

# 山地生态学的研究进展、重点领域与趋势

王根绪, 邓伟, 杨燕, 程根伟

(中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041)

**摘 要:** 在全球变化背景下, 山地生态系统的剧烈变化不仅对陆地生态系统格局与功能产生较大影响, 而且也显著制约着人类社会的可持续发展。在明确山地生态学研究的重要性和迫切性的基础上, 通过对国际上山地生态学研究进展的全面综述, 阐明了现阶段山地生态学研究的重点领域和前沿科学问题。对我国山地生态学研究的重要性进行了系统分析, 并讨论了研究现状及其存在的主要问题。认为作为世界第一山地大国, 我国山地生态科学研究应得以重视和发展, 以应对全球变化对我国生态和环境安全的影响。

**关键词:** 山地生态学; 研究进展; 重点领域; 前沿问题; 重要性

**中图分类号:** Q149, Q948, X14, X17

**文献标识码:** A

占地球陆地面积 24% 的山地, 提供了陆地 80% 以上的淡水资源(在干旱和半干旱区甚至高达 90% 以上)和绝大部分能源、矿产资源与生态系统服务功能, 在人类社会生存与发展中具有重要作用<sup>[1]</sup>。山地因其具有较大的绝对高程和相对高度, 不仅反映和浓缩了水平自然带的自然地理和生态学特征, 而且其高度异质化的生境、相对较低的人类干扰强度, 成为大量濒危物种的避难所和新兴植物区系分化繁衍的摇篮, 是地球上生物多样性最为丰富的陆地单元和全球生物多样性保护的重点区域<sup>[2-3]</sup>。

正是由于较大的垂直梯度和多样的环境敏感带, 使得全球变化对山地生态系统结构、过程和功能以及植被分布格局和演替进程等方面的影响, 相比平原区更加显著和迅速, 其结果是导致山地人类生存环境发生更加深刻的变化并制约平原区的可持续发展<sup>[4-5]</sup>。山地生态系统具有集中而丰富的生物气候垂直带谱, 相对丰富的古生态学资源, 普遍的生态驱动机制以及最少的扰动等诸多特点, 使得几乎所有中低纬度陆地的高山生态系统都可潜在地作为生物对全球变化响应的敏感指示器。因此, 山地系统对全球变化的响应与适应成为当前国际全球变化研

究的热点领域和重点关注区域<sup>[6-7]</sup>。掌握国际山地生态科学研究进展, 了解这一领域的前沿问题和发展趋势, 有助于认识我国在这一领域研究存在的问题与挑战, 更好地促进我国山地生态学的发展。

## 1 开展山地生态学研究的重要性与迫切性

山地生态学是研究在山地这一特定环境中, 不同生命层次的生态现象和过程的生态学领域, 是生态学、自然地理学以及其交叉学科——地植物学等的重要分支学科, 其诞生几乎与近代生态学和自然地理学同步<sup>[2]</sup>。但直到 20 世纪 90 年代, 在全球变化研究迅猛发展背景下, 山地生态系统对全球变化的高度敏感性及其显著的区域乃至全球环境与社会效应, 山地生态学才得以在全球范围内广泛重视并得到较大发展。

### 1.1 人类社会需求

探索全球变化对陆地生态系统的可能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区域未来陆地生态系统的发展趋势, 是寻求人类

收稿日期 (Received date): 2010-02-28。

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金项目 (40730634)、中国科学院知识创新重要方向项目 (KZCX2-YW-331) 资助。[Supported by the project of Natural Science Foundation of China (407306340) and the project of Knowledge Innovation of CAS (KZCX2-YW-331).]

作者简介 (Biography): 王根绪, 男, 研究员, 博士。长期从事全球变化生态学与生态水文学研究 [Wang Genxu, male, Professor.]

社会适应全球变化的可行途径以及制定减缓全球变化影响对策的基础<sup>[4,8]</sup>。山地是全球变化的敏感地带,又是对人类社会发​​展极其重要的具有多种不可替代支撑作用的陆地单元,山地对全球变化的脆弱性不仅体现在山地重要的生物多样性与生态服务功能的丧失,而且直接威胁山区人类社会的安全与发展,并通过山区与平原区的密切联系制约整个人类社会的发展。

1. 山地生态系统的变化加剧了人类社会在全球变化下的生态安全与生物资源供给风险,生态屏障与生态服务的丧失进一步强化了人类发展的多重挑战。

全球陆地森林的 28% 是山地森林,陆地森林覆盖面积持续减少,以热带森林递减率最大,为年均 1.1%<sup>[9]</sup>,但是山地森林的变化显示出显著的空间差异性与不确定性,分布范围的减少与扩张并存。在这个宏观背景下,高山寒温带森林树种的分布变化和林线的向上迁移似乎具有普遍性,并与北极地区灌丛和森林带的迁移变化相对应<sup>[10-11]</sup>。气候变暖导致生物物种多样性减少在环北极地区多数样带上的观测事实得到验证,高山生物多样性应对气候增温变化的减少以低海拔植物种类变化最显著,并具有明显的物种向上迁移的变化趋势,在欧洲西部 171 种森林植物的调查表明,随气温升高的向上迁移速率达到每 29 m/(10 a)<sup>[12]</sup>。由此产生的担忧是随气候持续变暖,高山植物将可能无处逃逸而濒于灭亡。

在欧洲 Alps 山区的研究表明,当温度变化幅度超过 1.5 ~ 2.0℃,山地植被将发生较大规模的变化。同时,由于气温变化往往伴随降水变化,如果气温变化达到 2 ~ 3℃,植被分布与结构的较大规模改变将十分迅速,可能在短短几十年时间内完成。一方面,世界范围内现阶段大部分山地植被格局与目前的气候格局和人类土地利用格局并不对称,表明过去 30 年来山区气候的变化导致大量植被系统正处于调整变化过程中;另一方面,全球尺度上,基于 A1BCO2 排放情景预测的全球陆地生物群落的气温变率分布,山地生物群落的气温变率是最低的,认为在未来(下个世纪)将可能有大量陆地生物物种逃逸到山区,山地是陆地生物的最后避难场所<sup>[13]</sup>。这种演化的结果将会产生何种生态的和经济社会的影响,是人们急需掌握的关键问题<sup>[14]</sup>。

山地系统对人类社会的生存与发展具有重要的

生态屏障作用,包括生物资源供给、生态服务功能以及自然灾害抵御等多方面。山地生态系统的健康、稳定与可持续是山地生态屏障安全的基础。在全球变化下山地生态系统的上述剧烈响应,将严重威胁山地生态屏障的安全,其对人类社会发​​展产生的巨大挑战还在于这种变化的后果与影响的不确定性,我们并不十分明确山区大量生物物种的消失、植被分布格局的变化在哪些方面、多大程度上直接或间接威胁人类的生存与发展。

2. 山地生态效应及其变化引发区域乃至全球性环境灾难的潜在风险不断加剧,人类社会面临日趋严重的水安全和环境安全胁迫。

山地是淡水资源的发源区,地球上湿润地区超过 50%、干旱与半干旱区 90% 以上的淡水资源来源于山区供给,是下游地区的水塔<sup>[4]</sup>。山区的水循环不仅受制于气候条件,也与植被组成与分布格局关系密切。尽管植被对山区流域径流量的贡献尚缺乏足够认识,但是对山区流域径流过程、时空分布的调控作用是肯定的,山区植被类型、组成结构与稳定性对山区水文过程具有重要影响,因此山地生态系统的水源涵养功能是生态服务的重要组成<sup>[4]</sup>。山地生态系统对气候变化的响应必将引起山区水循环和山区流域水文过程的变化,包括径流的时空分布格局、洪水过程与土壤侵蚀等,对流域乃至区域的水资源供给、旱涝灾害控制以及土壤侵蚀等环境问题的防治等将产生较大影响,对流域水安全和环境安全产生威胁。

