

## 编者按：

山地环境是人类认知自然的发展过程中最受关注的对象之一，因此，在数千年的人类社会发展历程中，对于山地环境的探索从未间断。早在 2000 - 1000 年前，人们就对山地环境的分布格局、变迁及其灾害与水资源等方面的影响有较深入的认识。以 20 世纪 60 年代中国科学院在成都成立以山地为主要研究对象的专门研究机构为表征，我国山地环境研究的系统性、量化及其与其他学科的关联性等方面开启了一个全新的局面。伴随全球变化的影响不断深入，在 20 世纪 90 年代开始，国际上对于山地环境的关注不断加强，在 20 世纪 90 年代 10 年时间里，相继在《21 世纪议程》中专列山地环境与发展内容后，推出“国际山地年”，接着 90 年代末期由四大国际环境研究计划（IGBP、IHDP 和 GTOS）联合推出专门的“山地环境研究计划”等，将山地环境研究推向了一个前所未有的高度，极大地促进了山地环境研究的高速发展。包括山地气候、山地生态、山地水文与水资源、山地土地资源与利用等主题在内的现代山地表生过程与人-地关系的研究不断深化。从 20 世纪 90 年代以来，包括我国在内，国际上对于山地环境的研究有一个共同的特点：不仅始终把山地环境变化的长期监测研究列为首要发展方向，而且坚持生态学的主体地位。

1987 年中国科学院正式建立“中国生态系统研究网络（CERN）”，1988 年开始在全国组建不同区域和不同类型生态系统的长期定位观测与试验，目的是全面认识在全球变化和人类活动共同驱动下的生态系统结构、格局、过程与功能的变化规律，探讨生态系统保育的调控与管理途径，为我国的生态安全保障、生态系统管理、生产力提升以及应对全球变化的生态环境保护等提供可靠的动态监测数据、丰富的科学知识和适用的技术措施与模式等。这一时期建立的贡嘎山高山生态系统观测试验站，就是布局在西南山区，以横断山典型高山深谷山地生态系统为对象的长期定位观测研究站，在 1999 年正式被纳入 CERN 网络，2001 年进入国家重点野外观测站序列。贡嘎山站建立于贡嘎山东坡的海螺沟流域内，这里不仅自然生态系统类型多样、且原生性保存较为完整，具有横断山区主要生态系统类型与分布格局的显著代表性。经过近 30 年的发展，贡嘎山站逐渐形成了以山地垂直自然带不同生态系统结构、格局、过程与功能长期观测研究为特色，围绕高山典型生态系统对气候变化的响应与适应、变化环境下高山植被原生演替过程与模拟、高山生态系统生物地球化学循环、海洋性冰川动态与山地气候变化以及山地资源开发利用与保护等 5 个学科方向，组建了多学科交叉、兼顾数据积累与科学研究和生产实践相结合的一支高素质科研队伍，取得了一系列重要成果。本专辑荟萃了近期在上述 5 个领域取得的部分研究成果，不是对已有全部科研进展的总结，仅仅是在部分科学问题上一些新认识的展示。其目的是从一个侧面反映贡嘎山站在 30 年发展历程中的科研领域布局与创新研究路径，以期为深入了解山地生态与环境科学发展动向提供一些参考。

《山地学报》编辑部

中国科学院贡嘎山高山生态系统观测试验站

2017 年 10 月

文章编号: 1008 - 2786 - (2017)5 - 605 - 17

DOI: 10. 16089/j. cnki. 1008 - 2786. 000259

# 全球变化下的山地表生环境过程: 认知与挑战

## ——中国科学院贡嘎山高山生态系统 观测试验站建站 30 周年回顾与展望

王根绪, 程根伟, 刘 巧, 孙守琴, 冉 飞

(中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都, 640041)

**摘 要:** 立足山地表生环境长期定位观测, 明确山地表生环境变化过程与机理、掌握山地生态系统响应变化环境的演化规律、探索应对全球变化的山区经济社会发展模式, 维系着国家发展战略目标的实现。从高山典型生态系统对气候变化的响应与适应、变化环境下高山植被原生演替过程与模拟、高山生态系统生物地球化学循环、海洋性冰川动态与山地气候变化以及山地资源开发利用与保护等方面, 系统总结了贡嘎山高山生态观测试验站过去 30 年取得的重要科学进展, 归纳了在山地表生环境过程理论与实践方面取得创新突破。围绕贡嘎山站在山地生态和环境变化观测试验体系建设中存在的不足, 以及面临的重要前沿科学领域的挑战和国家发展需求, 提出了未来进一步发展的 5 个重要方向: 构建和发展综合观测网络、深化高山生态系统垂直带谱分异与重建机制的研究、拓展高低纬度典型山地生态系统变化的比较研究、发展山地生态过程模型以及探索山区生态经济可持续发展模式。

**关键词:** 贡嘎山站; 山地表生环境过程; 进展与成就; 未来展望

**中图分类号:** S718. 5

**文献标志码:** C

山地因其丰富的能源、矿产资源与巨大的生态系统服务功能, 在人类社会生存与发展中具有重要作用<sup>[1, 2, 3]</sup>。世界山地绝大部分分布在欧亚大陆, 其中我国国土面积的将近 70% 是山地。因此, 山地对于亚洲、特别是我国的经济社会发展中占据极其重要位置。在我国山地分布中, 包括喜马拉雅山系、横断山系等青藏高原周边山系不仅集中了世界上面积最大和海拔最高的山地系统, 并构成我国地貌第一阶梯及其和第二阶梯过渡带, 而且是亚洲“水塔”和世界范围内最为重要的生物多样性热点区域之一, 也是我国最为重要的生态安全战略屏障和水资源安全保障的战略基地。

正是由于横断山区对于生态学、环境学、地质学、水文学、冰冻圈科学等诸多学科蕴含巨大研究价值, 对于我国乃至全球生物多样性保护、以及我国水

资源和能源可持续利用和生态屏障建设等具有重要战略意义, 在 20 世纪 80 年代中期, 以孙鸿烈院士领衔的一些著名科学家就着眼布局我国青藏高原东南缘山地科学综合观测研究; 经过反复论证, 最终在 1987 年选择横断山最高峰的贡嘎山东坡海螺沟, 建立了中国科学院高山生态系统观测试验站(简称贡嘎山站)。经过建站初期多方努力, 在 1992 年进入中国生态研究网络, 2001 年 12 月被科技部列为国家重点野外科学观测试验站, 站名为四川贡嘎山森林生态系统国家野外科学观测研究站。贡嘎山站的战略定位是立足贡嘎山, 面向青藏高原东缘(横断山区)的生态安全和可持续发展、长江上游生态环境保护与建设等国家需求, 以高山多层次自然生态系统及与人类活动的相互作用为主要研究对象, 多学科综合研究高山生态系统的演化与环境影响、气

**收稿日期** (Received date): 2017 - 09 - 06; **改回日期** (Accepted date): 2017 - 09 - 26

**基金项目** (Foundation item): 中国科学院前沿科学重点研究项目 (QYZDJ - SSW - DQC006) [the key research projects of frontier sciences (CASQYZDJ - SSW - DQC006)]

**作者简介** (Biography): 王根绪 (1965 - ), 男, 甘肃天水人, 博士, 主要研究方向: 生态水文学 [Wang Genxu (1965 - ), male, born in Tianshui, Gansu province, Ph. D., specialized in Ecohydrology] E-mail: wanggx@imde. ac. cn

候变化与山地冰川消长对高山生态系统的作用,以及监测山地环境动态、预测区域环境演变趋势,为合理利用山地资源、保护山地生态环境、推进山区发展、保护长江上游环境,以及探索全球气候变化的区域响应等,提供重要科学依据与系统性数据支撑。

贡嘎山站从建站以来,其主要学科方向就设定为四个方面:变化环境下山地不同植被带生态系统的响应与适应,山地生态系统物质循环过程、机制与模拟,山地环境演化与影响,以及山地资源开发利用与保护等。经过 30 年几代人坚持不懈的努力工作,贡嘎山站围绕山地表生过程与环境变化这一主题,在上述四个学科领域取得了多方面丰富成果和创新进展,本文对这些学科领域的进展进行简要归纳,总结已取得的认知,阐释面临的挑战,展望未来发展趋势。

## 1 高山典型生态系统对气候变化的响应与适应

高山带生态系统对气候变化具有高度敏感性,是国际全球变化研究的热点,在过去 20 多年间,高山带和高寒带陆地生态系统响应气候变化的成果成为全球变化研究最具影响力的领域。贡嘎山站利用其独特条件,开展了针对高山带高寒草甸和暗针叶林为主要对象的观测试验研究,取得了一些显著进展。

### 1.1 气候变化对高寒草甸生态系统的影响

以青藏高原高寒草甸小嵩草和高寒沼泽藏嵩草为主要研究对象,采用开顶式增温室(OTCs)模拟气候变暖,探讨了气候变暖对高寒草甸生态系统的影响。研究发现:增温显著的增加了小嵩草和藏嵩草

的叶片长度,并导致小嵩草叶片数量和根系活跃吸收面积显著升高,表明高寒草甸优势物种叶片形态特征可随气候变化而改变<sup>[4]</sup>,其原因可能是适当增温可改善土壤中植物可吸收的养分状况,提高高寒地区植物的光合速率。高寒草甸物种丰富度在增温初期变化较大,在增温后期保持相对稳定,总体而言,模拟增温降低了高寒草甸群落物种丰富度和 Shannon-Wiener 指数,其形成机理可能是增温通过改变土壤水分,间接影响物种丰富度和植物功能群的相对丰富度<sup>[4]</sup>。此外,长期模拟增温还改变了不同植物功能群的生物量和群落结构:优势物种(禾本科)以增加生物量的方式对温度升高做出响应,增加对其他植物功能群的竞争效应,从而降低群落生物量中莎草科、杂类草功能群生物量所占的比例,但就整个植物群落而言,长期增温提高了群落生物量,包括地上和地下生物量同步增加,并形成明显的碳汇增大效应<sup>[5]</sup>。证明增温对植物群落结构和生物量的影响与植物群落组成的功能特征及相对丰富度、群落盖度及竞争能力,以及资源可用性等有关。同时还发现高寒草甸优势物种(小嵩草)通过增加非结构性碳水化合物和游离脯氨酸积累而适应增温胁迫<sup>[6]</sup>。

就整个青藏高原而言,高寒草地生态系统植被地上净初级生产力(ANPP)随着降雨量的增加递增,降雨量而不是温度是驱动该区域 ANPP 变化的主要驱动力(图 1)。多年冻土区的存在与否影响着增温对 ANPP 的变化方向,即增温增加了多年冻土区 ANPP,降低了非多年冻土区的 ANPP。增温对物种多样性的影响受年均温的驱动,即年均温越低的样地,物种多样性丧失约剧烈;增温降低了多年冻

