工具有机结合起来，提高对能量和水分相变、传输、储存的时空分布和变化特征的认识。

1.2 国内外研究现状

亚洲水塔区具有复杂的地形、环境和大气状况多变的特征，模式模拟和观测是能

量和水循环研究的两种主要手段。在模式模拟方面,当前粗分辨率(几十千米)的大气模式和再分析数据无法反映复杂地形影响和局地对流云生成过程,在局地水循环研究中具有重大缺陷,如对亚洲水塔区次网格地形影响的考虑、翻越高山区水汽传输过程的模拟、云物理参数化的有效性及其相关参数的适应性问题。同时,这种粗分辨率再分析数据驱动下的陆面过程、水文和生态模型也不能有效地体现地表的非均一性对地-气交互作用和水量平衡的影响。作为另一种研究手段,精确的系统性观测提供了理解能量和水循环系统的基础,但如何提高观测能力获取更好的观测数据其本身就是一个巨大的挑战。要想解决对一系列有关全球变化背景下亚洲水塔区能量和水循环的响应与反馈相关的科学问题,必须首先解决能量和水循环关键要素的观测能力问题。地面观测是获取高精度数据的有效手段,但是由于地面观测设备在亚洲水塔区的维护成本高及其空间分布的有限性,通过地面观测能量循环、水循环和水量平衡的时空分布和变化特征以及水分相变、储存、转换过程具有极大的挑战。亚洲水塔区的复杂地形加剧了能量和水循环要素在山区与地形平坦区的时空分布异质性,导致了有限的地面观测站网难以覆盖和全面刻画高原全域水量平衡的时空分布和变化特征。因此,仅仅通过地面测量获取相关参数无法满足科学需求。

在能量和水循环的研究方面,由于卫星在大范围观测和成本上的优势,以及卫星观测技术的快速发展,卫星观测逐渐在能量和水循环研究中发挥重要作用。从1964年美国雨云(Nimbus)系列卫星运行开始,至今世界上具有航天能力的国家已经研制和发射了一系列的多种星载传感器,卫星对地观测已经具有在全球尺度上监测整个地球系统中许多要素的能力,显示了不同数据源的信息价值。当前和正在计划发展的国内外卫星传感器已经能够提供大量与能量和水循环相关的多种时间和空间分辨率的观测,包括:①美国、日本、巴西等国联合研制的Aqua卫星,搭载大气红外探测仪AIRS、先进微波探测仪AMSU-B、微波湿度计HSB、先进微波扫描辐射计AMSR-E、中分辨率成像光谱仪MODIS、云和地球辐射能量系统(谱仪)CERES等有效载荷,分别利用微波、毫米波、红外和可见光探测与成像手段对积雪、地表温度、土壤水分、大气湿度和温度、降水、云和蒸散等进行探测;②日本的全球变化-水为主题的卫星GCOM-W,搭载改进的先进微波扫描辐射计AMSR2对土壤水分、降水、积雪等进行探测;③美国、日本联合研制的热带降雨测量计划卫星TRMM和全球降水观测(GPM)卫星,搭载降水雷达PR/DPR和微波成像仪TMI/GMI对全球降水进行测量;④欧洲空间局研制的土壤水分和海洋盐度卫星SMOS利用L波段综合孔径微波辐射计对土壤水分和海面盐度进行测量;⑤美国 and 阿根廷联合研制的宝瓶座卫星Aquarius和美国的土壤水分主被动探测卫星SMAP,利用L波段辐射计和散射计及多波段微波辐射计对土壤水分和海面盐度进行测量;⑥美国的冰卫星ICESat和欧洲的冰卫星Cryosat分别利用激光雷达和微波雷达高度计对冰进行测量;⑦美国国家航空航天局和德国航空中心合作发射重力测量卫星GRACE,通过重力场测量获取地下水信息等;⑧美国国防部的国防气象卫星(DMSP),从1976年开始的第一颗卫星DMSP-F01开始到现在的DMSP-19通过搭载光学和微波载荷,实现了对地球系统的云、大气水汽、降水、洋面及陆表信息的长时序观测;⑨欧