多样的和具有良好结构的植被覆盖,将形成有效的山坡物理边界以保护生态系统免受自然灾害如各类崩塌(岩崩、雪崩等)的机械损伤,反过来促进植被的稳定和繁衍、土壤发育等。植被的多样性和高组织结构及其形成的复杂植物根系,是对山坡稳定性的最好保障体系,能有效防治山坡地表物质的外营力搬运和斜坡失稳,减少或减缓泥石流、滑坡以及土壤侵蚀等灾害风险<sup>[15]</sup>。气候变化对山地植被的影响,加上山地冰冻圈要素如积雪、冰川和冻土等对气候变化的高度敏感性,山地自然灾害发生的风险进一步加剧。我们急需要了解在植被、冰冻圈要素以及降水格局等众多因素协同作用下,山地严重的地质灾害发生可能趋势、时空分布规律及其可能的影响程度等。这一问题的重要还在于山地地表物质(岩体、坡面土体、积雪与冰川等)的大量和急速迁移变化将无疑成为改变山地植被空间格局与生物

多样性等的另一个重要因素。尽管植被与气候变化协同促进山地自然灾害发生与高强度破坏的风险是山区经济社会发展面临的最严重制约因素之一,但是这一研究领域还缺乏充足的数据支持,因此,有关植被与山区安全性假说成为全球山地生物多样性评估(GMBA)研究促进计划中的一个主要议题<sup>[15-16]</sup>。

山地森林是北半球十分重要的陆地生态系统碳汇,以美国为例,模型模拟与遥感监测结果表明,其陆地生态系统碳汇的70%以上是由山地森林贡献的<sup>[17]</sup>。山地森林生态系统的碳汇能力及其变化不仅与山区森林植被分布格局及生长季候动态有关,而且明显受到山区积雪和土壤水分动态变化的影响<sup>[18]</sup>。基于全球变化对山地环境与生态系统的显著影响,我们迫切需要明确山地生态系统碳汇能力已经发生了何种变化,未来又会发生何种变化趋势,这些变化对全球陆地生态的碳交换产生何种影响等一系列重大问题。除了碳交换以外,山地生态系统变化对气候的反馈作用也是一个值得关注的对全球环境产生较大影响的问题之一。近年来国内外一些研究表明,在较大区域尺度上的土地利用/植被覆盖改变,通过影响环流和改变地表能量平衡状态等,对降水和气温等将产生较大影响<sup>[19-20]</sup>。山地植被覆盖变化对气候的反馈影响要比平原区更加显著,青藏高原地表覆盖变化对东亚季风的显著影响就是例证。尽管大部分认识都是基于模型模拟和统计关系的分析结果,但是区域尺度地表植被覆盖变化对区域降水与气温的时空分布格局的影响是可以肯定的事实,问题是我们如何应对由于山地植被覆盖变化导致的区域旱涝灾害以及较大尺度上气候环境的变化,是关系到保障经济社会可持续发展的重要命题。

## 1.2 全球变化研究和山地生态学学科发展需求

1. 山地生态系统研究对于全球变化学科研究与发展的重要性

在全球变化与陆地生态系统响应研究中,为了揭示陆地生态系统对全球变化的响应与适应,GCTE/IBGP和TEMS/GTOS在全球范围内先后设立了多个陆地生态观测与试验研究样带,在理解生物圈在地球系统运作中的重要作用、全球变化对陆地生态系统的影响方式与作用机制等方面取得了一系列重大成果,成为现阶段对过去气候变化的陆地生态影响认知的主要证据来源<sup>[8,21]</sup>。这些样带的布设总是寻求某一个气候因子(如气温、降水)的空间梯度变化而稳定其他气候因子,以实现从气候变

化下生态系统变异的了解。山地较大的地貌高差形成短距离内较大的生态系统环境变化梯度,所具有的多气候要素的较大梯度变化和丰富的生物气候分带,为研究现实气候变化的多因素协同影响提供了有利条件。在气候变化幅度上可以在很短的水平距离内从亚热带到寒带跨越整个北半球,是对水平植被分带的高度浓缩。在气候因子方面具有多个因子同步变化的现实情景,同时人类干扰相对较小,在许多高山地带保持了较完整的自然生态系统。因此,山地生态学研究是全球变化研究最为重要的分支学科,得到几乎所有全球主要研究计划的关注,继IGBP、IHDP和GTOS三大计划委员会联合提出全球变化——山地研究倡议以后,GTOS提出了专门针对山地生态系统的观测研究系统GLORIA, DIVERSITAS计划专门制定了MBA计划等<sup>[3,6]</sup>。

在全球尺度认识气候变化对陆地生态系统的影响,需要三个基本条件:一是全球尺度上的生物地理维,能够揭示水平方向上生物地理分带,强调植被的水平气候分异;二是在区域尺度上生物气候维,能够反映垂直方向上生物气候分带规律,关注高山和山区生态系统(如林线气候带上下的植被分异等);三是在时间尺度维,解释过去环境变化对现在生态系统结构与功能以及生物多样性等影响的作用与贡献,并提供必要依据预测分析未来全球变化情境下的可能影响。山地生态系统是陆地上能够满足这些要求的最便利区域,其优越性还在于山区、尤其是高山地区保留了较为丰富的和相对完好的古气候与古生物变化证据,在地质事件如构造运动和山地隆起等对区域生态系统影响,如何协同气候变化的作用中,提供了可能唯一的重要条件<sup>[15-16]</sup>。在全球变化对陆地生态系统影响研究中,普遍采用的人工气候控制模拟试验方法一直占据主导地位,包括田间温室法、被动开顶气室法(OTC)、红外线辐射或反射器法等,都存在一定程度改变了原有自然能量、风场以及土壤湿度等缺陷,导致温度单一因素影响结果的不确定性<sup>[22]</sup>;另外一个问题就是全球变化对陆地生态系统的实际影响并不是温度单一因素,而往往是包括水分、辐射以及氮沉降等诸多因素协同作用的结果<sup>[23]</sup>。为此,利用山地环境因子的自然梯度进行气候变化的控制试验,已受到人们越来越多的关注。通过沿环境因子(如温度、水分等)梯度的控制实验,不仅可以消除上述多种人工增温方式存在的弊端,模拟试验更加接近自然状态,而且可以实现从局

部(Local)到区域(Regional)尺度的转换,同时以空间代替时间来反映植被和土壤对环境变化的长期响应情况<sup>[24]</sup>。因此,利用山地垂直带谱样地的自然观测与试验,我们可以获得更加接近客观实际的有关全球气候变化对陆地生态影响的诸多问题的答案,而且可能是最为廉价的试验研究途径<sup>[3, 15]</sup>。

2. 山地生态学自身发展的需求

山地生态学在近年来的发展,得益于全球变化研究对于山区的关注和相关研究在山区的不断深入。山地因其特殊的地形地貌和生物气候格局,形成了独特的陆地生态系统分布格局,过去山地生态学的内涵聚焦于地形地貌与各种生态现象和过程的相互作用,主要学科领域可以归纳为物种分化和适应的地形效应、地貌过程与群落演替、生物群落垂直带谱的地理分异及其机制、山地岛屿生物地理学、山地生物多样性格局与形成机制等<sup>[2]</sup>。在人类尺度上,这些领域的大部分科学问题是相对静态的、以山地生态的地带性本质研究山地生态过程。在全球变化背景下,显著改变的陆地生态系统结构、多样性等在不断减少生态服务,人类社会的福祉和发展面临最为严重而深远的挑战<sup>[25]</sup>。现阶段人类社会所面临的共同主题是:探索全球变化对陆地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不同区域未来陆地生态系统的演变趋势及其影响。这些关键科学命题也不可避免的成为山地生态学的主要内容,推动了山地生态学将全球变化下的格局与过程研究、山区气候-土地利用-生态系统间的相互作用关系研究等树立为其核心主题<sup>[3-4, 6]</sup>。如何将长期的山地生物地理学的生态过程与现代山地表生生物过程相结合,将基于地形与地貌驱动的物种分化与适应过程与气候变化的响应

与适应过程相结合,将全球水平样带的研究与山地垂直生态带谱研究相结合等,无疑将是未来山地生态学自身发展的主要方向。

2 国际山地生态科学研究进展

自 20 世纪 90 年代以来,在 MRI、GLORIA、GM-BA、GLOCHAMORE 等诸多国际山地研究计划相继实施驱动下,国际山地生态学研究得以迅速发展<sup>[26]</sup>,纵观国际上近年来的山地生态学科研究的主要进展,可以从几个方面来归纳。