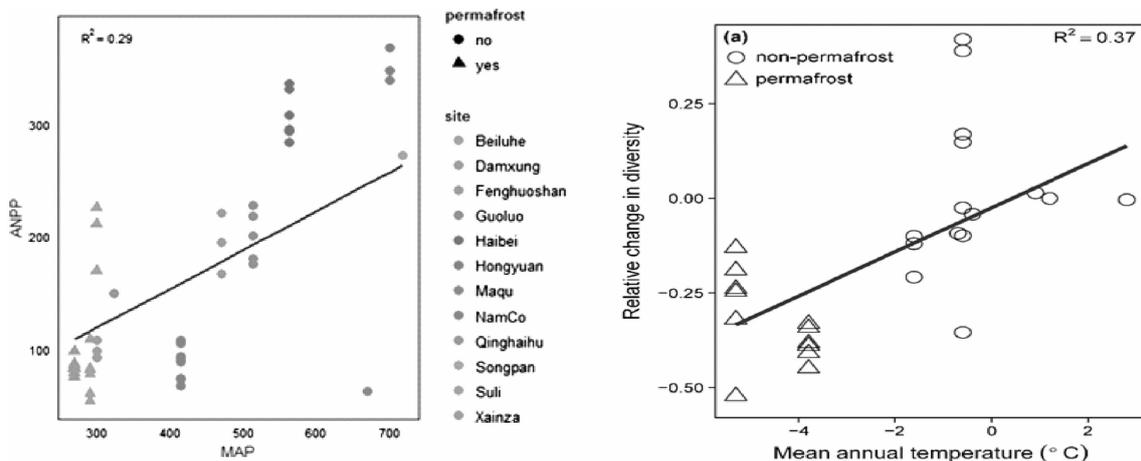


图 1 年降水量和年均温对增温情景下净初级生产力(ANPP)和物种多样性变化的影响

Fig. 1 Effects of annual precipitation and average air temperature on above net primary productivity (ANPP) and biodiversity in a global warming scenario

土区和非冻土区的物种多样性,但是多年冻土区物种丧失受温度升高影响更剧烈。增温促进植被高度增加,且多年冻土区的增加趋势更明显。总之,气候温暖化促使高寒草甸生态系统生产力增加、物种多样性减少、群落结构改变;土壤水分是决定变化幅度和方向的主要因素。

## 1.2 亚高山针叶林早期更新对气候变化的响应

森林的早期更新是气候变化的陆地生态系统响应研究的重要领域<sup>[7]</sup>。贡嘎山站长期以来以亚高山暗针叶林(峨眉冷杉)的早期更新为研究内容,在种子雨、土壤种子库、幼苗生长及其对气候变化的响应方面做了大量工作,初步阐明了贡嘎山东坡不同林龄和海拔峨眉冷杉(*Abies fabri*)林的种子雨和土壤种子库的时空分布特征,揭示了峨眉冷杉叶片功能特征与生长的关系及其对外部环境改变的生理生态学适应策略,为西南山区代表性针叶林更新对气候变化响应研究提供了理论依据。研究表明,贡嘎山东坡峨眉冷杉林土壤种子库主要集中在凋落物层,且其在土壤中的分布随土壤深度增加而减少;在同一海拔梯度,土壤种子库和种子雨随着林龄增加呈现先增加后减少的趋势,在成熟林达到最大值,且其种子质量最好;在成熟林阶段,海拔分布上下界限的峨眉冷杉林土壤种子库和种子雨显著小于海拔分布中段的峨眉冷杉林,这可能与海拔引起的水热条件差异有关;峨眉冷杉林的最佳结实阶段在成熟林,其种子质量好,且散布后在林下保存得最好<sup>[8]</sup>。

杨燕和羊留冬等人以暗针叶林群落关键物种峨眉冷杉为研究对象,采用红外辐射加热器模拟环境温度增加,雨水传感器控制遮雨大棚控制水分条件,人工喷施含氮的营养液模拟大气氮沉降的方式,研究增温、土壤干旱和氮沉降以及三因素交互试验对幼苗生长的影响,揭示了气候变化对物种早期更新阶段的影响机制,研究结果表明:降雨量减少对峨眉冷杉幼苗的形态和生物量均显示出负面效应,如降低高度、基径、总生物量、叶面积和比叶重;氮添加却显示出强烈的正效应。而降雨量减少和氮添加二因素交互作用于峨眉冷杉幼苗时,氮添加缓解降雨量减少对冷杉生长的抑制效应。在降雨量减少背景下施氮提高了峨眉冷杉幼苗的抗逆能力,促进了P的利用效率,改变养分分配格局,对幼苗生长于总生物量累积有正效应。表明适量氮添加可在一定程度上提高幼苗的抗旱能力。单独的降雨量减少和增温处理,以及二者的联合均降低了峨眉冷杉的生长和生

物量积累;同时,单独的降雨量减少和增温处理并没有对峨眉冷杉叶片细胞膜造成明显伤害。然而,二因子交互作用却引起了严重的膜伤害,显示出增温加剧了干旱对植物生长的抑制作用<sup>[6,9]</sup>。冉飞等人采用交互移栽的方式也发现气候变暖促进了高海拔地区峨眉冷杉幼苗的生长和生物量积累,但可能对低海拔地区冷杉幼苗的生长和生物量积累产生不利影响<sup>[10]</sup>。

## 1.3 高山苔藓的结构与功能变化

苔藓是贡嘎山暗针叶林带十分重要的地被物组分和森林生态系统组成部分。贡嘎山东坡海拔1640~3650 m范围类藓类植物有40科144属359种,占四川省藓类植物总科数的68%,总属数的49%,总种数的32%。在苔藓优势科中,既有典型的北方常见科,如曲尾藓科、紫萁藓科;也有如真藓科、提灯藓科这些世界广布的种类;同时还有在热带地区常见的蔓藓科种类的出现,说明了贡嘎山藓类植物区系成分从温带向热带的过渡性特点。耐旱的紫萁藓科、丛藓科、真藓科,以及水湿生境中极为典型的柳叶藓科种类的出现,更充分地体现了贡嘎山区藓类植物生境的多样性与复杂性<sup>[11]</sup>。

海拔导致水热条件及其组合在空间上的分布,并时常伴随着温度、降水、光照、土壤等多种因子的改变,显著影响着苔藓群落的分布与结构及物种多样性的变化。随海拔的增加,贡嘎山东坡海螺沟地面苔藓盖度逐渐增加;苔藓厚度和生物量随海拔的增加呈单峰分布,最大值在海拔3750 m左右的高山灌丛带。在海拔2001 m到2784 m的常绿-落叶阔叶林和针阔混交林带,地面苔藓群落盖度很低(17.38%),生物量低于 $50 \text{ g m}^{-2}$ 。在海拔2964 m到3987 m的暗针叶林和高山灌丛,地面苔藓植物盖度在85%以上,成为该植被带被最主要的地被植物<sup>[12]</sup>。凋落物厚度、气温、相对湿度和降水是影响苔藓植物分布的主要因素,其中,空气温度、空气湿度和降水对苔藓植物分布的巨大影响可能与苔藓植物的变水性质有关,而凋落物厚度的影响则主要通过凋落物渗滤液的影响来实现。地面苔藓植物生物量与苔藓层厚度苔藓层盖度呈指数相关关系,与苔藓层厚度呈线性相关关系。

通过影响土壤理化和生物环境,苔藓植物的大量存在能够间接影响土壤呼吸及整个生态系统碳循环过程。研究发现去除地面苔藓后,亚高山针叶林和亚高山灌丛地表 $\text{CO}_2$ 排放速率分别下降了44.4%和34.2%,土壤 $\text{CO}_2$ 排放速率分别下降了

39.3%和30.3%。然而地面苔藓对土壤和地表CO<sub>2</sub>排放速率的影响并不是通过对土壤温湿度的作用来实现,而是通过对土壤有机碳和微生物群落结构和活性的调控来实现的。该研究证实了苔藓植物对亚高山生态系统地表和土壤CO<sub>2</sub>排放的调控作用及潜在途径,其成果有利于促进对亚高山生态系统碳循环过程的认识以及碳循环模型的改进<sup>[13]</sup>。

然而,随着气候变化特别是温度和氮沉降的改变,苔藓植物的群落结构将发生巨大变化。孙守琴等<sup>[14]</sup>研究表明,无论是增温还是氮沉降增加均将导致苔藓群落总盖度降低。而且不同物种对温度和氮沉降增加的响应存在差异:侧蒴类苔藓如赤茎藓对N沉降增加的响应更为敏感,而顶蒴类苔藓如毛灯

藓何东亚砂藓对增温的响应更为敏感<sup>[14]</sup>。苔藓群落和物种水平上的这种变化将进一步导致生态系统土壤碳转化等过程的改变。

### 1.4 林线形成机制与动态

林线位置变化作为林线响应气候变化的重要指标,是高山生态系统响应气候变化研究的热点。西南高山林线位置受到多种气候要素综合作用的影响,导致往往林线位置树种密度的变化比起林线位置变化更加容易监测,也更能反映较短时期(30~50年)气候变化对林线的影响。通过对贡嘎山雅家梗阴坡和阳坡6个样方调查表明,过去100多年期间,峨眉冷杉林线树种种群密度显著增大,但林线位置变化不明显(图3)。气候变暖背景下,贡嘎山和

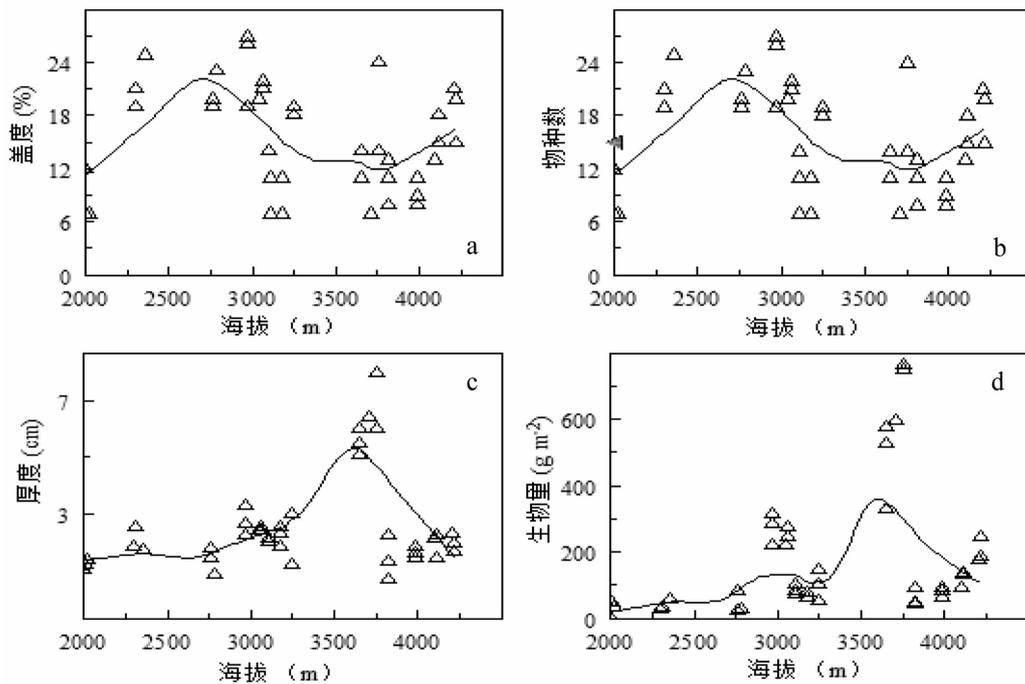


图2 贡嘎山地面苔藓植物沿海拔的分布特征

Fig. 2 Distribution characteristics of terrestrial bryophytes along the altitudinal gradient of Gongga Mountain