洲的 Metop 系列极轨气象卫星，目前已经发射了 Metop-A、Metop-B 以及 Metop-C 三颗卫星，可为天气预报和气候与环境监测提供地球极地气象及空气湿度、气温、风速、风向、冰山融化、温室气体排放等相关数据。在国内，已经建成了风云系列和海洋系列等能量和水循环相关的卫星观测体系。从 1988 年我国第一颗气象卫星风云一号 A 星发射成功开始，先后发展了第一代风云一号和风云二号系列卫星以及第二代风云三号 and 风云四号系列卫星，目前已经形成包含上午星、下午星、晨昏星等极轨卫星以及倾斜轨道卫星和静止轨道卫星的卫星星座，显著提高了能量和水循环相关参数的时效性和精度。从 2002 年开始的第一颗海洋卫星 HY-1A 开始，经过了 20 多年的发展已经形成了包含海洋一号~三号等一系列卫星的卫星星座，实现了对海洋水色和海洋动力环境等数据的系统性观测。

综上，国内外已有不同卫星针对能量-水循环不同要素的全球反演产品，但均未考虑亚洲水塔区复杂的地形、地貌以及环境对反演不同要素的影响，而且由于极轨卫星观测的时间分辨率的影响（固定时间过境），除云、辐射以及降水等参数通过静止卫星或组建极轨卫星星座实现区域或全球的高时间分辨率的观测外，大部分能量和水循环关键参数仍然缺乏高时空分辨率的观测数据，很难捕捉到该地区能量、水循环系统剧烈的时空变化，很难形成对亚洲水塔区能量-水循环系统变化特征的分析能力，以及对模型的验证和改进能力，导致当前对亚洲水塔区的能量平衡、水循环过程的时空分布特征和趋势这一基础问题的认识仍然存在很大的不确定性，无法满足对亚洲水塔区及其影响地区的水资源、生态环境、灾害风险和社会可持续发展能力的评估等国家重大需求。因此，需要借助卫星遥感在观测方面的优势，开展亚洲水塔区的能量和水循环关键参数的观测及数据集构建。当前能量和水循环各个关键参数的卫星遥感在亚洲水塔区存在的主要问题如下。

云特性对于亚洲水塔区及其周边地区的辐射和降水具有重要影响。在青藏高原这一地基观测稀疏且探测难度较大的区域，卫星遥感观测成为研究云特性的重要手段。目前云特性遥感产品主要存在以下问题：①青藏高原云类型识别存在误判。传统基于云顶气压进行分类的卫星云遥感产品（如国际卫星云气候计划 ISCCP）在青藏高原地区常常低估低云量，将低云误分类为中层云或高云，从而影响云辐射效应和降水估计。②对青藏高原辐射平衡和水循环过程的准确描述要求更高时空分辨率和更高精度的云特性产品。极轨传感器（如 MODIS）在描述云的昼夜变化时存在局限性，这增加了云参数日均值反演的难度。同时，云参数（如云顶高度）的反演精度受到纬度、昼夜、季节以及卫星天顶角等因素的影响。因此，改进云卫星遥感产品的时空精度和验证方法，对于深入研究青藏高原的能量循环和水循环具有重要意义。

辐射平衡是分析亚洲水塔区气候变化以及水循环过程的关键变量。遥感技术具有覆盖范围广、时空连续等特点，能够覆盖地面难以测量的无人区，是研究亚洲水塔区辐射平衡最有效的手段之一。随着遥感技术的发展，遥感观测平台和载荷都有了长足进步，多源静止卫星和极轨卫星的协同观测为亚洲水塔区辐射产品研发提供了广泛的数据支撑（Letu et al., 2022）。然而，由于亚洲水塔地区海拔高、地形复杂、天气多变，

导致该区域高质量、高时空分辨率的长波和短波辐射产品仍十分匮乏且精度亟待提升,难以满足高寒、地形复杂地区的水文、气候、生态等研究需求。此外,该区域地面观测资料有限,也为遥感算法研发和验证等带来很大困难。目前,亚洲水塔区长短波辐射研究仍以瞬时、像素尺度的辐射为主,但不同研究对多时空尺度辐射量的估算提出了更加迫切的需求,而且现有研究几乎都假设地表水平,忽略地形效应,难以保障山区辐射的可靠性(Wang T et al., 2018),亟须发展考虑地形效应的高精度、多时空尺度连续、长短波辐射分量齐全的遥感反演算法和产品。