2.1 全球山地环境变化监测网络系统建设

人类最早针对山地环境变化的监测可以回溯到 19 世纪,大致在 1880 年前后,在欧洲部分山区开展了以气候为主要目标的观测研究。这些观测系统为今天欧洲山地研究提供了超过 1 个世纪的观测数据积累,是世界范围内山地气象观测数据系列最长的区域。另一个重要的山地环境监测计划是 1894 年由国际冰川联合会建立的全球冰川变化监测计划,旨在掌握世界范围内主要冰川的动态变化和研究其变化机理,该计划持续到现在已经获得了近 100 多 a 的冰川变化数据,尤其是大部分冰川退缩过程的监测结果,成为全球变暖最为直接的证据<sup>[27-28]</sup>。过去对于山地生态方面的观测较少,仅在 1835—1953 年间,在欧洲 Alps 山顶进行过一段时间的植物动态分布观测,在最近对原来这些观测点的重新调查后,发现大量脉管植物大幅度向上迁移,是 19 世纪以来气候变暖导致的植物分布变化的直接证据<sup>[29]</sup>。这些发现,结合北极地区观测到的植被分布迁移现象,促使科学家考虑在全球范围内开展系统观测高山生态系统变化的问题。

表 1 截至 2009 年 GLORIA 计划在全球的典型观测山地分布情况

Table 1 Distribution of GLORIA stations in worldwide since 2009

区域	已在运行 - 2002 年前	已在运行 - 2004 年后	完成样地 调查和建设	正在建设中	筹建中	有兴趣加盟
澳洲	1	3	1	0	0	0
欧洲	17	8	7	4	0	5
亚洲	0	3	6	6	3	6
北美洲	3	11	2	4	4	3
南美洲	0	0	6	9	4	4
非洲	0	0	0	0	3	2
总计	21	25	22	23	14	20

在 IGBP、IHDP 和 GTOS 联合发起国际山地研究行动计划之后,1999 年由 GTOS 计划联合 MRI/IGBP 共同倡导并实施了全球山地环境观测研究计划 (GLORIA),其主要目的是在全球范围内建立从极地到热带生命带谱中高山环境变化的长期观测网络,以获取统一的关于全球变化对自然生态系统影响的长期观测数据<sup>[27]</sup>。该计划在 2001 年正式启动,到 2009 年在全球范围内已经建立了初具规模的网络体系,如表 1 所示,全球已经建成投入运行的典型观测山地点有 46 个,主要分布在欧洲和北美洲地区。正在建设和筹建中的典型山地点有 37 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。GLORIA 制定了统一的山地生态系统观测方法、监测指标,并构建了信息共享平台<sup>[30]</sup>。对已经建成运行的 46 个山地点,取得的主要进展是两方面,一是开展了高山带谱(林线以上至寒漠)标准样带统一方法的生物多样性调查和长期观测,并进行多山地样带的对比;二是初步发现了部分山地物种向上迁移的现象以及不同山地最为敏感的物种等<sup>[31]</sup>。

## 2.2 全球山地生物多样性变化监测与评估

国际 DIVERSITAS 在 2000 年设立了全球山地生物多样性评估计划 (G MBA)。该计划与 GLORIA 密切合作,在国际主要山地系统开展了较大规模的以高山顶端植物带谱为主要对象的生物多样性调查和监测<sup>[15]</sup>。综述近年来的观测与研究进展,可以归纳为如下两方面:

### 1. 山地生物多样性的地形效应

在宏观尺度上,山地生物物种多样性分布与地形变化具有明确的规律:随海拔增加,物种丰富度减少;从热带到寒带大尺度范围内,随纬度增加,相近高度的物种丰富度和物种密度显著降低。这一物种分布的 Rapoport 法则不仅具有普遍性,而且在全球气候变化背景下,尽管不同高度物种丰富度数值发生变化,但其总体格局仍然没有改变<sup>[2, 16]</sup>。

在相对较小的区域尺度上,不同山地生物多样性的分布存在一定差异性,在中低纬度山地普遍存在的特有物种多度随海拔增加而增加的现象,在中高纬度地区并不具有普适性,如高加索地区高山植被带谱的特有种在林线附近多度最大,随海拔增加显著减少,在高山带上部、雪线植被带下部达到最小;在 Alps 中部,在林线到高山带谱上部虽然存在特有物种多度略有增加态势,但差异不显著,在雪线

植被带谱甚至缺少其特有物种<sup>[32]</sup>。在高山带谱,微地形结构和局域气候条件对于植物物种的定居和稳定性具有较大影响,可能导致物种丰富度和密度发生改变<sup>[30, 32]</sup>。人类活动的作用,如土地利用等对山地生物多样性的分布格局也具有较大影响,这是部分山地生物物种丰富度呈现单峰分布形态的主要原因<sup>[2, 16]</sup>。

### 2. 生物多样性变化与物种迁移

有越来越多的观测事实反映出过去 50 a 来由于气候变化,高山林线以上到雪线(寒漠带)的高山植被带生物物种数呈现显著增加趋势,且在近 10 a 气温急剧升高下物种丰富度递增速率加快<sup>[29, 33]</sup>。Grabherr 等<sup>[29]</sup>通过对比瑞士、奥地利和意大利等地高山带谱 25 个样地 1835 年的物种记录、1958 年前后的部分调查数据以及这些样地在 1992—1993 年的再调查结果,发现其中 18 个样地的物种丰富度增加,其他 7 个样地物种数没有变化或略有减少,在没有增加的部分样地中植物群落数在增加。伴随气温升高和多年冻土下限上升,意大利北部 Alps 高山植被带(海拔 2 800 ~ 3 200 m)物种丰富度增加最大,物种丰富度增加与物种在带谱间的迁移同步,有 52 种植物在过去 50 a 间向上迁移了 30 ~ 430 m,平均迁移速率达到 24 m/(10 a)<sup>[34]</sup>。欧洲 GLORIA 观测样地结果表明,这种物种快速迁移的结果导致在雪线寒漠带高山草地先锋植物覆盖度增加,而原有真正的雪线植物物种数减少和覆盖度降低<sup>[35-36]</sup>。在 Alps 南坡高山植被带最近 5 a 的样带观测结果,发现高山顶端带谱和下端林线附近带谱的植物物种丰富度分别增加了 10% 和 3%,高山植被带新增加物种大部分来源于林线带,表明近年来高山物种多样性变化和高山下部物种向上迁移速度加快<sup>[37]</sup>。林线带树木生长加强,灌木优势度增加,并伴随树种向上部高山草地带入侵<sup>[36-37]</sup>。

已有的进展支持了共同的认识:在气候变化驱动下,山地生态系统的物种更替、扩张与灭亡等方面具有明显的短期响应,且山地生态系统在结构重组、物种入侵、空间分布格局再造和垂直带谱位移方面的长期效应可能具有普遍性<sup>[33, 37-36]</sup>。

### 2.3 高山林线的形成机制及其对全球变化的响应

高山林线既是森林与苔原或高山草甸生态系统的界面,本身又是独立的山地生态带谱,具有多种生态敏感要素和大量可指示山地生态系统对环境变化的响应方式与程度的标志,历来被生态学家视为生

态系统的脆弱区、外界干扰信号的放大器和全球变化的预警区,因而是山地生态学领域最受关注和最活跃的研究方向之一。自 20 世纪 80 年代以来,关于林线形成机制研究取得了较大进展,形成了具有代表性的 6 个假说体系<sup>[38-40]</sup>:温度、热量限制假说,环境胁迫(低温、冻害)假说,干扰(风、冰、雪等的直接机械伤害及因此产生的各种病原体的危害、动物啃食践踏以及人为干扰等)假说,繁殖更新障碍(植物传粉、花粉管生长、种子发育与传播、发芽和幼苗定植受阻)假说,营养失衡(碳与氮平衡失调)假说,以及降水限制假说。已有的进展进一步明确了高山林线变化对全球气候变化的指示意义,但是也发现上述任何一种(假说)都可以解释在一定地域的高山林线现象,且在不同的研究区域,多种假说甚至相辅相成。但就全球尺度来说,历经百年争论仍未找到一种普遍适合的、能够解释全球范围高山林线现象的理论。