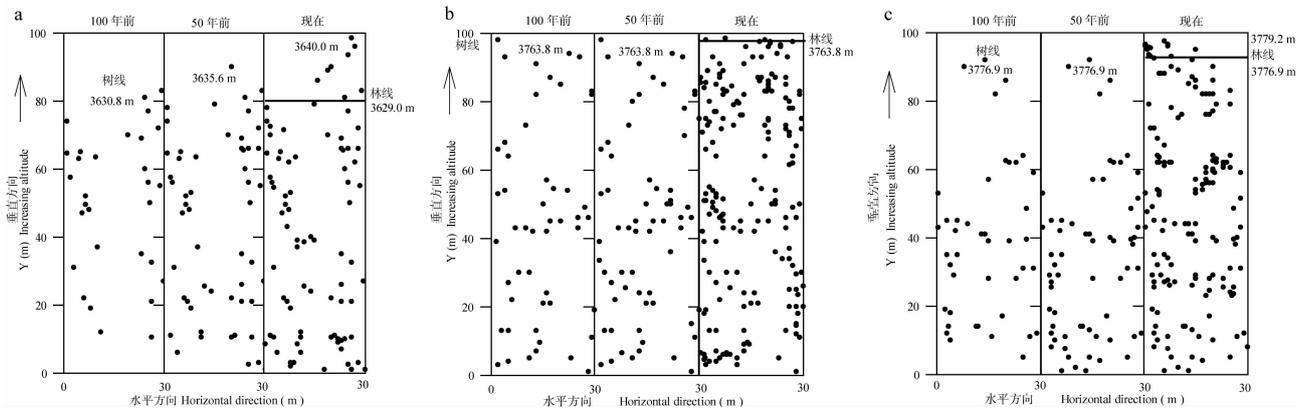


图3 贡嘎山林线冷杉种群密度的时空动态

Fig. 3 Spatial-temporal dynamics of *Abies fabri* population near the treeline

藏东南色季拉山林线种群密度变化较为一致,种群密度增加这一现象在西南高山林线较为普遍<sup>[15]</sup>。

树木年轮因其定年准确、分辨率高、分布广泛等优点,成为研究林线动态的有效手段。树轮宽度可直接反映树木径向生长速率。西南高山林线一般降水充足,低温成为限制林线树种径向生长的最主要气候因子。气候变暖可缓解低温对于树木生长的限制,因此升温将加速林线树木个体径向生长。在贡嘎山峨嵋冷杉林带由上限到下限每隔 200 米海拔高度建立 5 个样方 (GGS1, 3600m; GGS2, 3300 m; GGS3, 3100 m; GGS4, 2900 m; GGS5, 2700 m), 建立不同海拔梯度峨嵋冷杉径向生长时间序列, 分析峨嵋冷杉径向生长响应气候变化。研究结果表明, 在海拔 3100 m、3300 m 和 3600 m 的三个高海拔样点, 峨嵋冷杉径向生长在过去的三十年期间呈加速生长趋势, 而海拔 2900 m 和 2700 m 的两个低海拔样点, 峨嵋冷杉径向生长在过去三十年期间生长存在下降趋势 (图 4)。通过不同海拔峨嵋冷杉径向生长与气候要素响应分析, 发现生长季期间的温度与高海拔树木生长存在显著正相关关系, 与低海拔树木生长存在显著负相关关系; 而且随着温度升高, 生长季温度与不同海拔树木生长的关系增强<sup>[16]</sup>。由此说明: 气候变暖促进了高海拔地区树木生长, 但是抑制了低海拔地区树木生长, 使得山地森林带谱具有向高海拔地带迁移的趋势。

逾百年来寻找高山林线成因的研究, 提出了热量 (温度) 控制假说、环境胁迫假说、干扰假说、繁殖更新障碍假说、碳限制假说 (carbon limitation) 和生长限制假说 (growth limitation) 六种假说, 其中只有碳限制假说和生长限制假说两种假说与林线树种的生物生理学 (biophysiology) 相关, 可能解释全球或极地林线形成的生理 (或功能) 机制。贡嘎山站研究人员基于 2 个针叶林线树种 - 峨眉冷杉、川西云杉

(*Picea balfouriana*) 和一个阔叶林线树种-川滇高山栎为对象, 通过测定不同海拔、不同组织、不同季节非结构性碳水化合物 (NSC) 含量, 以及针叶氮含量, 分析了贡嘎山地区高山林线树种碳-源和碳-汇关系。该研究综合 3 个林线结果表明, 对于康定河流域和海螺沟两个研究区域的川西云杉和峨眉冷杉两个林线树种, 生长在林线的树种冬季 NSC 浓度显著低于生长在低海拔的同树种树木, 林线树木可能遭受冬季碳限制。无论在 4 月还是在 7 月, 林线树木碳源组织 NSC 浓度均显著低于较低海拔树木, 但对于碳汇组织没有显著差异<sup>[17, 18]</sup>。同样地, 发现生长海拔上限的川滇高山栎干和根系在冬季 (而不是在生长季) 遭受到显著的 NSC 不足<sup>[19]</sup>, 因此, 冬季碳限制可能是由于林线树木冬季碳源活性受限而导致的。

## 2 变化环境下高山植被原生演替过程与模拟

海螺沟冰川属于季风海洋性冰川, 水热条件好, 冰川消融速度快, 自小冰期以来开始退缩, 没有冰进过程, 形成了一个完整的从裸地到先锋群落再到顶级群落的连续植被原生演替序列, 近百年来土壤为连续成土过程。在近 130 年来, 海螺沟冰川退缩区域形成的连续演替进程, 可以划分为 6 个阶段, 如图 5 所示。海螺沟冰川退缩迹地植被演替即是典型的原生演替, 与原生水生演替与旱生演替相比存在显著差异<sup>[20]</sup>, 成为研究植被原生演替过程理论的理想场所。近年来, 随着学科发展, 对海螺沟冰川退缩迹地的生态环境演化研究逐渐侧重于对生态系统包括土壤的演化过程和机理的分析, 取得了以下几方面的重要进展。

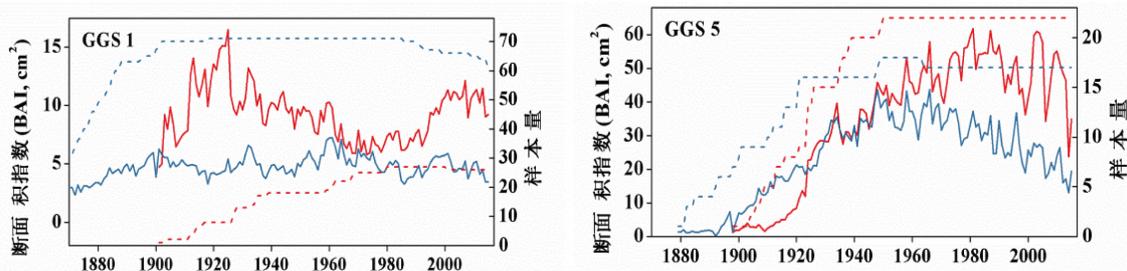


图 4 贡嘎山不同海拔冷杉生长率变化 (GGS1 海拔 3600 m, GGS5 海拔 2700 m)

Fig. 4 Variations in the growth rates of *Abies fabri* along the altitudinal gradient in Gongga mountain (GGS1, 3600 m a. s. l.; GGS5, 2700 m a. s. l.)

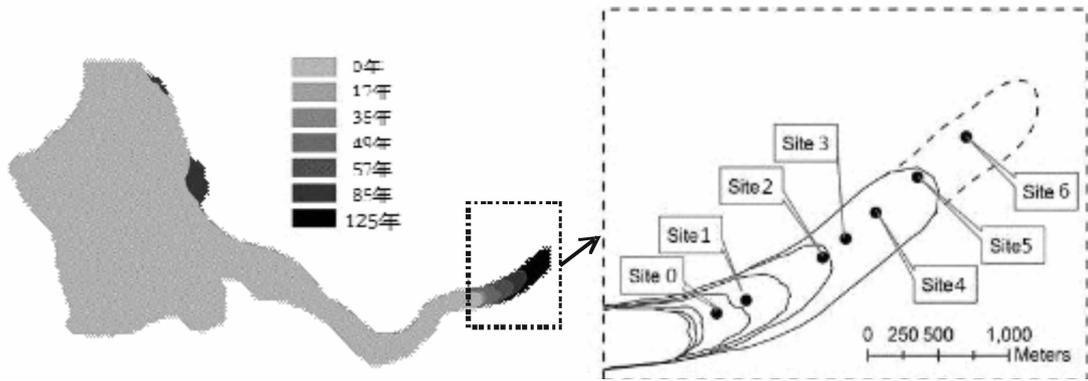


图5 海螺沟冰川退缩区植被原生演替阶段划分

Fig. 5 Primary succession stages of vegetation in the foreland of Hailuoguo glacier.

## 2.1 土壤原生演替过程

磷(P)是陆地生态系统健康发展的必需营养元素,P的有效供给是“年轻”生态系统土壤发育和植被演替的必要条件<sup>[21, 22]</sup>。利用土壤磷连续提取技术分析了贡嘎山海螺沟冰川退缩迹地不同成土年龄的土壤磷形态,重建了土壤磷形态随成土年龄的变化序列,发现与植被的原生演替存在一定的耦合关系。

(1)成土早期土壤矿物组成的特征:发现在冰川退缩区成土母质的矿物组成同质性较高,以硅酸盐矿物为主(约90%),兼有少量碳酸盐矿物(约10%)。提出土壤发育过程中矿物组成变化的基本模式:随着成土作用时间的增加,在120多年的土壤发育过程中,方解石逐渐被风化成为草酸钙石,角闪石、黑云母、磷灰石和绿泥石含量逐渐降低,长英质矿物的相对含量有所增加<sup>[24]</sup>。成土作用中矿物组成的变化受植被原生演替和土壤pH的影响,快速发育的植被导致土壤pH迅速降低,风化程度增强。在冰川退缩后52年的样点,土壤pH下降至5.5之后,对磷灰石风化的影响加强<sup>[23, 24]</sup>。

(2)土壤发育中的C:N:P组成变化:海螺沟冰川退缩时间序列土壤中钙/铝结合态的P主要为原生矿物P(包括磷灰石和铝磷矿物)。原生矿物P随风化作用的进行快速降低,冰川退缩40年后铝结合态P几乎消失,而有机P则不断积累,有机P可能成为植物和微生物的一个重要P源;生物有效P在冰川退缩30年后显著升高。海螺沟冰川退缩迹地土壤P的生物地球化学循环受到温度、降水、岩性、土壤性质、植被和微生物活动的共同影响<sup>[23, 25]</sup>。

土壤有机P储量随土壤发育快速增加(发育120年后积累速率为 $0.08 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ ),说明有机P

矿化过程对生物有效态P供给的贡献逐渐增加。微生物量P一方面是生物有效态P的潜在来源,另一方面对溶解和弱吸附态无机P起固持作用。土壤发育早期,微生物对C的需求可能是驱动土壤有机P矿化的主要机制,发育早期植被快速演替过程中有较大的P需求并可能受P限制<sup>[26]</sup>。随着演替的进行,地上植被积累的碳库占整个生态系统碳库的比例逐渐增加,而矿质土壤逐渐降低。同时,矿质土壤中的N库增加了370%;地上植被积累的N库增加了297%,且演替末期地上和地下积累的N库量相当。可见,C/N在地上植被中呈现出恒定的趋势,但是在矿质土壤中逐渐降低。这些结果说明演替末期落叶阔叶林地上部分逐渐成为生态系统碳库的主要组成部分<sup>[27]</sup>。

## 2.2 植被演替过程

海螺沟冰川退缩迹地拥有完整和系统的植被原生演替序列,提供了最为理想的植被原生演替研究的场所。通过大量样地调查和冰川退缩时间序列重建,获得了贡嘎山冰川退缩迹地形成的山地植被原生演替序列完整图谱如表1所示。从冰川退缩后的原生裸地为最初阶段,经历了125年的演替后,逐渐由17年形成灌丛群落、35年形成冬瓜杨为优势的乔木群落,49年后,云冷杉幼苗及幼树在群落中占据一定生态位,然后在85年后逐渐成为成为云冷杉为优势建群的植被群落。至125年后,云、冷杉由于生长加快逐渐占据主林层,冬瓜杨逐步退出群落,群落最终进入到以峨眉冷杉和麦吊云杉为优势种的针叶林顶级群落。