地表温度/发射率是气候变化研究的重要参数,驱动了地表-大气热交换过程。亚洲水塔区的地表温度/发射率空间差异巨大,且存在巨大的季节温差,经常受到如大雨、干旱和暴风雪等极端气象事件的影响,开展亚洲水塔区的地表温度/发射率长时间序列遥感监测具有重要意义。通用的热红外遥感卫星,发布了覆盖亚洲水塔区、广泛使用的各类晴空地表温度/发射率产品,但全天候/空间无缝地表温度产品依然较为稀少。地表宽波段发射率罕见,导致陆面模式仍然采用简单的参数化方案来表征。从反演层面,当前地表温度与发射率反演方法基于平面像元假设,没有考虑地形以及像元非均质、非均温的影响;产品层面,亚洲水塔区的特殊环境导致地面观测数据不足,地表温度和发射率没有得到综合全面的评估。为此,亟须加强遥感反演基础理论研究,发展考虑像元异质性、地形等的模型与参量反演算法,加强地面观测台站建设,充分评估亚洲水塔区的地表温度与发射率产品。

地表反照率是地表能量特性的关键指标。它对地表能量平衡、中长期天气预测和全球变化研究具有深远影响(Dickinson, 1995; Liang, 2003; de Souza et al., 2006)。尽管遥感技术在获取地表BRDF/反照率算法和产品方面已日趋成熟,如MODIS v6和GLASS反照率产品被广泛应用于地表监测(Liu et al., 2013),但在亚洲水塔区这一特殊区域仍然面临重大挑战。首先,由于亚洲水塔区复杂的地形,传统针对平坦地表的模型算法在该区域应用时误差较大。山地的遮蔽和阴影效应使辐射传输过程复杂化,忽略地形因素会导致反照率估算的误差高达0.28(85%的相对误差)。其次,亚洲水塔区独特的气候条件导致光学遥感数据受云雨天气影响较大,时空连续性差,且当前产品16天合成BRDF难以准确捕捉地表的快速变化。现有的卫星产品在该区域的晴空观测频率较低,特别是在东南部地区,频繁的云覆盖使观测数据缺乏,影响反照率产品的时空连续性。因此,亟须发展新的遥感算法考虑地形因素的影响,协同多源遥感数据缩短BRDF合成周期,以提高亚洲水塔区反照率估算的精度和时空连续性。

大气水汽是能量平衡和水循环过程研究的纽带参数之一。准确获取大气水汽分布数据,对于研究亚洲水塔区的水循环过程具有重要意义。再分析和遥感大气水汽数据是开展亚洲水塔区水循环研究的重要数据源。再分析大气水汽数据具有较高的精度,但是空间分辨率较粗,在地形和地貌复杂的地区,很难实现对空间细节的捕捉。卫星遥感是获取高时空分辨率大气水汽的主要方式,但在亚洲水塔区仍面临一些问题,主要表现在:①亚洲水塔区复杂的地表条件及高地表发射率严重影响了星载微波辐射计的



反演精度，且微波辐射计水汽产品空间分辨率较粗，无法实现对水汽空间变化细节的捕捉。②高时空分辨率的静止卫星仅能获取晴空条件下的大气水汽数据，无法获取有云条件的大气水汽分布数据。因此，充分构建适用于亚洲水塔区的微波辐射计反演算法，并充分发挥微波遥感全天候的优势以及静止卫星高分辨率的优势，构建多源遥感大气水汽总量数据融合算法，获取高时空分辨率的大气水汽产品对于研究亚洲水塔区的能量平衡或水循环过程具有重要意义。

地表土壤水分是地球环境和气候系统中的重要变量之一，被认定为基本气候变量。土壤水分的精确监测且连续一致的长时间序列产品对于理解青藏高原上陆-气之间能量和水分交换过程以及区域气候演变至关重要。星载微波载荷是反演土壤水分的最佳仪器，当前已有 SMAP (soil moisture active passive, 土壤湿度主被动) 和 SMOS (soil moisture ocean salinity, 土壤湿度与海洋盐度) 等专门用于土壤水分高精度反演的卫星，同时 AMSR-E (advanced microwave scanning radiometer) 和 AMSR2 系列传感器及我国风云三号系列卫星搭载的微波辐射成像仪 MWRI (microwave radiation imager) 同样能够提供土壤水分观测资料。然而，现有的多种土壤水分卫星产品存在精度和时空覆盖范围不一致等问题，并且尚未有产品考虑了动态水体、复杂地形等青藏高原特殊的自然地理环境，不能满足水资源动态变化分析的具体应用需求。为满足亚洲水塔区的土壤水分时空分布特征和变化趋势分析，有必要对不同卫星载荷之间的卫星亮温数据进行一致性校正处理，开展水体和地形影响校正，发展基于辐射模型的多通道协同反演算法和人工智能反演算法，构建亚洲水塔区高精度长时序的土壤水分产品。