近年来,在世界各地不同纬度山地观测到气候变化导致高山林线上移的事实,在俄罗斯乌拉尔山南坡,在 1929—1999 年的 79 a 间冬季气温升高 3℃,夏季升高 0.6℃,原来林线带已完全变为茂密的森林带,同样的现象也在美国蒙大拿冰川国家公园观测到,在过去 46 a 时间里,原来林线出现显著上移<sup>[30]</sup>。在瑞典一些观测时间较长的林线带,在小冰期以来林线上移了 500~800 m<sup>[41]</sup>,在 Sylrlana 山区观测点观测到有 29 种林线植物物种在过去 50 a 间上移了 165 m。但是林线的移动与林线物种迁移的驱动因素与作用机制还存在较大争议,Gehrig-Fasel 等<sup>[42]</sup>认为,瑞士高山林线带已经观测到森林向上迁移的 4% 明确与气候变化有关,大部分形成原因复杂,包括土地利用和其他干扰。Butler 等<sup>[43]</sup>认为,地形条件及其相关的地质与土壤因素等,对于林线位置与动态的大影响可能超过气候因素。以 Dullinger 等人为代表的观点则认为,林线动态是区域气候、林线主要物种的不同扩张与再生行为、高山植物对入侵的抵御与可侵入性等多种因素共同作用的结果<sup>[44]</sup>。迄今为止,地貌、地质环境以及土壤等因素,对林线动态变化的作用如何与气候的影响进行甄别,尚未取得有效进展。

#### 2.4 山地生态系统生产力与碳库及其变化

早在 2000 年,IGBP 公布的陆地生态生产力分布数据表明,北半球陆地生态系统高生物量主要分布在山区。后来 Falge 等人<sup>[45]</sup>也发现中纬度山地森

林生态系统是陆地生态系统碳吸收的主要贡献者。Schimel 等<sup>[46]</sup>利用 Century 和 Biome-BGC 模型模拟研究结果也表明,美国 70% 以上的碳库储存于高海拔复杂山地。气候变化尤其是适宜的水热条件的改变导致山区生态系统生产力呈现增加趋势。另外,气候变化导致的不同的迁移速度将产生新的植物聚集并导致生态系统功能的改变,这些改变大部分表现在高海拔山地植物带谱,结果是大量观测和模拟结果支持气候变化将可能增加山地生态系统生产力<sup>[46-47]</sup>。Shugart 等<sup>[48]</sup>通过对比研究中纬度气候条件相似山地植被覆盖变化,认为由于过去 20 年来的气候变化(CO<sub>2</sub> 浓度增加和气温升高)导致山区植被分布密度增加,植被覆盖度在 1980 年代中期到 1990 年代末增加了 1%~17%,植被覆盖度增加反过来增加了区域生态系统碳库。

#### 2.5 山地水循环与淡水资源变化

山地作为“水塔”的生态功能对人类社会和陆地淡水生态系统具有重要价值,因此,山地水循环与水资源变化一直是山地生态学研究的核心内容之一。气候和水文过程是塑造山地生态过程的主要驱动因素,反过来,气候与生态系统的变化将显著改变水文循环和山区径流过程,继而影响流域水资源。为此,美国 RMRS(Rocky Mountain Research Station)自 2005 开始,持续开展气候变化下的山区水过程研究,其主要研究内容包括气候变化对水动态的影响、生态与水文过程的互馈机制及其影响、山区气候变化下的适应性水管理对策、山地生态系统碳固定与水分供应间的权衡(Trade-offs)问题等<sup>[49]</sup>。

##### 1. 全球变化对山区水文过程的影响与水资源脆弱性

山地雪冰既是固体水库也是流域十分重要的径流来源,其对温度的高度敏感性使得山区水文过程对全球变化响应强烈。国内外对山地冰雪动态研究所获得的普遍性认识,就是自小冰期以来的气候变暖影响下,大部分地区的冰川呈快速退缩状态,冰川融水年内分配与年际波动发生了较大变化,冰川径流对河川径流的补给比例、冰川融水径流模数等呈增加趋势;积雪天数和雪深减少、春季融雪期提前且融雪洪水频率增大<sup>[50-51]</sup>。在预估的未来气候变暖情景下,冰川覆盖率较高的流域,冰川径流仍将增加,而冰川分布较小的流域冰川径流将趋于减少。由于冰川和积雪融水补给河流的水量存在较大差异,不同山区冰雪对气候变化的响应程度也不同,因

此山区流域水资源对气候变化的脆弱性也存在较大的时空变异性<sup>[52]</sup>。气候变化环境导致高山冻土退化,冻土土壤水循环过程的变化将改变产流过程,冻土变化对流域径流的影响存在正负两种效应,其机制尚不清楚<sup>[53]</sup>。在气候变化导致的极端降水事件发生频率不断增加影响下,因冰川、积雪和冻土变化,山区自然灾害如洪水、泥石流等风险均有增加趋势。

## 2. 山地生态与水文的互馈过程与机理

水文过程是山区生态格局形成与变化的重要驱动因素。山区水文要素如降水、积雪、冰川以及冻土等变化直接影响高山生态系统的结构与分布格局,迄今观测到的大部分高山植物种群结构与分布格局的动态变化都或多或少与这些水文要素的变化有关<sup>[30, 41]</sup>,降水与积雪变化对高山生态系统生产力和养分物质循环具有重要作用。河川径流变化则直接影响流域水生生态系统,水文动态如水位、流量、流速以及水质和泥沙含量等均在其特定方面对水生生态系统产生关键作用<sup>[49]</sup>。反过来,生态格局对水文过程也具有显著影响,如山地森林水文、草地生态水文等学科领域就长期关注于生态格局对水循环影响的研究,是水文学最经典的研究领域之一,在此不再综述其进展。现阶段存在的主要问题是相互关联的两方面:一是对不同尺度上的水文规律及其相互联系与反馈机制的认识不足,缺乏山地高异质性水文生态与水文地理下的水循环多尺度理论与方法<sup>[54-55]</sup>;二是气候变化协同植被覆盖(包括植被结构)和土壤性质变化如何对水循环过程产生影响以及如何表达这种影响的垂直梯度效应<sup>[56-57]</sup>。这些问题的解决将有助于客观认识山地生态系统“水塔”的基本生态功能及其在变化环境下的变化趋势。

## 3. 山地生态系统的水碳耦合与 Trade-offs

生态系统碳储量与水分供给是十分重要的两个生态系统服务,尤其是对于山地生态系统,这两方面无论在区域尺度还是全球尺度上都具有举足轻重的作用<sup>[16, 49]</sup>。追求过多的生态系统碳储存就促使大范围高效固碳植物的分布和保持,或增加木本植物生产力,但这种土地覆盖结果往往导致流域的水供应(产流量)下降。<sup>[58]</sup>通过对全球 504 个典型流域和超过 600 个观测点的数据,结合生态经济模型模拟结果分析后认为,造林增加碳汇,大幅度减少了产流(减流率可高达 52%),同时伴随土壤盐碱化或酸

化。实际上关于草地或耕地转为林地后对径流的影响是一个长期争论的问题,其中也包含了如何客观认识山地生态系统的水源涵养问题<sup>[55-57]</sup>。需要解决的关键科学问题是:明确不同生态系统的水碳耦合关系;确定不同生态系统水碳 Trade-offs 关系、判断最佳的水碳平衡阈值;应从何种时空尺度认识生态系统水碳关系的 Trade-offs 问题等<sup>[49, 58-59]</sup>。

## 2.6 山地生态系统模型

作为陆地生态系统重要的组成部分以及环境变化最为敏感的生态体,山地生态系统模型的研究一直是陆地生态系统研究的热点。但是,由于山地环境的高度复杂性和易变性,模型的发展较为缓慢,过去很多模型都是基于生物气候学理论的统计模型来模拟山地生态系统的空间分布与动态变化<sup>[60]</sup>。林窗模型也经常用于山地森林生态系统变化的模拟,以新发展的 FORCLIM 和 HYBRID 等模型为基础,LINKAGES 模型不仅可以用来模拟树种的演化过程,也可以模拟森林的碳氮循环<sup>[61]</sup>。目前具有一定代表性的是美国地调局针对美国西北部冰川山地国家公园区域开发的综合模型,该模型由两部分组成<sup>[62]</sup>:区域水文-生态系统耦合模拟系统(RHESSys)和干扰-生物地球化学系统(BioGeo Chemical)。其中 RHESSys 是一个不断发展的区域生态水文耦合模型,主要用来模拟生态系统水、碳、氮的耦合循环,并可以集成模拟山区生态系统的模式和过程。生物地球化学模型是以 FOREST-BGC 为核心的系统。FOREST-BGC 还可以通过与水文过程模型相互作用来估算每日土壤水分和径流量。因此,对于特定山区,这一集成模拟系统的输出结果包括净初级生产量、净生态系统碳交换、地上部分和土壤碳库、碳氮比率以及从日到年的水文径流量。