海螺沟冰川退缩区域植被演替是群落更替的过程,表现为群落结构和功能及其环境的变化是一个有序的、可以观测的连续过程。随着植被演替时间

的增长其生物量均呈现显著的指数增长的趋势(图 6a)。从演替初期到顶级群落,总生物量增加了 35 倍。就生态系统各层次而言,乔木层生物量占总生物量比例最高值出现在样地 S2,以后随着乔灌草层的丰富和生物多样性的增加,这一比例则随着演替的进展而不断降低。云冷杉为建群进入主林层后(S5),云冷杉生物量增长加速,在样地 S6 达到最高,是冬瓜杨成熟林(S4)生物量的 1.75 倍,云冷杉占乔木层生物量的 99% 之多。随着演替的进行,灌木层、草本层与地被层生物量表现出显著的阶段性变化规律(图 6b)。在落叶阔叶林阶段,林下各层生物量均随演替时间的增加而不断增长,其中灌木层生物量增长最为迅速;随着群落由落叶阔叶林阶段进入到针阔混交林阶段,灌木层生物量增长变缓。在针阔混交林阶段,地被层生物量达到了整个演替序列的最高值。在群落开始进入针叶林阶段后,灌

木层生物量又开始迅速增长,占据绝对优势,草本层生物量也稍有提高,地被层生物量则略有降低。

通过年龄序列方法,探索了冰川退缩迹地上阔叶林碳动态以及碳氮计量学关系,阐明了各演替阶段上碳氮关系的动态变化及其与植被和土壤发育之间的关系<sup>[27]</sup>。结果表明,生态系统的 C 库随植被演替进程而逐渐增加,其中地上植被碳库在生态系统中所占比例从 50% 增加到 68%;矿质土壤中 C 库量虽然增加了 129%,但在生态系统中所占比例却从 49% 降低到 32%。另一方面,矿质土壤中的 N 库增加了 370%,而地上植被积累的 N 库增加了 297%,且演替末期地上和地下积累的 N 库量相当。因此,C/N 在地上植被中呈现出恒定的趋势,但是在矿质土壤中逐渐降低。说明演替末期落叶阔叶林地上部分逐渐成为生态系统碳库的主要组成部分<sup>[27]</sup>。

表 1 不同演替阶段样地植被特征

Table 1 Characteristics of vegetation along the six succession stages in the foreland of Hailuoguo glacier

样地编号	冰川退缩时间	裸地形成年龄	林分密度(株·hm <sup>-2</sup> )	郁闭度	主要树种组成
S0	2015 年	0			裸地
S1	1998 年	17	3770	0.287	川滇柳、冬瓜杨、沙棘幼树群落
S2	1980 年	35	31070	0.947	冬瓜杨、川滇柳、沙棘、云冷杉幼苗
S3	1966 年	49	16744	0.830	冬瓜杨、川滇柳、沙棘、云冷杉幼树
S4	1958 年	57	2574	0.757	冬瓜杨、云冷杉群落
S5	1930 年	85	576	0.843	云冷杉、冬瓜杨群落
S6	1890 年	125	378	0.807	云冷杉顶级群落

注:川滇柳 *Salix rehderana*, 冬瓜杨 *Populus purdomii*, 沙棘 *Hippophae rhamnoides*, 峨眉冷杉 *Abies fabri*, 麦吊云杉 *Picea brachytyla*

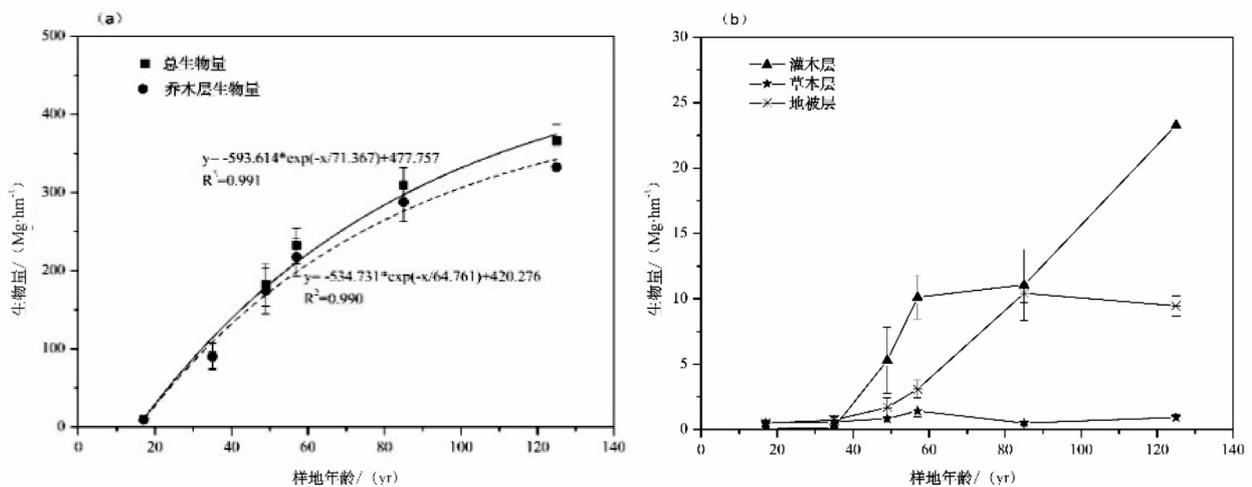


图 6 原生演替不同阶段群落生物量变化:(a) 活植物体与乔木层;(b) 灌木层、草本层和地被层

Fig. 6 Variation in plant biomass along the succession stages in the foreland of Hailuoguo glacier.

a) total biomasses of the vegetation and the tree layer; b) biomass of the shrubs, grasses, and ground layer.

### 2.3 植被演替模拟

在林窗模型(Forest gap model)为基础的单木模拟模型基础上,开发了贡嘎山森林演替模型(GFSM),该模型是以气候因子(温度和降水)为主要驱动变量对森林群落生长和演替过程进行模拟预测的数学方法,采用随机过程模拟气候波动及单木生长、死亡的不确定性,特别是将土壤演替与树木生长变化结合起来,可以模拟分析山地长期自然环境变化与森林植被的相互影响关系。首先,筛选并确定出了西南林区40个代表性树种生态学特征参数,然后利用经过检验的GFSM模型对贡嘎山不同高度带的森林变化模拟。结果表明,GFSM模型可以较为准确地再现亚高山冰川迹地和泥石流迹地上的森林原生演替的过程,反映不同高度带上的森林树种组成和径级结构,模拟结果与当地顶级森林群落的垂直分布规律相一致<sup>[28, 29]</sup>。该模型还应用到高黎贡山和色季拉山的森林动态分析并取得了较好的结果。根据IPCC第4次评估报告,选择最具代表性的3种气候变化情景(B1、A1B和A2),比较分析了不同情景下森林树种组成、优势树种径级结构和林地土壤碳氮动态特征。结果表明:维持目前气候状况不变时,贡嘎山东坡冰川退缩和泥石流形成的迹地,经过典型的川滇柳、冬瓜杨和桦树先锋群落演替阶段,最终将恢复为冷杉林。若气候变化情景(A1B和A2)发生,繁殖能力和耐性较强的树种,如高山松和桦树,可能取代喜冷湿环境的冷杉,成为这一地区的优势树种,同时,森林生物量和土壤碳氮含量将随优势树种的改变而下降。在B1情景下,迹地还会恢复为冷杉林,但是其抗干扰能力和稳定性明显下降。总之,无论哪种气候情景发生,都将不利于冷杉林的恢复和更新<sup>[30, 31]</sup>。GFSM的研发对于解决我国西南林区天然林更新与保护提供了重要的分析方法和预测手段。

## 3 高山生态系统生物地球化学循环

### 3.1 磷的生物地球化学循环与带谱分异

海拔梯度上土壤P的生物地球化学特征受温度、降水、岩性、土壤性质、植被和微生物活动等共同控制。海拔3838~4235 m梯度内总P储量显著高于海拔2032~3614 m梯度范围内。气候、土壤侵蚀、母质中的总P含量和植被类型影响空间分布。表层土壤有效P的浓度和储量在海拔梯度上表现

为抛物线分布格局,最高值分布在海拔3060 m,最低值分布在海拔2032 m<sup>[25]</sup>。冗余分析结果表明,所有P的形态均与土壤pH值、植被和土壤有机质相关。在海拔2032~4235 m梯度范围内,土壤pH值和凋落物归还的P相互耦合,是有效P海拔梯度上抛物线分布格局的关键因素。而在海拔3060~4235 m,温度成为有效P分布格局的关键控制因子,主要因为温度会影响凋落物的分解速率<sup>[32]</sup>。概述而论,山地土壤总磷库随海拔的升高逐渐增加;生物有效磷库呈现抛物线型分布,其含量在亚高山暗针叶林带最高;原生矿物磷库呈现与生物有效磷库相反分布特征;高海拔地区有机磷含量显著高于低海拔地区;磷的垂直分布特征主要受土壤pH、降水和植被的控制;中高海拔带有效磷的分布主要受温度和pH的影响,而中低海拔带有效磷的分布则主要受土壤pH和凋落物产量的控制。另外,研究结果表明,C和N作为独立因子并不足以解释器对微生物功能的影响,而C/N值是更可靠的解释因子<sup>[32]</sup>。

### 3.2 碳循环与海拔效应

碳循环是地球系统物质和能量循环的核心,山地生态系统碳循环及其对全球变化的响应研究一直是生态学广泛关注的前沿问题<sup>[33]</sup>。在高山草甸生态系统,研究发现非生长季土壤呼吸占到全年土壤的25%~26%,显著高于北极苔原生态系统。整个观测期高寒草甸和沼泽草甸平均Ra/Rs(自养呼吸/土壤呼吸)比分别为36.91%和34.91%,异养呼吸是高寒草地土壤呼吸的主体,这一比值低于大部分北极寒带生态系统。自养呼吸对土壤温度最敏感,异养呼吸温度敏感性最低;高寒沼泽草甸异氧呼吸、自养呼吸和土壤呼吸 $Q_{10}$ 值均高于高寒草甸<sup>[34]</sup>。气候变暖显著促进了高寒草地生态系统的呼吸排放,但气候变暖和氮沉降水平增加显著增强高寒草甸和沼泽草甸甲烷吸收(或降低甲烷排放)。另外,高寒草地生态系统在4~7年的增温过程中并没有发现土壤碳储量的显著降低,甚至在部分年份促进了土壤碳的增加<sup>[35]</sup>。因此,研究结果认为气候变化并没有显著促进高山带高寒草地生态系统的碳损失。

在贡嘎山亚高山暗针叶林生态系统分布区域内,随海拔梯度(海拔2800~3700 m)增加,暗针叶林生态系统总初级生产力(GPP)和净初级生产力(NPP)都表现出降低的趋势,GPP和NPP沿海拔梯度的变化幅度分别为 $-0.09 \text{ g m}^{-2} \text{ s}^{-1}/100 \text{ m}$ 和 $-0.03 \text{ g m}^{-2} \text{ s}^{-1}/100 \text{ m}$ (图7)。发现亚高山生态

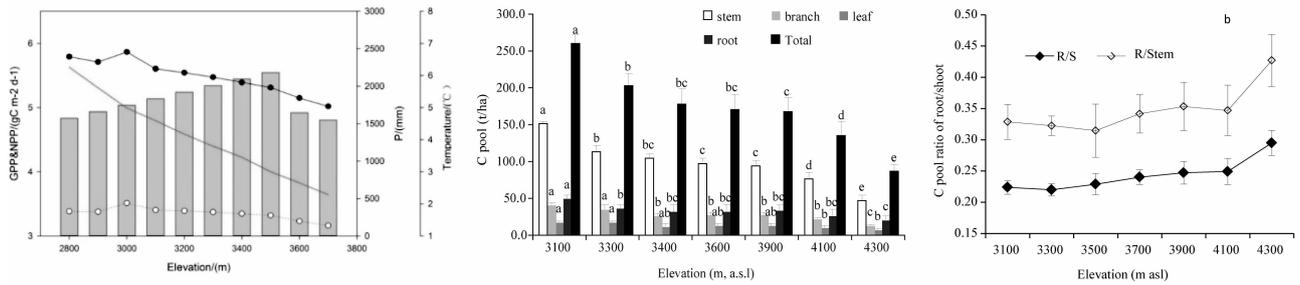


图7 针叶林生物量碳库(生产力)随海拔高度的分布格局

Fig. 7 Variation of biomass carbon pool (productivity) along the altitudinal gradient of the coniferous forest in Gongga mountain.