地表冻融状态是亚洲水塔区水循环基本要素之一，对于该地区的气候变化具有重要的指示作用。地表冻融状态的监测精度受到土壤质地、地形、气候类型和积雪覆盖等诸多因素的影响，亚洲水塔区复杂的地形、地貌特征严重影响了传统冻融判别式算法在该区域的分类精度。此外，冻融状态数据集受微波辐射计探测能力限制，空间分辨率普遍偏低，无法满足亚洲水塔区的冻融监测需求，因此急需发展适用于亚洲水塔区的冻融判识算法，并制作高质量长时序冻融状态数据集，分析整个青藏高原地区的冻融状态时空变化趋势，为亚洲水塔区水循环动态变化研究提供支撑。

积雪是地球冬季陆表覆盖的重要组成部分，极大地影响着地表与大气间的能量、水分交换过程。在气候变化的背景下，亚洲水塔积雪已突破临界点达到失衡状态 (Yao et al., 2022; Liu et al., 2023)，加强对其监测具有十分重要的意义。当前，针对亚洲水塔积雪特性已开发了多种积雪判识和积雪覆盖度反演算法，并发布了多种相关产品。受限于亚洲水塔区域受云影响严重、积雪时变性强的特点，这些产品多为二值判识结果，分辨率较粗且时空不连续 (Pan et al., 2024)。同时，亚洲水塔地区不同来源的雪深和雪水当量产品之间差异巨大 (Liu et al., 2022)。亚洲水塔区的地形复杂，要求表达雪深空间分布异质性的尺度较细。受限于亚洲水塔地区薄雪、斑块状积雪、湿雪以及厚雪同时出现的情况，目前尚不存在单一的遥感观测技术手段可以适用于所有以上情况。因此，亟须发展能够提高空间分辨率、基于一定稳健的物理机理，并且能够整合各种

遥感观测手段的积雪参数反演算法, 生成长时间序列产品。

蒸散发是水分从液态转化为气态的过程, 是亚洲水塔区土壤-植被-大气系统中水和热通量的重要协变量。开发高质量的蒸散发产品对于揭示亚洲水塔区不同空间尺度蒸散发的分异特征及变化规律, 理解亚洲水塔区的水循环对全球变化的响应和反馈等具有重要的理论和实践意义。遥感观测可提供与地表水热交换过程相关的土壤特征、植被动态和大气变量等各类信息, 这使得基于能量平衡法或组合方程开展空间连续大尺度地表蒸散估算成为重要手段 (Chen and Liu, 2020)。然而, 由于亚洲水塔区局地气候和生态系统的不同, 基于不同的理论和技术的蒸散发估算方法生产的蒸散发数据集存在差异 (Chen et al., 2021; Cui et al., 2020; Ma and Zhang, 2022; Miralles et al., 2020)。因此, 迫切需要充分考虑各种影响因素, 提高亚洲水塔区的蒸散发估算精度, 为其时空变化格局研究提供支撑。

陆表水体是水循环、能量平衡的基本参数之一。近年来, 由于全球气候变化, 加之人类活动影响, 青藏高原及周边区域冰川、冻土退化, 以青藏高原为核心的“亚洲水塔”区域呈现变暖、变湿的趋势, 导致青藏高原水体 (尤其是湖泊) 分布、面积均发生变化。因此, 有必要对青藏高原地区进行长时间跨度的水体制图。另外, 青藏高原水体高度动态, 主要体现在: ①因降水、蒸发等引起的水体季节性扩张和萎缩; ②因气温变化导致的水面结冰、融冰。因此, 有必要对青藏高原开展长时间、高频次动态水体监测。目前, 包含青藏高原的长时间水体制图产品以公开的卫星数据 Landsat 和 MODIS 为主, 其时间和空间分辨率受制于所使用的卫星遥感数据。其中, 以 Landsat 为主的产品虽然空间分辨率较高 (30 m), 但时间分辨率较低, 大部分是以年计, 最短的是逐月; 而当前以 MODIS 为主的产品时间分辨率较高, 如 8 天、逐日, 但对应的空间分辨率分别为 250 m、500 m。因此, 如何利用现有公开卫星数据进行青藏高原高时空制图, 以研究其水体时空分布特点及规律是当前国内外的研究热点。