山地生态系统模型发展面临的最大挑战就是如何将冰冻圈要素变化(冰川、积雪和冻土变化等)对生态系统的影响、人类活动(土地利用与覆盖变化、林业管理、山地资源以及水资源利用等)等因素与现有的水文-生态模型相结合。这需要业已十分复杂的山地生态模型与冰冻圈动态模型和社会经济模型的更好结合,因此山地生态模型未来发展的任务十分艰巨和困难,但这一目标的实现将不仅改进我们对山地生态资源的集中管理,而且无疑将对促进山区乃至整个区域的可持续发展决策具有重要作用。

### 3 山地生态学研究的重点领域与前沿科学问题

依据上述山地生态格局与过程研究的社会发展与学科发展需求、国际上的相关研究进展,认为现阶段山地生态格局与过程研究的重点领域可以归纳为以下几方面:

#### 1. 全球变化与山地生态带谱响应

认识在全球变化驱动下,山地不同带谱生态系统的差异性响应事实与驱动机制、不同带谱植被群落结构和生态功能的不同变化;研究不同带谱生态系统对全球变化的响应与适应机制,探索不同带谱地带性生态系统可能存在的环境阈限与未来气候变化情境下的可能分布范围;明确全球变化对于山地生态系统空间分布格局再造和垂直带谱位移方面的长期效应。需要关注的关键科学问题是:①山地生态系统对全球变化的响应所存在的带谱梯度差异表现、不同的响应与适应机制;②不同带谱生态系统分布格局、群落结构变化与地形和气候的协同关系,林线形成机制、动态变化与驱动机制;③林线与雪线生物带谱的空间格局与动态变化;④国际水平带尤其是高纬度地区对应生态系统类型的观测和研究结果,在多大程度上能反映山地生态系统的可能变化,生态系统变化对变化环境的响应在山区是否存在放大的趋势?⑤如何将基于垂直样带上样点的观测结果推移到整个山地生态系统(尺度问题),基于尺度推移的山地植被动态模型。

#### 2. 山地生物多样性分布格局与变化

生物多样性分布的地形效应与生物地理分布格局(不同海拔物种多样性分布规律)、地貌演化与物种分化的关系是这一主题长期的研究内容。基于全球变化,需要关注山地生物多样性分布格局变化的短期响应与长期效应、低地或平原区物种与山地物种间的竞争和入侵、不同带谱间物种的迁移与竞争压力等,认识不同带谱生物多样性的变化趋势及其驱动因素,明确山地的生物物种“避难所”作用和峰顶受困现象。重点科学问题主要是:①高山带(林线以上)物种多样性变化及其垂直梯度分异规律,群落组分与结构动态、物种来源及其与气候变化的关系,雪线植物物种多样性与空间分布格局变化;②林线物种多样性变化与空间迁移速率;③山地生物多样性变化的不确定性问题,包括特定山地物种分

布扩张和物种替代的基线与速率,物种迁移的气候阈值和空间阈限;④山地生物多样性变化综合评估、不同尺度样地观测与试验结果的融合;基于模型的未来山地植物物种与群落演替和空间分布变化趋势模拟。

#### 3. 山地生态水循环与水碳耦合关系

山地生态的空间高度异质性,是导致山区水循环过程的复杂性和高度尺度依赖性的主要原因,认识山地生态与水文的复杂耦合作用关系与机制是正确理解山地生态过程与水文过程的基础。淡水资源对人类社会的重要性又迫切需要我们准确把握山区水循环与水文过程,依据流域水文过程的预测模拟实施有效的水资源管理。为此,需要解决的关键科学问题是:①山地垂直带谱植被的变化在多大程度上和如何改变生态系统的水循环与山区流域尺度的水文过程;②山地不同带谱生态系统的水碳氮三元耦合关系及其对全球变化的响应机制与模拟;③不同生态系统碳固定与水供应关系的定量认识,区域尺度上山地生态系统的碳固定与水供应服务的 Trade-offs 评估与协调对策;④山区水文过程变化产生多大潜在影响反馈于生态系统?需要关注山地冰冻圈水文要素的变化如冰川、积雪和冻土水文过程变化对山地生态系统的影响。

#### 4. 山地生物地球化学循环与生物化学计量学

山地既是陆地生物多样性的富集区和生态系统生产力的高值区,也自然是陆地生态系统的主要碳汇功能区。但是山区复杂多变的地貌格局、气候条件以及快速的水循环过程等均对生物地球化学循环过程形成较大影响,且随植被分布的带谱特征,形成沿高程复杂变化的多维生物地球化学循环规律。在全球变化影响下,山区生态格局与过程、水循环格局与水文过程等均发生显著变化,我们需要理解这种变化在多大程度上和如何改变山地生态系统的生物地球化学过程?山地生物地球化学循环过程的变化反馈是什么?

碳、氮和磷元素对植物的生长、发育以及行为都起着非常重要的作用,N:P 比不仅是决定群落结构和功能的关键性指标,也可以作为对生产力起限制作用的营养元素的指示剂;全球变化必然导致生态系统生物化学计量平衡状态,这可能反映生态系统响应气候变化的内在机理。对比分析不同带谱生态系统上植物-凋落物-土壤系统养分分配格局和 C:N:P 比特征,认识高山区域植被原生演替养分相

互作用的调控因素,进而掌握植物群落演替和碳氮循环的内在机制,是现阶段山地生态学领域重要的前沿科学问题。

#### 5. 山地灾害与生态服务

山地生物多样性被认为具有重要的自然灾害抵御功能<sup>[16]</sup>,防治自然灾害是山地生态系统服务的重要构成。山地众多敏感环境要素和活跃的各种地表营力作用,促使全球变化下山地多种自然灾害如滑坡、泥石流、土壤侵蚀等不断加剧。山地的这些自然灾害加上雪灾、冻土退化和冰雪洪水灾害的频繁干扰,不仅对山区生态系统产生较大影响,而且直接危害山区人类社会的发展与安全。山地生态与灾害之间具有显著的互馈作用关系,但是缺乏充分证据和理论体系明确阐述这种关系。基于山区生态安全、环境安全和经济社会的可持续发展,我们迫切需要解决下例问题:①坡面稳定性与植被格局和生物多样性的关系,探索其存在的定量关系并赋予机理模型中;②气候变化及其驱动的高山冰冻圈要素变化协同作用下的灾害发生危险性与影响评估和预警;③山地灾害对生态系统的潜在危害与可能的防治对策;④山地灾害干扰对于山地生态系统格局与关键生态演替过程的作用与预测。

### 4 我国开展山地生态学研究的重要性与存在的主要问题

#### 4.1 开展我国山地生态学研究的重要性

我国是多山国家,山地不仅占据近2/3的国土面积,而且是我国大部分生物资源、水资源和矿产能源富集地,也是我国许多地区的重要生态屏障,在我国可持续发展中占据极其重要的位置。以横断山区为主体的西南山地为例,全国18%的可更新淡水资源、47.5%的水能资源和可开发的 $1\,000 \times 10^4 \text{ kW}$ 以上大中型水电资源的90%分布该区域<sup>[63-64]</sup>,是我国6大水系的发源区。在生物资源方面,该区域山地分布的各类动物总数约占全国的37%以上,裸子植物种数占全国的40%以上,并具有大量珍稀、特有和古植物的孑遗种属;森林资源富饶而广布,是中国第2大林区——西南林区的主体部分,西南诸省区71%的草地资源也分布在山区<sup>[65]</sup>,是我国重要的种质资源库和生物资源战略基地,也是世界范围内生物多样性最为关键的核心区域之一,中国北温带山地森林生态就被IGBP认定为全球陆地森林生