系统净初级生产力主要受到温度的控制,海拔梯度上温度降低通过减小叶片长度和比叶面积,显著抑制了峨眉冷杉的光合作用能力。然而,叶片的氮含量随海拔高度逐渐增加,从而提高叶片的光合作用能力,有助于植物适应高海拔严酷环境<sup>[32]</sup>。但这种自适应策略仅能够维持峨眉冷杉在低温环境下的生存,并不能有效的阻止低温对于生长的限制,而仅能通过提高自身的水分利用效率来适应环境的变化。在针对冷杉林带的带谱研究表明,冷杉林的现存生物量和C库具有显著的随海拔增高而呈现抛物线型递减趋势;随海拔高度增加,地下生物量和C库显著增加;随气温和降水量增加,生物量和C库分配趋于向地上转移<sup>[36]</sup>。

在贡嘎山区,生态系统自养呼吸( $R_a$ )和异养呼吸( $R_h$ )速率随海拔升高而逐渐降低。海拔梯度升高,环境因子的变化对 $R_a$ 的影响程度要高于对 $R_h$ 的影响。生态系统呼吸( $R_e$ )及其组分与年均温度之间表现为正相关关系。发现由于海拔2800~3700 m之间的暗针叶林生态系统的影响,年降水量与 $R_e$ 的海拔梯度变化无显著关系<sup>[37]</sup>。在未来气温和降水协同增加情景下,土壤温室气体排放量显著增加,森林地表土壤有机碳库将持续减少,但是矿质土壤库将持续增加<sup>[38]</sup>。随着海拔梯度升高, $R_e$ /GPP比值逐渐降低,原因是 $R_e$ 对温度的响应速率高于GPP,进而碳利用效率(NPP/GPP)随海拔梯度增加而增加。同时,温度和 $CO_2$ 浓度协同增加情景下,冷杉生态系统的 $R_e$ 也将显著增加,部分抵消温度对GPP的增加效应<sup>[37]</sup>。

在未来气候变化背景下,有研究表明低海拔区域内的冷杉林可能会提高其固碳能力和水分利用效率,原因是 $CO_2$ 浓度升高显著增加了植物的叶面积指数,进而对冷杉的生长起到了促进作用<sup>[37]</sup>。但有研究认为仅温度增加则可能会降低低海拔冷杉林的

NPP,而增加高海拔冷杉林的NPP,因为温度增加会显著增加高海拔冷杉的生物量和低海拔冷杉的呼吸速率<sup>[36]</sup>。

### 3.3 亚高山森林生态系统水循环及其模拟

森林水循环是陆地水循环中的重要组成部分,以贡嘎山东坡海螺沟流域峨眉冷杉森林生态系统为研究对象,系统研究了峨眉冷杉幼龄林、中龄林和成熟林的森林生态系统截留和蒸散发过程<sup>[39, 40]</sup>。结果表明,暗针叶林不同龄级的降水截留存在较大差异,平均截留率分别为28.8%、25.5%和31.3%<sup>[40, 41]</sup>。森林地表凋落物层能够截留部分降水,但林冠截留率占生态系统截留率分别为80.9%、81.9%和90.0%,是森林生态系统降水截留的主要部分<sup>[40]</sup>。乔木层蒸腾量随龄级不同而不同,日蒸发总量以中龄林最大( $0.88 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ),幼龄林次之( $0.70 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ),成熟林最小( $0.37 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ )。不同龄级乔木层与灌木层蒸腾量所占的比例不同,成熟林中灌木蒸腾量占总蒸腾量的59%,乔木层蒸腾量占41%;中龄林中灌木层蒸腾量仅占总蒸腾量的大约1%,乔木层蒸腾量占99%;幼龄林中灌木层蒸腾量占总蒸腾量的22%,乔木层蒸腾量占78%<sup>[39]</sup>。森林水量平衡是通过对水分的收入和支出系统进行定量分析来研究降雨在森林植被中再分配状况规律。根据观测数据,分别评估了峨眉冷杉不同龄级森林生态系统的水量平衡,结果表明,受生态系统截留和蒸散发过程影响,幼龄林、中龄林和成熟林出流量分别占降雨量的61.2%、62.5%和55.8%。

在基于样地的大量观测试验基础上,程根伟<sup>[42]</sup>开发了适合贡嘎山森林水文过程和机制的分布式湿地水文模型(Distributed wetland and hydrological model, DWHM),实现了对主要森林类型水循环过程的模拟。该模型能够模拟任何大小单元上的系统水文过程,是一个基于物理过程的分布式模型,能很

好地反映森林生态系统对水文过程调节的物理机制。利用 DWHM 模型模拟了贡嘎山黄崩溜沟的径流过程,结果表明,2000 年和 2001 年两个水文年流域出口年总径流模拟值分别为 1024.6 和 1095.2 mm,年径流系数分别为 0.57 和 0.56。从模拟径流过程和实测径流过程上看,模型对暗针叶林流域的水文径流过程识别精度较高,而且模型对湿季径流过程的模拟效果要明显优于对于季径流过程的模拟效果。从全年的径流组分来看,壤中流和浅层地下水径流量分别占年总径流量的 61% 和 39%。其中干、湿季的上层土壤非饱和带与饱和带间的交换量分别占年总交换量的 12% 和 88%。另外,通过模拟发现,当森林覆盖率在 35% ~ 40% 之间时,森林生态系统具有最佳的调节功能。这些结果为长江上游生态系统的可持续管理和水资源的合理开发提供了重要的理论依据<sup>[42]</sup>。

#### 4 海洋性冰川动态与山地气候变化

贡嘎山是我国除藏东南地区典型海洋型冰川发育中心之一,冰川动态与环境演替关系密切。受季风及海洋型气候的影响,贡嘎山地区降水充沛,冰川具有平均海拔相对较低、冰温高、消融强烈、运动速度快和物质交换水平高等强动态变化特征。作为气候变化的指示器,贡嘎山地区冰川波动的直接(定位监测与野外测绘)和间接证据(冰川地貌遗迹)反应了该地区第四纪以来和近期气候变化的历史。

#### 4.1 贡嘎山冰川分布与变化

据最新中国冰川编目,贡嘎山主峰周围共发育现代冰川 74 条,是我国主要的海洋型冰川分布区之一。由于贡嘎山东坡气候条件比西坡相对湿润,代表性的较大型山谷冰川如海螺沟冰川、磨子沟冰川、燕子沟冰川和南门关沟冰川等均位于其东坡。东西坡现代冰川的雪线高度差异明显,东坡(4800 ~ 5000 m)低于西坡(5000 ~ 5200 m)。

在全球变暖背景下,作为贡嘎山地区典型海洋型冰川的代表性冰川,海螺沟冰川后退趋势明显(图 8)。自 20 世纪 30 年代至今,冰川已累计退缩 2 km 左右,其中 1966 至 2010 年间退缩了 1.15 km,冰川平均年退缩速率达到 25 ~ 30 m/a<sup>[43]</sup>。冰川退缩的同时也在减薄。1989—2008 年间冰川消融区冰舌端的冰川厚度平均减薄 33.9 ± 11.2 m,相当于 1990 年左右平均厚度(约 130 m)的 26%<sup>[44]</sup>。同时,冰川运动速度总体呈减缓趋势,1981—2008 年间夏季冰川消融区运动速度平均减小了 31%<sup>[45]</sup>。上述变化整体上导致贡嘎山地区冰川总面积减少了 29.2 km<sup>2</sup> (-11.3%),东西坡冰川面积变化差异显著,面积减少率分别为 9.8% 和 14.6%,西坡冰川呈现更明显的物质亏损<sup>[43]</sup>。

冰川后退与物质亏损的加快,对所在地区河流源区的水文、水循环过程将产生重要的影响,导致河川径流呈现复杂的变化特征。自有观测记录以来,海螺沟冰川流域的径流增加非常明显<sup>[46, 47]</sup>。气候变化通过冰川及其消融变化影响流域径流量和过

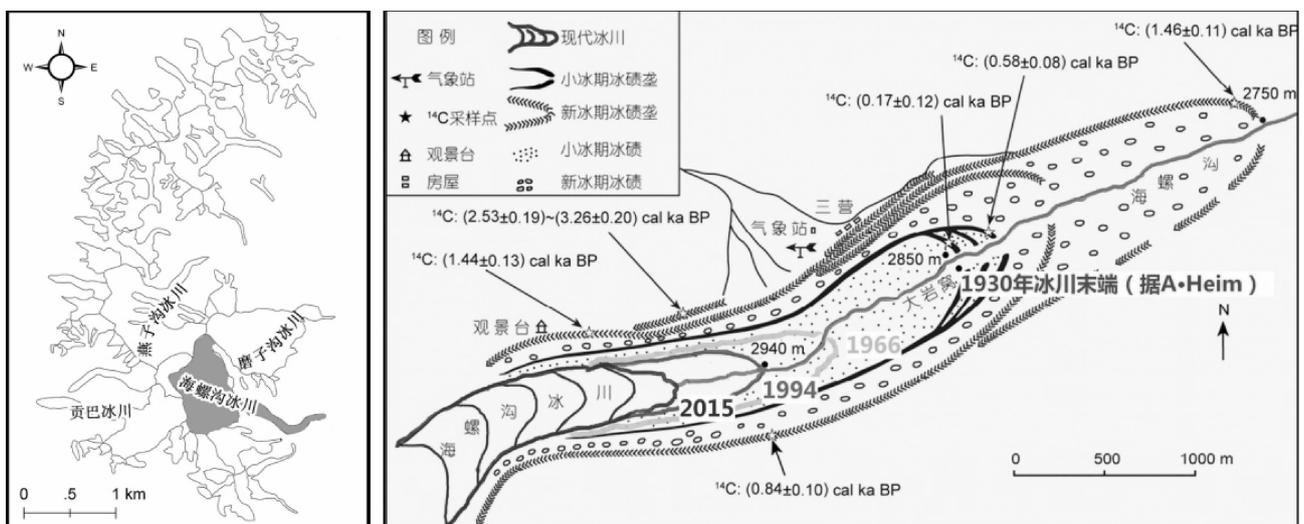


图 8 贡嘎山海螺沟冰川分布与动态变化过程

Fig. 8 Distribution and dynamics of Hailuoguo glacier

程,冰川近期的强烈消融是引发海螺沟冰川流域径流显著增加的直接原因。冰内及冰下水系发育是海洋型温冰川消融区的另一典型特征,其变化不仅影响着冰川汇水储水及融水径流过程,而且会通过冰下水力状况的变化影响冰川运动、冰川侵蚀等过程。近年来,采用染色示踪技术,针对海螺沟冰川消融区冰舌段开展了消融期内的重复示踪试验<sup>[48]</sup>,结合冰川末端径流过程的分析<sup>[49, 50]</sup>,揭示了冰舌段冰下排水通道的形成及其季节演化的主要过程和相关特征。

#### 4.2 山地气候变化

山地是气候变化的敏感区。贡嘎山自随青藏高原隆升以来,经历了数次冷暖交替的气候波动,现代地貌格局、植被分布以及垂直自然地带景观随之逐渐形成。认识该区域气候变化特征及其时空格局即可以反映青藏高原东部的气候变化态势。