陆地水储量是反映亚洲水塔区水资源量变化的重要指标。在全球变暖的背景下, 青藏高原冰川退缩、永久冻土退化以及湖泊水位变化, 其陆地水储量因此呈现出显著的变化 (Meng et al., 2019)。近 20 年的重力卫星数据显示, 青藏高原不同区域的陆地水储量变化显示出较强的时空异质性, 中部和北部地区的水储量明显增加, 而南部和西北部则表现出显著的下降趋势 (Xiang et al., 2016; Deng et al., 2018)。受全球气候变化的持续威胁, 预计在 21 世纪中叶青藏高原陆地水储量净损失将达到 230 Gt (1 Gt = 10^9 t; Li et al., 2022)。青藏高原水资源的短缺, 将进一步加剧亚洲水塔区域的生态脆弱性。研究青藏高原陆地水储量的变化趋势及其对区域和全球水资源的影响, 对区域生态环境保护与社会经济发展具有重要的参考意义。

综上, 针对亚洲水塔区复杂环境特点, 充分利用国内外已有卫星组网观测及不同波段优势, 改进和发展适用于亚洲水塔区的能量和水循环关键要素的卫星反演方法和技术, 形成能量和水循环要素的系统观测能力, 产生当前同类产品中高精度、长时间序列卫星观测数据集, 对于研究亚洲水塔区能量和水循环关键要素的时空分布和变化特征具有重要意义。



1.3 小结

亚洲水塔区对周边国家和地区具有重要的影响,深入研究该地区的能量、水循环过程的时空分布特征、变化规律和发展趋势对于认识该地区的水资源时空分布特征及其对周边各国的水资源供应影响具有深远意义。

模拟和观测是地球系统科学研究的两种主要的工具。作为重要的观测手段,卫星遥感提供了可靠、系统性的观测数据。新的遥感载荷和观测技术的发展,为构建适用于亚洲水塔区的能量和水循环关键参数打下了良好的基础,但是当前众多的能量和水循环关键参数卫星遥感算法并不完全适用于亚洲水塔区复杂的地形和环境,而且大部分能量和水循环关键参数仍然缺乏高时空分辨率的观测数据,很难捕捉到该地区能量、水循环系统剧烈的时空变化,形成对亚洲水塔区能量-水循环系统特征及变化的分析能力。因此,本书以卫星遥感为主要观测手段,针对亚洲水塔区复杂地形对能量和水循环要素反演的影响,利用国内外已有卫星组网观测及不同波段优势,改进和发展各要素的卫星反演方法和技术,形成亚洲水塔区域能量平衡(6种)与水循环(8种)关键要素卫星组网观测系统(包括云、辐射、反照率、大气水汽、土壤水分、土壤冻融、雪盖与雪深、陆地及地下水储量变化等),形成能量和水循环要素的系统观测能力,产生当前同类产品中高精度、长时间序列卫星观测数据集。

参考文献

- 黄凌昕, 陈婕, 阳坤, 等. 2023. 现代青藏高原亚洲夏季风气候北界及其西风区和季风区划分. *SCIENTIA SINICA Terrae*, 53(4): 866-878.
- Chen J M, Liu J. 2020. Evolution of evapotranspiration models using thermal and shortwave remote sensing data. *Remote Sens Environ*, 237: 111594.
- Chen J, Tan H, Ji Y, et al. 2021. Evapotranspiration components dynamic of highland barley using PML ET product in Tibet. *Remote Sens*, 13: 4884.
- Cui J, Tian L, Wei Z, et al. 2020. Quantifying the Controls on Evapotranspiration Partitioning in the Highest Alpine Meadow Ecosystem. *Water Resour Res*, 56. <https://doi.org/10.1029/2019WR024815>.
- de Souza R B, Mata M M, Garcia C A E, et al. 2006. Multi-sensor satellite and in situ measurements of a warm core ocean eddy south of the Brazil-Malvinas Confluence region. *Remote Sens Environ*, 100(1): 52-66.
- Deng H, Pepin N C, Liu Q, et al. 2018. Understanding the spatial differences in terrestrial water storage variations in the Tibetan Plateau from 2002 to 2016. *Climatic Change*, 151: 379-393.
- Dickinson R E. 1995. Land processes in climate models. *Remote Sens Environ*, 51(1): 27-38.
- Hao D, Wang T, Gao Z, et al. 2018. Quantifying the terrain effects on surface albedo in mountainous areas. *J Geophys Res: Atmos*, 123(18): 10328-10345.
- Hu G, Jia L. 2015. Monitoring of evapotranspiration in a semi-arid inland river basin by combining microwave and optical remote sensing observations. *Remote Sens*, 7(3): 3056-3087.