态生产力和碳汇重要核心区之一<sup>[66]</sup>。山区和丘陵是我国县域经济的重要支柱,据2006年统计值,GDP占全国县域经济总量的51.6%,第一产业增加值占全国县域经济的56.24%,粮食产量占据52.01%,油料、肉类、茶叶以及水果等农副产品产量均各自占全国的一半以上<sup>[67]</sup>。因此,山地在我国可持续发展中占据极其重要的战略地位。

在全球变化影响下,伴随经济社会的发展,近年来山地生态与环境发生了显著变化,表现在生态系统退化、物种多样性减少、水源涵养功能降低、区域地质灾害频发、水土流失加剧<sup>[65, 68]</sup>。伴随气候变化和人类活动影响不断加强,西南山区生态与环境变化必将进一步加剧,对我国生物资源、区域气候、水资源和山区发展的影响将愈加突出,本区域将面临更加严重的经济发展与环境恶化的矛盾,对山区自然生态与资源保护形成愈来愈大的压力。依据我国新的发展战略,未来10a西部将进入一个更加快速发展阶段,以大建设(基础设施、重大工程)、大发展(城镇化、新农村建设)、通达化(铁路网、公路网)等形式的大规模建设迎来一个新的发展高潮。这无疑将进一步增强西部山区的建设和发展,也注定将进一步加剧已凸显的矛盾和压力。如何科学的化解这些矛盾与环境压力,处理好环境保护与区域发展的关系,关乎我国2/3国土面积上生态安全和国家全面小康建设总体目标的实现,山区生态建设与保育关乎国家发展的生态环境安全持久保障的基础。认识全球变化影响下山地特殊的生态格局与过程的基本规律、相互关系与作用机制,是寻求解决上述矛盾、协调生态保护与区域发展的可行途径以及制定减缓全球变化对山区影响对策的基础。

#### 4.2 我国山地生态学研究存在的主要问题

中国作为全球变化研究发起国之一,尽管在全球变化领域取得了具有中国特色的成果,但是相比国际上对于山地生态问题的关注和研究而言,尚存在多方面的问题和不足:

1. 我国对于山地生态系统的全球变化响应与区域适应问题的研究尚属起步阶段,仅仅从气候系统角度关注青藏高原高寒地区陆地生态系统的全球变化效应及其对我国东亚季风的影响,没有专门的研究计划和系统研究,无法支撑我国山区发展面临的诸多科学问题。

2. 缺乏必要的监测体系和专门研究平台。除了全球变化研究的水平样带以外,缺乏针对山地的

垂直观测和研究样带,没有设立专门的山地环境监测与研究体系。这是导致现阶段我国几乎缺少所有山地环境的历史基线记录的主要原因,我们不清楚我国山地生态系统到底发生了何种变化,无法回答我国山区生物多样性是否减少或可能的演变趋势。

3. 对山地系统围绕环境与发展的综合研究不足,在制定山区经济社会发展规划中往往缺乏必要的环境承载能力和生态容量等方面的科学依据。在山地生态学领域存在较多未知领域和学科瓶颈,如我国主要山地系统对气候变化的响应与适应能力及其空间分异规律、全球变化下山地系统响应气候变化的机制与山地生态系统结构与功能变化趋势等方面的基础研究,尚未有系统布局;难以准确评估山地系统变化对我国关键生物资源、水资源以及区域生态安全和社会经济发展能力的影响。

4. 虽然提出了有关山地生态屏障建设的设想,但是在如何协调维护山区生态功能、构建山区生态屏障与山区经济社会发展的矛盾方面,由于缺乏专门研究,在如何优化山区生态功能、实现生态环境与经济发展双赢的战略规划,缺乏必要的山地生态学理论与专门技术体系的支撑。现阶段,建设山区生态屏障的重要性、获取生态屏障更高综合效益的山区发展思路逐渐被人们所共识,急需开展相关的山地生态科学系统研究,为变化环境下推进山区的可持续发展提供必要的科学依据。

作为世界第一山地大国,我国山地生态科学研究应予以重视和发展。我国山地地域广大、生态类型复杂多样,并具有长期和多样的人类发展与山地生态演替交互作用,既难以借鉴其他国家的经验,也为我们建立适合我国具体情况的山地生态学理论体系提供了条件。近年来我国不同领域对山区发展的关注不断提高,山地科学的认知也在较大范围内得以推进。在全球变化研究不断深入、我国西部发展不断提速而山地灾害频发等形势推动下,对山区生态系统的研究也有了积极发展的态势,如国土资源部在全国开展山地灾害清查和监测,中国科学院在多个典型山区部署了生态观测与研究站,横断山区和长白山等山地生态学研究已经陆续被国际相关山地研究计划所关注。这些进展为将来组建我国高效、长期的山地生态格局与过程的观测及试验研究网络奠定了基础。

致谢:本文的主题和立意由冷疏影研究员和冯仁国研究员提出,成文又是在二位研究员的指导下

完成,为此,作者对他们的辛勤付出表示衷心感谢!

## 参考文献 (References)

- [1] FAO. International Year of Mountains: Concept paper [C]. Rome, 2000
- [2] Fang Jingyun, Shen Zehao, Cui Haiting. Ecological characteristics of mountains and research issues of mountain ecology [J]. Biodiversity Science, 2004, 12(1): 10-19 [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 [J], 2004, 12(1): 10-19]
- [3] Huber U M, et al. Global change and mountain regions [M]. Netherlands, Springer, 2005
- [4] UNEP/WCMC. Mountain Watch, Environmental change and sustainable development in mountains [M]. UNEP World Conservation Cambridge; Monitoring Centre, 2002
- [5] UNGA. Resolution A/RES/58/216 on sustainable development in mountain regions, adopted by the General Assembly [M]. United New York: Nations Headquarters, 2004
- [6] Fagre D B, Peterson D L, McKenzie D. Integrated research on climate change in mountain ecosystems: The CLIMET project [G]// Price M F. editor, Integrated Research and Management in Mountain Areas. Earthscan, UK, 2007: 257-271
- [7] Diaz H F, Millar C I. The mountain views Newsletter [J]. Mountain Views, 2008, 2: 1-2
- [8] Fu Bojie, Niu Dong, Zhao Shidong. Study on global change and terrestrial ecosystems: history and prospect [J]. Advances in Earth Science, 2005, 20(5): 333-342 [傅伯杰, 牛栋, 赵士洞. 全球变化与陆地生态系统研究: 回顾与展望 [J]. 地球科学进展, 2005, 20(5): 556-560]
- [9] FAO. Forest resources assessment 1990 - Tropical countries. FAO Forest Paper 112 [M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1993
- [10] Malanson G P. Complex responses to global change at alpine treeline [J]. Physical Geography, 2001, 22: 333-342
- [11] Lisa J G, Waggoner L A, Bunn A G. Detecting global change at alpine treeline: coupling paleoecology with contemporary studies [G]//Huber U M, et al. Global change and mountain regions, 2005: 501-508
- [12] Lenoir, J, Gegout J C, Marquet P A, et al. A significant upward shift in plant species optimum elevation during the 20th century [J]. Science, 2008, 320: 1768-1771
- [13] Loarie S R, Duffy P B, Hamilton H, et al. The velocity of climate change [J]. Nature, 2009, 462(24): 1052-1055
- [14] Willy T, Brigitta A. Long-term responses of mountain ecosystems to environmental changes: resilience, adjustment, and vulnerability [G]//Huber U M, et al. Global change and mountain regions, 2005, 133-143.
- [15] Kömer C. Mountain biodiversity, its causes and function: An overview [G]//Kömer and Spehn Mountain biodiversity: A global assessment. London: Parthenon, 2002: 3-20
- [16] Spehn E M, Kömer C. A global assessment of mountain biodiversity