根据对古冰川遗迹划分和最新冰川沉积定年的研究结果<sup>[51]</sup>,第四纪以来贡嘎山地区共经历了三次大的冰期:中更新世早期的倒数第三次冰期、中更新世晚期的倒数第二次冰期和晚更新世的末次冰期(17 600 ± 200 aBP)和全新世的两次较小冰期(全新世晚期 4000 ~ 1000 aBP 的新冰期和 15 ~ 19 世纪的小冰期),反映了各对应时期相对寒冷的气候特征。与全球各地冰川一致,自全新世初期(10 000 ~ 7500 aBP)以来,由于气候全面转暖,贡嘎山地区冰川以大规模的退缩为主,之后尽管经历了新冰期和小冰期的两次相对较冷期,但现代冰川规模已远远不及末次冰期阶段的规模<sup>[52]</sup>。树木年轮主要用于反演了贡嘎山地区过去数百年来气候变化。基于横断山中部地区森林上限附近的树轮宽度反演结果<sup>[53]</sup>,过去 250 年来该地区经历了四次明显的周期性冷暖交替。近百年来夏季冷暖变化与周边地区冰川进退历史记录相对应<sup>[54]</sup>。通过建立冷杉树轮宽度与雪深的关系,重建了贡嘎山地区 1900 年以来百年尺度的积雪变化<sup>[55]</sup>,发现存在明显的 20 年为周期的震荡变化,1990s 后期积雪量相对较低,最大降雪年份发生在 1990 年前后。

贡嘎山站在东坡海拔 1600 m 和 3000 m 设置的两个不同海拔气象站的观测表明,过去 30 多年来气温升高具有普遍性,但高海拔(3000 m)增温幅度将近 0.45 °C/10 年,是低海拔(1600 m)增温幅度 0.29 °C/10 年的 1.55 倍,高海拔增温幅度显著高于低海拔地区,平均大致存在海拔每升高 100 m,气温增幅

增大 0.11 °C/10 年的递增速率。贡嘎山高海拔地区过去 20 多年累积增温达到 1.2 °C,平均增温幅度高于青藏高原平均地表增温程度,也高于瑞士阿尔比斯山的平均增温幅度。降水量的变化出现显著的差异性,表现在低海拔地区呈现显著递增态势,而高海拔地区则呈不显著递减趋势。在 1989—2013 年间,低海拔 1600 m 的降水递增幅度达到将近 90 mm/10 年,高海拔的 3000 m 地区降水量则以大致 40 mm/10 年的幅度递减。因此,贡嘎山地区的气候变化格局是:高海拔地区暖干化趋势不断加剧,低海拔则出现暖湿态势。这种空间显著分异的气候变化格局,将对山地生态系统分布、格局与功能产生何种效应,是未来亟待关注的重要科学问题<sup>[33]</sup>。

## 5 山地资源开发利用与保护

山地资源的合理开发利用与保护,是山地表生环境过程研究中,应对区域经济社会发展需求的重要内容。近年来,围绕西南山区资源开发利用与保护方面的战略和区域发展需求,开展了众多专门研究,在多个领域对促进区域发展发挥了重要科技支撑。

### 5.1 环贡嘎山旅游景观评价及开发规划

贡嘎山位于青藏高原东缘,其主峰海拔 7556 m,以奇峰雪景、现代冰川、温泉著称于世,并伴有原始森林、草原、气象等众多景观以及特色鲜明的藏族风情。早在 20 世纪 80 年代初期,中科院山地所科研人员就提出了贡嘎山海螺沟旅游开发利用规划建议,为当时四川省政府采纳并付诸实施,建立了今天的海螺沟风景名胜区和旅游管理局。在 2012—2013 年间,为进一步加强四川贡嘎山旅游资源的开发利用和有效保护,通过全面分析贡嘎山海螺沟地区旅游业发展历史与现状、优势与制约因素及与相关规划的衔接,并贡嘎山海螺沟地区客源市场需求总量以及组成结构特征。贡嘎山站科研人员再一次编制了“环贡嘎山旅游圈开发利用规划”,系统阐明了贡嘎山地区旅游发展重点发展方向,明确了贡嘎山海螺沟地区旅游主题形象和发展战略,指出了区域特色旅游产品开发的方向、特色与主要内容。同时,按照可持续发展原则,注重保护与开发利用的关系,对景区利用的空间与时间格局统筹安排,提出了一些合理的措施与建议。这一成果以咨询建议方式向四川省人民政府提交了“关于加快环贡嘎山旅游

圈发展推动全面建成小康社会的建议的报告”,得到了省领导的高度重视,认为报告建议意见很有价值,批示旅发委落实相关工作。

## 5.2 大熊猫栖息地世界自然遗产

大熊猫是世界上极其宝贵的自然遗产,具有重要的学术研究价值,其生存和保护现状,受到广泛关注。对四川大熊猫栖息地世界自然遗产提名和管理关键技术进行深入研究,填补了该领域的研究空白,为世界遗产的申报和跨政区、跨部门的有效管理,提供了科学依据与关键技术支撑,确保了大熊猫栖息地世界遗产的申报成功。并将国家级与省级管理的大熊猫栖息地提升到世界自然遗产保护与管理,有力推动了我国世界遗产管理的科技进步,是中国世界遗产管理科技进步的一大标志,也标志着大熊猫及其栖息地的保护进入了一个新的里程碑。该项研究成果使邛崃山脉大熊猫栖息地,由 16 个国家级、省级自然保护区和风景名胜区分散管理的状态,一次性整体进入《世界遗产名录》,取得《保护世界文化与自然遗产公约》的完整保护与保存的国际法保障。所提出的监测体系与管理指南的实施,推进了四川省和我国世界遗产管理标准化进程。成果对自然遗产价值的认定,以及世界遗产监测体系的构建、旅游发展管理、遗产地汶川地震灾害评估与灾后恢复重建规划、提出的特种遗产资源理论架构,创新性强,开拓了世界遗产地系统研究的新方向。成果中的世界自然遗产监测体系建设项目纳入了国家发改委《国家“十二五”文化与自然遗产保护设施建设规划》,于 2013 年起实施。同时,该成果在 2016 年申报并获得国务院批准成立的大熊猫国家公园发挥了重要的作用。

## 5.3 油橄榄丰产培育技术研究与示范

油橄榄(*Olea europaea*)是世界上重要的木本油料树种,产量居世界植物油产量的第 6 位。依托四川省科技厅国际合作项目“油橄榄优良品种引进与培育”,与四川西中油橄榄有限责任公司合作,在成都金堂县淮口镇,开展油橄榄优良品种引种与试验示范,引种西班牙 Arbequina、Hojiblanca、Manzanilla 等品种 10 多个,通过品比试验,筛选出抗旱、适应性强、丰产性好、含油率高、品质好适合川中丘陵区的油橄榄品种;并开展油橄榄规模化种植技术研究与示范,在成都金堂县淮口镇已建立油橄榄优良品种苗木基地 20 亩,丰产示范基地 3000 多亩,引进意大利橄榄油加工设备,建设橄榄油加工生产线 1 条,试

验示范基地 4~5 年生油橄榄平均单株产量达到 10 公斤以上,取得良好的示范效果。该成果有力地推动了四川省油橄榄产业的发展,并为后续不断培育和改良品种、发展高效种植模式等奠定了重要科技基础。

## 5.4 川滇高山栎萌生更新研究与恢复试验示范

高山栎类植物依靠自身特有的抗寒耐旱的形态特征,成为横断山地区森林群落中的优势种和建群种,对该地区脆弱生态系统稳定性的维持,对西南诸河流域江河源头的水源涵养和水土保持,均具有十分重要的生态功能。同时,作为当地农牧民薪材的主要来源,长期持续的砍伐利用已逐步从中低海拔向高海拔区域转移,导致高山栎灌丛大面积退化,使其生态功能下降,是西南山区生态屏障建设面临的主要生态问题之一。

通过人工干扰试验,比较不同海拔梯度川滇高山栎灌丛自然萌生更新能力和不同干扰条件下川滇高山栎灌丛萌生更新能力,掌握了高山栎灌丛萌生更新过程的主要影响因素与作用机制。在这些理论研究基础上,研发了一整套川滇高山栎萌生更新人工调控技术。该项技术关键是通过高山栎林实施控制性间伐,用以在高山栎林培育管理中实现兼顾维持高山栎林可持续更新能力与满足当地农牧民生活能源需求的双重目的,能够有效平衡高山栎灌丛林伐木萌生更新与当地居民伐木获取薪材的用量关系,解决林区人地矛盾、兼顾生态社会两方面利益。技术简单利于操作,特别适宜于指导横断山区山区农牧民获取薪柴中实施。同时将影响高山栎类植物萌生更新的主要因素控制在量化指标范围内,以促进高山栎林萌生更新并控制其更新方向。此外,开展区域试验示范,川滇高山栎示范基地面积达到了 30 公顷,对西南川滇高山栎薪材利用和森林更新管理具有重要的现实意义。

# 6 挑战与展望

## 6.1 构建和发展山地环境变化综合观测网络

作为面向西南山地唯一的高山生态与环境综合观测试验站,贡嘎山站在 30 年的发展中,逐渐形成了以山地垂直植被带系统观测研究为主要特色的生态定位研究基地。尽管逐渐构建了以东坡海螺沟为重点的山地植被分带全带谱水土气生综合观测体系,但距离国际先进的山地环境观测研究平台尚存

在较大差距。主要表现在:①样带单一、难以观测不同坡向的不同气候变化与影响,从而制约了对山地生态系统对气候变化响应与适应机制的深入理解;②缺乏与国际山地环境观测系统相统一标准和技术体系建立的样带,难以与国际山地环境观测体系相接轨和比较研究;③限于观测试验技术与方法,针对山地垂直植被带谱不同生态系统的观测平台不相匹配,尚难以厘清从低海拔到高海拔不同生态系统对气候变化和人类活动影响的差异性响应规律与机制。

近年来,国际 GTOS 计划倡议实施全球山地环境综合观测行动(The Global Observation Research Initiative in Alpine environments), 简称为 GLORIA。这一计划的目的是推动采用统一的技术方法和观测试验方案,开展区域或全球尺度山地环境变化的联网观测研究。目前, GLORIA 计划在欧洲组建了较为完善的山地联网研究体系,在全球已完成、或正在建设的典型观测山地点 125 个,基本覆盖了全球大部分具有生物地理和生物气候特色的区域。其中我国仅有 3 个山地样点,且包括贡嘎山在内均处于筹建之中。缺乏完善的观测试验体系和先进的观测试验技术和方法,极大地制约了我国山地环境变化研究的发展。随着全球气候变化对山地生态系统的显著影响及其巨大的反馈效应,在区域尺度乃至全球尺度的山地环境变化监测网络体系的发展,将是未来重点发展的方向<sup>[56]</sup>。

为此,突出贡嘎山在横断山地区的代表性,采用国际 GLORIA 计划的技术方法与 CERN 长期样地模式相结合,通过以下几方面的发展破解制约山地环境观测系统的制约瓶颈:一是构建完善的高山生态系统垂直带谱多坡向对比观测大样带,将不同坡向自然植被分布格局形成的环境因子及其响应全球气候变化的差异性变化观测相结合,形成山地全方位生态与环境系统观测系统;二是构建长期的高山自然气候梯带的生态位移观测系统和完善的高山典型带谱物种入侵观测试验系统。充分利用贡嘎山地区丰富的自然气候梯带格局,构建气温在  $\sim 6\text{ }^{\circ}\text{C}$  和降水量在  $\sim 1000\text{ mm}$  的气候梯度位移观测试验样地网络体系。充分利用贡嘎山地区植被带间水平距离短、气候变化幅度大、物种迁移明显等特点,建立独特的基于物种迁移的入侵观测试验体系。三是构建高山雪线带高寒植被冰冻圈作用的生态系统观测网络,冰冻圈要素对气候变化的高度敏感性为植被变