- ICIMOD. 2019. The Hindu Kush Himalaya Assessment: Mountains, Climate Change, Sustainability and People. Berlin: Springer.
- Letu H, Nakajima T Y, Wang T, et al. 2022. A new benchmark for surface radiation products over the East Asia-Pacific region retrieved from the Himawari-8/AHI next-generation geostationary satellite. *Bull Am Meteorol Soc*, 103: E873-E888.
- Li X, Long D, Scanlon B R, et al. 2022. Climate change threatens terrestrial water storage over the Tibetan Plateau. *Nat Clim Change*, 12: 801-807.
- Liang S. 2003. A direct algorithm for estimating land surface broadband albedos from MODIS imagery. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens*, 41(1): 136-145.
- Liu Q, Wang L, Qu Y, et al. 2013. Preliminary evaluation of the long-term GLASS albedo product. *Int. J. Digit Earth*, 6(sup1): 69-95.
- Liu T, Chen D, Yang L, et al. 2023. Teleconnections among tipping elements in the Earth system. *Nat Clim Change*, 13(1): 67-74. DOI:10.1038/s41558-022-01558-4.
- Liu Y, Fang Y, Li D, et al. 2022. How well do global snow products characterize snow storage in High Mountain Asia? *Geophys. Res Lett*, 49(16): e2022GL100082.
- Ma N, Zhang Y. 2022. Increasing Tibetan Plateau terrestrial evapotranspiration primarily driven by precipitation. *Agric For Meteorol*, 317: 108887.
- Meng F, Su F, Li Y, et al. 2019. Changes in Terrestrial Water Storage During 2003—2014 and Possible Causes in Tibetan Plateau. *J. Geophys Res: Atmos*, 124: 2909-2931.
- Miralles D G, Brutsaert W, Dolman A J, et al. 2020. On the use of the term “Evapotranspiration”. *Water Resour Res*, 56(11): e2020WR028055.
- Pan F, Jiang L, Wang G, et al. 2024. MODIS daily cloud-gap-filled fractional snow cover dataset of the Asian Water Tower region (2000—2022). *Earth Syst Sci Data*, 16: 2501-2523.
- United Nations Environment Programme (UNEP). 2016. A Snapshot of the World’s Water Quality: Towards a Global Assessment.
- Wang T, Yan G, Mu X, et al. 2018. Toward operational shortwave radiation modeling and retrieval over rugged terrain. *Remote Sens Environ*, 205: 419-433.
- Wang Z, Schaaf C B, Sun Q, et al. 2018. Capturing rapid land surface dynamics with Collection V006 MODIS BRDF/NBAR/Albedo (MCD43) products. *Remote Sens Environ*, 207: 50-64.
- Xiang L, Wang H, Steffen H, et al. 2016. Groundwater storage changes in the Tibetan Plateau and adjacent areas revealed from GRACE satellite gravity data. *Earth Planet. Sci Lett*, 449: 228-239.
- Yao T, Masson - Delmotte V, Gao J, et al. 2013. A review of climatic controls on $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation over the Tibetan Plateau: Observations and simulations. *Rev Geophys*, 51: 525-548.
- Yao T, Bolch T, Chen D, et al. 2022. The imbalance of the Asian water tower. *Nat Rev Earth Environ*, 3(10): 618-632.
- Zhang G. 2020. Regional differences of lake evolution across the Tibetan Plateau. *Earth-Sci Rev*, 212: 103456.