- ty and its function [G]//Huber U M, et al. Global change and mountain regions, 2005, 393–400
- [17] Schimel D, Melillo J, Tian H Q, et al. Contribution of increasing CO<sub>2</sub> and climate to carbon storage by ecosystems in the United States [J]. *Science*, 2000, 287(5460): 2004–2006
- [18] Schimel D S, Kittel T, Running S, et al. Carbon sequestration studied in Western US mountains [J]. *EOS, Transactions American Geophysical Union*, 2001, 83(40): 445–449
- [19] Clark D B, Xue Y, Harding R J. Modeling the impact of land surface degradation on the climate of tropical North Africa [J]. *Journal of Climate*, 2001, 14: 1809–1822
- [20] Gao Xuejie, Zhang Dongfeng, Chen Zhongxin, et al. Land use effects on climate in China as simulated by a regional climate model [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2007, 50(4): 620–628 [高学杰, 张冬峰, 陈仲新, 等. 中国当代土地利用对区域气候影响的数值模拟 [J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2007, 37(3): 397–404]
- [21] Qu Jian, Lin Ha. International Geosphere-biosphere programme science plan and implementation strategy [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2006 [曲建升, 林海译. IGBP 科学计划与实施战略 [M]. 北京: 气象出版社, 2006]
- [22] Sullivan P F, Welker J M. Warming chambers stimulate early season growth of an arctic sedge, results of a minirhizotron field study [J]. *Oecologia*, 2005, 142(6): 616–626
- [23] Körner C. Experimental plant ecology: Some lessons from global change research [G]//Press M C, Huntly N J, Levin S. *Ecology achievement and challenge*. Blackwell Science, 2001: 227–247
- [24] Dunne J A, Saleska S R, Fischer M L, et al. Integrating experimental and gradient methods in ecological climate change research [J]. *Ecology*, 2004, 85(4): 904–916
- [25] Walker M D, Wahren C H, Hollister R D, et al. Plant community responses to experimental warming across the tundra biome [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2006, 31(5): 1342–1346
- [26] IGBP newsletter [J]. No. 65, March, 2006
- [27] Grabherr G, Gottfried M, Pauli H. GLORIA: A Global Observation Research Initiative in Alpine Environments [J]. *Mountain Research and Development*, 2000, 20(2): 190–191
- [28] Haeberli W, Holzhauser H. Alpine glacier mass changes during the past two millennia [J]. *PAGES News*, 2003, 11(1): 13–15
- [29] Grabherr G, Gottfried M, Pauli H. Climate effects on mountain plants [J]. *Nature*, 1994, 369(6480): 448
- [30] Grabherr G, Gottfried M, Pauli H. Climate Change Impacts in Alpine Environments [J]. *Geography Compass*, 2010, 4(8): 1133–1153
- [31] Pauli H, Gottfried M, Reiter K, et al. Signals of range expansions and contractions of vascular plants in the high Alps: observations (1994–2004) at the GLORIA master site Schrankogel, Tyrol, Austria [J]. *Global Change Biology*, 2007, 13(1): 147–156
- [32] Erschbamer B, Mallaun M, Unterluggauer P, et al. Plant diversity along altitudinal gradients in the Central Alps (South Tyrol, Italy) and in the Central Greater Caucasus (Kazbegi region, Georgia) [J]. *Tuexenia*, 2010, 30: 11–29
- [33] Walther G R, Beer S, Burga C A. Trends in the upward shift of alpine plants [J]. *Journal of Vegetation Science*, 2005, 16(5): 541–548
- [34] Parolo G, Rossi G. Upward migration of vascular plants following a climate warming trend in the Alps [J]. *Basic and Applied Ecology*, 2008, 9(2): 100–107
- [35] Pauli H, Gottfried M, Grabherr G. Climate change and Europe's alpine plant diversity: the GLORIA long-term observation network [G]//Europe's ecological backbone: recognising the true value of our mountains. EEA Report No 6/2010, European Environment Agency, Copenhagen, 2010
- [36] Pauli H, Gottfried M, Reiter K, et al. Signals of range expansions and contractions of vascular plants in the high Alps: observations (1994–2004) at the GLORIA master site Schrankogel, Tyrol, Austria [J]. *Global Change Biology*, 2007, 13(1): 147–156
- [37] Erschbamer B, Kiebach T, Mallaun M, et al. Short-term signals of climate change along an altitudinal gradient in the South Alps [J]. *Plant Ecology*, 2009, 202(1): 79–89
- [38] Song Hongtao, Cheng Song, Sun Shaoqin. Hypotheses of alpine timberline formation mechanism: a review [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, 28(11): 2393–2402 [宋洪涛, 程颂, 孙守琴. 高山林线形成机制及假说的探讨. *生态学杂志*, 2009, 28(11): 2393–2402]
- [39] Kullman L. Tree line population monitoring of *Pinus sylvestris* in the Swedish Scandes, 1973–2005: Implications for tree line theory and climate change ecology [J]. *Journal of Ecology*, 2007, 95(1): 41–52
- [40] Körner C, Paulsen J. A worldwide study of high altitude treeline temperatures [J]. *Journal of Biogeography*, 2004, 31(5): 713–732
- [41] Kullman L, Öberg L. Post-Little Ice Age tree line rise and climate warming in the Swedish Scandes: a landscape ecological perspective [J]. *Journal of Ecology*, 2009, 97(3): 415–429
- [42] Gehrig-Fasel J, Guisan A, Zimmermann N E. Tree line shifts in the Swiss Alps: climate change or land abandonment? [J]. *Journal of Vegetation Science*, 2007, 18(4): 571–582
- [43] Butler D R, Malanson G P, Walsh S J, et al. Influences of geomorphology and geology on Alpine treeline in the American west—More important than climatic influences? [J]. *Physical Geography*, 2007, 28(5): 434–450
- [44] Dullinger S, Dirnböck T, Grabherr G. Modelling climate change-driven treeline shifts: relative effects of temperature increase, dispersal and invisibility [J]. *Journal of Ecology*, 2004, 92(2): 241–252
- [45] Falge E, Baldocchi D, Tenhunen J, et al. Seasonality of ecosystem respiration and gross primary production as derived from FLUXNET measurements [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 113: 53–74
- [46] Schimel D, Braswell B H. The role of Mid-latitude mountains in the carbon cycle: Global perspective and a Western US case study [G]//Huber U M, et al. Global change and mountain regions, 2005:

449-456

- [47] Root T L, Price J T, Hall K R, et al. Fingerprints of global warming on wild animals and plants [J]. *Nature*, 2003, 421: 57-60
- [48] Shugart H H. Remote sensing detection of high elevation vegetation change [G]//Huber U M, et al. *Global change and mountain regions*, 2005: 457-465
- [49] Rocky Mountain Research Station. 2009 climate change research strategy [R]. United States Department of Agriculture, 2009
- [50] Beniston M. Climatic change and its possible impacts in the alpine region [G]//Proceedings of second thematic workshop: projecting global change impacts in mountain biosphere reserves. UNESCO, France, 2005: 5-16
- [51] Liu S Y, Zhang Y, Zhang Y S, et al. Estimation of glacier runoff and future trends in the Yangtze River source region, China [J]. *Journal of Glaciology*, 2009, 55(190): 353-362
- [52] Immerzeel W W, van Beek L P H, Bierkens M F P. Climate change will affect the Asian Water Towers [J]. *Science*, 2010, 328(5984): 1382-1385
- [53] Hoelzle M, Paul F, Gruber S, et al. Glaciers and permafrost in mountain areas: different modeling approaches [G]//Proceedings of second thematic workshop: projecting global change impacts in mountain biosphere reserves. UNESCO, France, 2005, 28-40
- [54] Merz R, Blöschl G. Regionalisation of catchment model parameters [J]. *Journal of Hydrology*, 2004, 96(287): 95-123
- [55] Kandel D D, Western A, Grayson R, et al. Process parameterization and temporal scaling in surface runoff and erosion modeling [J]. *Hydrological Processes*, 2004, 18(8): 1423-1446
- [56] Gurtz J, Zappa M, Jasper K, et al. A comparative study in modeling runoff and its components in two mountainous catchments [J]. *Hydrological Processes*, 2003, 17(2): 297-311
- [57] Becker A. Runoff processes in mountain headwater catchments: recent understanding and research challenges [G]//Huber U M, et al. *Global change and mountain regions*, 2005: 283-295
- [58] Jackson R B, Jobbagy E G, Avissar R, et al. Trading water for carbon with biological sequestration [J]. *Science*, 2005, 310(5756): 1944-1947
- [59] Chisholm, R. A.. Trade-offs between ecosystem services: Water and carbon in a biodiversity hotspot [J]. *Ecol. Econ.*, doi:10.1016/j.ecolecon.2010.05.013
- [60] Austin M P. Spatial prediction of species distribution: An interface between ecological theory and statistical modeling [J]. *Ecological Modeling*, 2002, 157(2-3): 101-118
- [61] Bugmann H. A review of Forest Gap Models [J]. *Climate Change*, 2001, 51(3-4): 259-305
- [62] Fagre D B, Running S W, Keane R E, et al. Assessing climate change effects on mountain ecosystems using integrated models: A case study [G]//Huber U M, et al. *Global change and mountain regions*, 2005, 489-500
- [63] Liu Changmin, Chen Zhikai. Assessing the water resources utilization in present and analyzing the developing trend in demand and supply of water resources in China [M]. Beijing: Chinese water conservation and Hydropower Press, 2001 [刘昌明, 陈志凯. 中国水资源现状评价和供需发展趋势分析 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001]
- [64] Chinese invest and consult net. 2008 Chinese hydropower trades analysis and consultation Strategy [R]. 2008 [中国投资咨询网. 2008 年中国水电行业分析及投资咨询报告 [R]. 2008]
- [65] Sun Honglie. *Ecosystems in China* [M]. Beijing: Science Press, 2005. [孙鸿烈. 中国生态系统 [M]. 北京: 科学出版社, 2005]
- [66] DeFries R S, Hansen M C, Townshend J R G, et al. A new global 1-km dataset of percentage tree cover derived from remote sensing [J]. *Global Chang Biology*, 2000, 6(2): 247-254
- [67] Chen Guojie, Fang Yiping, Gao Yanjun. New dynamics and exploration in Chinese mountain development: The report on mountain development in China [M]. Beijing: Commercial Press, 2011 [陈国阶, 方一平, 高延军. 中国山区发展报告——中国山区发展新动态与新探索 [M]. 北京: 商务出版社, 2010]
- [68] Wu Ning, Liu Qing. Restoration and rehabilitation of degraded mountain ecosystem on the upper Minjiang River [M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 2007. [吴宁, 刘庆. 山地退化生态系统的恢复与重建 [M]. 成都: 四川科学技术出版社, 2007]