化提供了更多诱导因素,这是山地生态系统响应全球变化必然关注的重点,充分利用贡嘎山冰冻圈要素十分发育的优势条件,构建冰冻圈-生物圈相互作用的观测试验系统。

## 6.2 气候变化下的高山生态系统垂直带谱分异与重建机制

查明全球变化对高山生态系统的影响及其在不同层次的反应与适应机理,预测全球变化背景下未来山地生态系统的演变趋势及其影响,是认知全球变化对陆地生态系统影响的关键,也是我国生态安全屏障建设和促进山区可持续发展的重要科学支撑。但现阶段我们并不能系统回答我国西南山地不同植被带如何响应气候变化,已经或即将发生何种变化及其可能的生态安全影响等科学问题。未来迫切需要以山地不同植被带为对象,系统开展气候变化和地形驱动下的物种分化与适应过程的研究,探索全球变化下山地物种分布扩张、物种替代与多样性变化的基线与速率,系统分析生态系统结构重组与功能演化、山地生态垂直带谱迁移规律;揭示全球高山生态系统对气候变化响应与适应的趋同性规律与差异性垂直图谱,期望在多圈层相互作用的山地垂直带谱迁移和重建机制,山地生态系统对气候变化响应与适应机理的理论认知等方面取得重要突破。

## 6.3 气候变化对高低纬度典型山地生态系统影响的比较——从群落结构到生态系统功能

高山生态系统种群动态、群落结构与物种多样性变化,山地垂直带谱生态系统生产力、格局变化过程与驱动机制等,始终是山地生态系统研究的核心主题。由于不同地区的控制性因子及其调控特性导致相应的植被变化模式并不相同,开展跨地区或全球不同区域山地生态带谱联网研究,有利于更准确、全面地认识山地生态垂直带谱响应气候变化的时空分异规律,从而有助于明晰全球变化与人类活动对山地生物多样性、关键生态系统功能与生态系统服务等方面的影响与作用。通过贡嘎山(北纬  $30^{\circ}$ )与挪威的斯堪的纳维亚半岛高寒山地站(北纬  $65^{\circ}$ )、美国洛基山高山地环境站(北纬  $40^{\circ}$ )以及奥地利阿尔卑斯山地站(北纬  $50^{\circ}$ )等不同纬度高山环境站的合作,开展不同纬度山地生态系统对全球变化响应的对比研究,从山地主要垂直植被带群落结构与组成变化,生物与非生物因素间相互作用关系等到生态系统功能,如生产力、生物地球化学循环等,探索

山地生态系统响应气候变化的异同性、空间分异格局及其形成机制。通过比较全球不同纬度高山生态系统对气候变化响应与适应的趋同性规律与异质性机制,在辨析现在与未来全球变化对陆地生态系统影响与反馈等国际前沿科学命题上取得进展。

#### 6.4 山地生态过程模型与全球变化响应预测

在全球范围内,开发了众多生态系统模型,如影响较大的区域植被动态模型 DGVM (Dynamic Global Vegetation Model),包括 LPJ、IBIS、VECODE 和 TRIFFID 等模型在内,对于山地生态过程的模拟存在较大的不确定性。未来迫切需要发展山地生态系统推演的尺度转换理论与方法,建立山地生态过程响应环境变化的多维动态模拟系统,实现研究方法的突破和定量模拟与预测能力的提升。集成高山冰冻圈、生物圈和大气圈相互作用,开发基于生物物理、生物化学和植物生理等多种过程耦合的,多尺度协同的动态生态模型;刻画不同生态带谱适应气候变化的可能临界阈限及其对气候变化的响应过程、时空分布格局与生态系统功能演化趋势;准确预估未来气温升高 2 度将塑造的高山生态系统分布格局、生物多样性以及生态系统关键功能等方面的演变趋势。

#### 6.5 变化环境下山区生态经济可持续发展模式

西南山区存在诸多经济发展制约因素:河谷地带的气候干热与不断增强的洪水和泥石流灾害、中低山带频发的滑坡崩塌等山地灾害与日趋尖锐的生态-经济矛盾、高山带脆弱的生态变化与生态服务提升的矛盾等等。基于国家生态屏障构建与生态文明发展战略要求,迫切需要该区域传统农耕经济转型,这就需要寻求生态经济转型模式与适宜性生态经济技术体系,发展西南干热河谷等脆弱环境下的民族生态经济可持续发展模式。这些面临的挑战还直接与西南山区实现精准扶贫和全面小康战略目标等有关,在国家层面具有极其重要的战略意义。为此,未来需要强化全球变化下的西南山地生态屏障构建与山区可持续发展技术体系与模式的研发与示范。着力在山地生态演化调控和生态功能维护的新型产业技术体系、山区不同生态功能区生态经济发展模式与转型技术体系,获得数个成效显著的生态经济技术体系与模式,在关键生态系统保育、区域生态功能屏障维护和山地经济社会可持续发展中发挥显著作用。

#### 参考文献 (References)

- [1] FAO. International Year of Mountains: Concept paper [C]. Rome, 2000.
- [2] 方精云,沈泽昊,崔海亭. 试论山地的生态特征及山地生态学的研究内容 [J]. 生物多样性, 2004, 12(1): 10 - 19 [FANG Jingyun, SHEN Zehao, CUI Haiting. Ecological characteristics of mountains and research issues of mountain ecology [J]. Biodiversity Science, 2004, 12(1): 10 - 19]
- [3] HUBER U M, BUGMANN H K M, REASONER M A. Global change and mountain regions [M]. Netherlands, Springer, 2005.
- [4] YANG Y, WANG G, KLANDERUD K, et al. Responses in leaf functional traits and resource allocation of a dominant alpine sedge (*Kobresia pygmaea*) to climate warming in the Qinghai-Tibetan Plateau permafrost region [J]. Plant and Soil, 2011, 349: 377 - 387.
- [5] LI N, WANG G, YANG Y, et al. Plant production, and carbon and nitrogen source pools, are strongly intensified by experimental warming in alpine ecosystems in the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2011, 43: 942 - 953.
- [6] YANG Y, GUO J, WANG G, et al. Effects of drought and nitrogen addition on photosynthetic characteristics and resource allocation of *Abies fabri* seedlings in eastern Tibetan Plateau [J]. New Forests, 2012, 43: 505 - 518.
- [7] 羊留冬,杨燕,王根绪,等. 短期增温对贡嘎山峨眉冷杉幼苗生长及其 CNP 化学计量学特征的影响 [J]. 生态学报, 2011, 31(13): 3668 - 3676 [YANG Liudong, YANG Yan, WANG Genxu, et al. Short-term effects of warming on growth and stoichiometrical characteristics of *Abies fabri* (Mast.) Craib seedling in Gongga mountain [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(13): 3668 - 3676]
- [8] 陈晓丽,王根绪,杨燕,等. 贡嘎山不同林龄峨眉冷杉种子雨及土壤种子库 [J]. 生态学杂志, 2013, 32(5): 1141 - 1147 [CHEN Xiaoli, WANG Genxu, YANG Yan, et al. Seed rain and soil seed bank of *Abies fabri* forests with different ages in Gongga Mountain, Southwest China [J]. Chinese Journal of Ecology, 2013, 32(5): 1141 - 1147]
- [9] YANG Y, WANG G, YANG L, et al. Effects of drought and warming on biomass, nutrient allocation, and oxidative stress in *Abies fabri* in eastern Tibetan plateau [J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2013, 32(2): 298 - 306.
- [10] RAN F, ZHANG X, ZHANG Y, et al. Altitudinal variation in growth, photosynthetic capacity and water use efficiency of *Abies faxoniana* Rehd. et Wils. seedlings as revealed by reciprocal transplantations [J]. Trees, 2013, 27(5): 1405 - 1416.
- [11] 李祖凰,曹同,于晶,等. 四川省藓类植物新记录 [J]. 广西植物, 2011, 6: 8 - 11 [LI Zhuhuang, CAO Tong, YU Jing, et al. New records of mosses to Sichuan Province, China [J]. Guihai, 2011, 6: 8 - 11].
- [12] SUN SQ, WU YH, WANG GX, et al. Bryophyte species richness and composition along an altitudinal gradient in Gongga Mountain, China [J]. PLoS ONE, 2013, 8: e58131.
- [13] SUN S Q, LIU T, WU Y H, et al. Ground bryophytes regulate net

- soil carbon efflux: evidence from two subalpine ecosystems on the east edge of the Tibet Plateau [J]. *Plant and Soil*, 2017, **417**: 363–375.
- [14] SUN S Q, WANG G X, CHANG S X, et al. Warming and nitrogen addition effects on bryophytes are species- and plant community-specific on the eastern slope of the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Vegetation Science*, 2017, **28**: 128–138.
- [15] 冉飞, 梁一鸣, 杨燕, 等. 贡嘎山雅家埂峨眉冷杉林种群时空动态[J]. *生态学报*, 2014, **34**(23): 6872–6878 [RAN Fei, LIANG Yiming, YANG Yan, et al. Spatial-temporal dynamics of an *Abies fabri* population near the alpine treeline in the Yajiageng area of Gongga Mountain, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, **34**(23): 6872–6878]
- [16] WANG W, JIA M, WANG G, et al. Rapid warming forces contrasting growth trends of subalpine fir (*Abies fabri*) at higher- and lower-elevations in the eastern Tibetan Plateau [J]. *Forest Ecology and Management*, 2017, **402**: 135–144.
- [17] LI M H, WANG S G, CHENG G W, et al. Mobile carbohydrates in Himalayan treeline trees I. Evidence for carbon gain limitation but not for growth limitation [J]. *Tree Physiology*, 2008, **28**: 1287–1296.
- [18] LI M H, XIAO W F, SHI P L, et al. Nitrogen and carbon source-sink relationships in trees at the Himalayan treelines compared with lower elevations [J]. *Plant, Cell and Environment*, 2008, **31**: 1377–1387.
- [19] ZHU W Z, WANG S G, YU D Z, et al. Elevational patterns of endogenous hormones and their relation to resprouting ability of *Quercus aquifolioides* plants on the eastern edge of the Tibetan Plateau [J]. *Trees*, 2014, **28**: 359–372.
- [20] 罗辑. 亚高山暗针叶林区冰川退缩迹地植被原生演替[M]. 贡嘎山森林生态系统研究. 成都: 成都科技大学出版社, 1997, 76–80 [LUO Ji. Primary succession on deglaciation slash in subalpine dark coniferous forest Zone [M]. In: Zhong Xianghao, Luo Ji, Wu Ning, et al. (eds.) *Researches of the Forest Ecosystems on Gongga Mountain*. Chengdu: university of electronic science and technology press. pp. 76–80]
- [21] WU Y H, ZHOU J, YU D, et al. Phosphorus biogeochemical cycle research in mountainous ecosystems [J]. *Journal of Mountain Sciences*, 2013, **10**: 43–53.
- [22] BING H J, WU Y H, ZHOU J, et al. Stoichiometric variation of carbon, nitrogen and phosphorus in soils and its implication for nutrient limitation in alpine ecosystem of Eastern Tibetan Plateau [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2016, **16**: 405–416.
- [23] ZHOU J, WU Y H, PRITZEL J, et al. Changes of soil phosphorus speciation along a 120-year soil chronosequence in the Hailuoguo Glacier retreat area (Gongga Mountain, SW China) [J]. *Geoderma*, 2013, **195–196**: 251–259.
- [24] 杨子江, 邴海健, 周俊, 等. 贡嘎山海螺沟冰川退缩区土壤序列矿物组成变化. *土壤学报*, 2015, **52**(3): 507–516 [YANG Zijiang, BING Haijian, ZHOU Jun, et al. Variation of mineral composition along the soil chronosequence at the Hailuoguo glacier foreland of Gongga Mountain. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, **52**(3): 507–516]
- [25] ZHOU J, BING H J, WU Y H, et al. Rapid weathering processes of a 120-year-old chronosequence in the Hailuoguo Glacier foreland, Mt. Gongga, SW China [J]. *Geoderma*, 2016, **267**: 78–91.
- [26] WANG J P, WU Y H, ZHOU J, et al. Carbon demand drives microbial mineralization of organic phosphorus during the early stage of soil development [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2016, **52**: 825–839.
- [27] YANG Y, WANG G, SHEN H, et al. Dynamics of carbon and nitrogen accumulation and C: N stoichiometry in a deciduous broadleaf forest of deglaciated terrain in the eastern Tibetan Plateau [J]. *Forest Ecology and Management*, 2014, **312**: 10–18.
- [28] CHENG G W, LUO J. Succession features and dynamic simulation of subalpine forest in Gongga Mountain, China [J]. *Journal of Mountain Science*, 2014, **1**: 29–37.
- [29] CHENG G W, SUN J, SHA Y K, et al. The altitudinal belts of subalpine virgin forest on Mt. Gongga simulated by a succession model [J]. *Journal of Mountain Science*, 2014, **11**(6): 1560–1570.
- [30] 霍常富, 程根伟, 鲁旭阳. 气候变化对贡嘎山森林原生演替影响的模拟研究[J]. *北京林业大学学报*, 2010, **32**(1): 1–6 [HUO Changfu, CHENG Genwei, LU Xuyang. Dynamic simulation of climate change impacts on forest primary succession in Gongga Mountain, southwestern China [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2010, **32**(1): 1–6]
- [31] 霍常富, 鲁旭阳, 程根伟. 中国西南山地森林演替模型的参数估计与模拟检验[J]. *东北林业大学学报*, 2012, **40**(1): 78–83 [HUO Changfu, LU Xuyang, CHENG Genwei. Parameter identification and simulation verifying of southwestern forest succession model [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2012, **40**(1): 78–83.
- [32] SUN X, HUANG M, WANG G. The asynchronous response of carbon gain and water loss generate spatio-temporal pattern of WUE along elevation gradient in southwest China [J]. *Biogeosciences Discussions*, 2016, **10**: 1–46.
- [33] 王根绪, 邓伟, 杨燕, 等. 山地生态学的研究进展、重点领域与趋势[J]. *山地学报*, 2011, **29**(2): 129–140 [WANG Genxu, DENG W, YANG Y, et al. The advances, priority and developing trend of alpine ecology [J]. *Journal of Mountain Science*, 2011, **29**(2): 129–140]
- [34] ZHANG T, WANG G, YANG Y, et al. Non-growing season soil CO<sub>2</sub> flux and its contribution to annual soil CO<sub>2</sub> emissions in two typical grasslands in the permafrost region of the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *European Journal of Soil Biology*, 2015, **71**: 45–52.
- [35] CHEN X, WANG G, ZHANG T, et al. Effects of warming and nitrogen fertilization on GHG flux in the permafrost region of an alpine meadow [J]. *Atmospheric Environment*, 2017, **157**: 111–124.
- [36] WANG G X, RAN F, CHANG R Y, et al. Variations in the live biomass and carbon pools of *Abies georgei* along an elevation

- gradient on the Tibetan Plateau, China [J]. *Forest Ecology and Management*, 2014, **329**: 255–263.
- [37] SUN X, WANG G, HUANG M, et al. Effect of climate change on seasonal water use efficiency in subalpine *Abies fabri* [J]. *Journal of Mountain Science*, 2017, **14**(1): 142–157.
- [38] LU X, CHENG G. Climate change effects on soil carbon dynamics and greenhouse gas emissions in *Abies fabri*, forest of subalpine, southwest China [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, **41**(5): 1015–1021.
- [39] LIN Y, WANG G X, GUO J Y, et al. Quantifying evapotranspiration and its components in a coniferous subalpine forest in Southwest China [J]. *Hydrological Processes*, 2012, **26**(20): 3032–3040.
- [40] SUN X, WANG G, LIN Y, et al. Intercepted rainfall in *Abies fabri* forest with different-aged stands in Southwest China [J]. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 2013, **37**(4): 495–504.
- [41] 孙向阳, 王根绪, 吴勇, 等. 川西亚高山典型森林生态系统截留水文效应[J]. *生态学报*, 2013, **33**(2): 501–508 [SUN Xiangyang, WANG Genxu, WU Yong, et al. Hydrologic regime of interception for typical forest ecosystem at subalpine of Western Sichuan, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, **33**(2): 501–508]
- [42] 程根伟, 余新晓, 赵玉涛, 等. 山地森林生态系统水文循环与数学模拟[M]. 科学出版社, 2004 [Cheng Genwei, Yu Xinxiao, Zhao Yutao, et al. *The Hydrological Cycle and Its Mathematical Models of Forest Ecosystem in Mountains* [M]. The Science Press. 2004]
- [43] ZHANG G, PAN B, CAO B, et al. Elevation changes measured during 1966–2010 on the monsoonal temperate glaciers' ablation region, Gongga Mountains, China. *Quaternary International*, 2015, **371**: 49–57.
- [44] 刘巧, 刘时银, 张勇, 等. 贡嘎山海螺沟冰川消融区表面消融特征及其近期变化分析[J]. *冰川冻土*, 2011, **33**(2): 227–236 [LIU Qiao, LIU Shiyin, ZHANG Yong, et al. Surface ablation features and recent variation of the lower ablation area of the Hailuoguo Glacier [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, **33**(2): 227–236]
- [45] ZHANG Y, FUJITA K, LIU S, et al. Multi-decadal ice-velocity and elevation changes of a monsoonal maritime glacier: Hailuoguo glacier, China [J]. *Journal of Glaciology*, 2010, **56**(195): 65–74.
- [46] 吕玉香, 王根绪. 贡嘎山东坡不同流域河川径流特征对比分析[J]. *山地学报*, 2008, **26**(2): 196–204 [Lü Yuxiang, WANG Genxu. Comparative analysis on the annual runoff characteristics of different basins in the eastern slope in Gongga Mountain [J]. *Journal of Mountain Science*, 2008, **26**(2): 196–204]
- [47] LIU Q, LIU S, ZHANG Y, et al. Recent shrinkage and hydrological response of Hailuoguo Glacier, a monsoonal temperate glacier in east slope of Mount Gongga, China [J]. *Journal of Glaciology*, 2010, **56**(196): 215–224.
- [48] 刘巧, 刘时银. 冰川冰内及冰下水系研究综述[J]. *地球科学进展*, 2012, **27**(6): 660–669 [LIU Qiao, LIU Shiyin. Progress in the study of englacial and subglacial drainage system of glaciers [J]. *Advances in Earth Science*, 2012, **27**(6): 660–669]
- [49] 刘巧, 刘时银. 温冰川冰内及冰下水系季节演化及其水文学分析[J]. *冰川冻土*, 2009, **31**(5): 857–865 [LIU Qiao, LIU Shiyin. Seasonal evolution of englacial and subglacial drainage system of temperate glacier revealed by hydrological analysis [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009, **31**(5): 857–865]
- [50] LIU Q, LIU S. Seasonal evolution of the englacial and subglacial drainage systems of a temperate glacier revealed by hydrological analysis [J]. *Sciences in Cold and Arid Regions*, 2010, **2**(1): 51–58.
- [51] 王杰, 潘保田, 张国梁, 等. 贡嘎山东坡中更新世晚期以来冰川作用年代学研究[J]. *中国科学*, 2012, **42**(12): 1889–1900 [WANG Jie, PAN Baotian, ZHANG Guoliang, et al. Late quaternary glacial chronology on the eastern slope of Gongga Mountain, eastern Tibetan Plateau, China [J]. *Science China: Earth Sciences*, 2012, **42**(12): 1889–1900]
- [52] 郑本兴, 马秋华. 贡嘎山区全新世冰川变化与泥石流发育的关系[J]. *山地研究*, 1994, **12**(1): 1–8 [ZHENG Benxing, MA Qiuhua. Relationship between the glacier variation and the debris flow development of the Holocene in the Gongga mountainous region [J]. *Mountain Research*, 1994, **12**(1): 1–8]
- [53] FAN Z X, BRAUNING A, CAO K F. Tree-ring based drought reconstruction in the central Hengduan Mountains region (China) since AD 1655 [J]. *International Journal of Climatology*, 2008, **28**(4): 1879–1887.
- [54] 张文敬, 李同阳, 李伟. 海螺沟现代冰川对气候变化的响应[M]. 青藏高原东缘环境与生态. 成都: 四川大学出版社. 2001, 111–118 [ZHANG Wenjing, LI Tongyang, LI Wei. Response of the Hailuoguo modern glacier to climate change [M]. in: *The Environment and Ecosystem in the Eastern Edge of Qinghai-Xizang Plateau*. Chengdu: Sichuan University Press. 2001, pp. 111–118]
- [55] LIU X, ZHAO L, CHEN T, et al. combined tree-ring width and  $\delta^{13}C$  to reconstruct snowpack depth: a pilot study in the Gongga Mountain, west China [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2010, **103**(1–2): 133–144.
- [56] 王根绪, 刘国华, 沈泽昊, 王文志. 山地景观生态学研究进展[J]. *生态学报*, 2017, **37**(12): 3967–3981 [WANG Genxu, LIU Guohua, SHEN Zehao, WANG Wenzhi. Research progress and future perspectives on the landscape ecology of mountainous areas [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37**(12): 3967–3981]

# Mountainous Supergenic Eco-Environment Processes under Global Change: Cognition and Challenges

—Thirty Years of the Observation and Experimental Station of Alpine Ecosystem, Chinese Academy of Sciences: a Historical Perspective

WANG Genxu<sup>\*</sup>, CHENG Genwei, LIU Qiao, SUN Shouqing, RAN Fei

(*Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610014 China*)

**Abstract:** Long-term located observation on the supergenic eco-environment processes in mountain area is of great importance to improve our understanding on the processes and mechanisms of the supergenic eco-environmental changes, the evolution of ecosystems in mountainous region as well as its response to the changing environment, and to promote the development of the economy and society in mountain areas, which are key to achieve the national strategic goals to develop the country. In this study research progresses achieved by Gongga Mountain Observation and Experimental Station of Alpine Ecosystem, Chinese Academy of Sciences in the past 30 yrs (since it was established) were summarized, which include: 1) the response and adaptation of typical alpine ecosystems to climate change; 2) the modeling of alpine primary vegetation succession, 3) the elementary biogeochemical cycling, 4) the dynamics of maritime glacier and its relationship with climate change; and 5) the exploration and protection of mountainous resources. Additionally, several research aspects will be conducted in the future are prospected as: 1) the building of integrated observation network; 2) studies on the mechanisms of the forming and/or rebuilding of altitudinal gradients in alpine ecosystem; 3) the comparison between the high and low longitudinal mountainous ecosystems; 4) the mountainous ecological process modeling; and 5) the exploration on modes for the sustainable development of ecology and economy in mountain areas.

**Keywords:** Gongga Mountain Observation and Experimental Station of Alpine Ecosystem, Chinese Academy of Sciences; supergenic eco-environment processes; Progresses and achievements; future prospects

---

## 封面照片: 贡嘎山东坡海螺沟: 现代冰川与森林景观

贡嘎山地区的海洋性冰川具有低海拔与活动性强特征,其冰舌下伸至峨眉冷杉林线以下,形成独特的冰川与森林相互交错的景观,同时冰川退缩前缘地带植被演替快,成为研究森林生态系统原生演替的天然实验室。