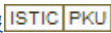
## The Advances, Priority and Developing Trend of Alpine Ecology

WANG Genxu, DENG Wei, YANG Yan, CHENG Genwei

(Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Conservancy, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** The responses of alpine ecosystems to global change not only have serious impacts on the worldwide pattern and functions of terrestrial ecosystems, but also significantly restrict the sustainable development of human society. After indicating the importance and desires for studying the alpine ecology, the advances, priority and key science problems of alpine ecology were clarified in this study. Based on the description of the importance and eagerness for developing the alpine ecology in China, the current situation and issues in alpine ecology study were discussed. Due to the largest mountain country, to further develop and study the alpine ecology in China has an important implication for maintaining the safety of ecology and environment.

**Key words:** alpine ecology; advances; priority; forward issues; importance

作者: 王根绪, 邓伟, 杨燕, 程根伟, WANG Genxu, DENG Wei, YANG Yan, CHENG Genwei  
作者单位: 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川, 成都, 610041  
刊名: 山地学报   
英文刊名: JOURNAL OF MOUNTAIN SCIENCE  
年, 卷(期): 2011, 29(2)  
被引用次数: 4次

## 参考文献(68条)

1. FAO [International Year of Mountains: Concept paper](#) 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](#) [期刊论文] - [生物多样性](#) 2004(01)
3. Huber U M [Global change and mountain regions](#) 2005
4. UNEP/WCMC [Mountain Watch, Environmental change and sustainable development in mountains](#) 2002
5. UNGA [Resolution A/RES/58/216 on sustainable development in mountain regions, adopted by the General Assembly](#) 2004
6. Fagre D B; Peterson D L; McKenzie D [Integrated research on climate change in mountain ecosystems: The CLIMET project](#) 2007
7. Diaz H F; Millar C I [The mountain views Newsletter](#) 2008
8. 傅伯杰; 牛栋; 赵士洞 [全球变化与陆地生态系统研究: 回顾与展望](#) [期刊论文] - [地球科学进展](#) 2005(05)
9. FAO [Forest resources assessment 1990-Tropical countries. FAO Forest Paper 112](#) 1993
10. Malanson G P [Complex responses to global change at alpine treeline](#) 2001
11. Lisa J G; Waggoner L A; Bunn A G [Detecting global change at alpine treeline: coupling paleoecology with contemporary studies](#) 2005
12. Lenoir J; Gegout J C; Marquet P A [A significant upward shift in plant species optimum elevation during the 20th century](#) [外文期刊] 2008(5884)
13. Loarie SR; Duffy P B; Hamilton H [The velocity of climate change](#) 2009(24)
14. Willy T; Brigitta A [Long-term responses of mountain ecosystems to environmental changes: resilience, adjustment, and vulnerability](#) 2005
15. K(omer C [Mountain biodiversity, its causes and function: An overview](#) 2002
16. Spehn E M; K(omer C A [A global assessment of mountain biodiversity and its function](#) 2005
17. Schimel D; Melillo J; Tian H Q [Contribution of increasing CO2 and climate to carbon storage by ecosystems in the United States](#) [外文期刊] 2000(5460)
18. Schimel D S; Kittel T; Running S; et al [Carbon sequestration studied in Western US mountains](#) 2001(40)
19. Clark D B; Xue Y; Harding R J [Modeling the impact of land surface degradation on the climate of tropical North Africa](#) [外文期刊] 2001
20. 高学杰; 张冬峰; 陈仲新 [中国当代土地利用对区域气候影响的数值模拟](#) [期刊论文] - [中国科学D辑](#) 2007(03)
21. 曲建升; 林海 [IGBP科学计划与实施战略](#) 2006
22. Sullivan P F; Welker J M [Warming chambers stimulate early season growth of an arctic sedge. results of a minirhizotron field study](#) 2005(06)

23. [K\(omer C Experimental plant ecology:Some lessons from globalbal change research 2001](#)
24. [Dunne J A;Saleska S R;Fischer M L Integrating experimental and gradient methods in ecological climate change research\[外文期刊\] 2004\(04\)](#)
25. [Walker M D;Wahren c H;Hollister R D Plant community responses to experimental warming across the tundra biome\[外文期刊\] 2006\(05\)](#)
26. [IGBP newsletter No.65 2006](#)
27. [Grabherr G;Gottfried M;Pauli H GLORIA:A Global Observation Research Initiative in Alpine Environments\[外文期刊\] 2000\(02\)](#)
28. [Haeberli W;Holzhauser H Alpine glacier mass changes during the past two millennia 2003\(01\)](#)
29. [Grabherr G;Gottfried M;Pauli H Climate effects on mountain plants\[外文期刊\] 1994\(6480\)](#)
30. [Grabherr G;Gottfried M;Pauli H Climate Change Impacts in Alpine Environments\[外文期刊\] 2010\(08\)](#)
31. [Pauli H;Gottfried M;Reiter K Signals of range expansions and contractions of vascular plants in the high Alps:observations \(1994-2004\)at the GLORIA master site Schrankogel, Tyrol, Austria\[外文期刊\] 2007\(01\)](#)
32. [Ersehbarer B;Mallann M;Unterluggauer P Plant diversity along altitudinal gradients in the Central Alps\(South Tyrol, Italy\)and in the Central Greater Caucasus\(Kazhegi region, Georgia\) 2010](#)
33. [Walther G R;Bei?ner S;Burga C A Trends in the upward shift of alpine plants\[外文期刊\] 2005\(05\)](#)
34. [Parolo G;Rossi G Upward migration of vascular plants following a climate warming trend in the Alps\[外文期刊\] 2008\(02\)](#)
35. [Pauli H;Gottfried M;Grabherr G Climate change and Europe's alpine plant diversity:the GLORIA long-term observation network 2010](#)
36. [Panli H;Gottfried M;Reiter K Signals of range expansions and contractions of vascular plants in the high Alps:observations \(1994-2004\)at the GLORIA master site Schrankogel, Tyrol, Austria\[外文期刊\] 2007\(01\)](#)
37. [Erschbamer B;Kiebacher T;Mallaun M Short-term signals of climate change along an altitudinal gradient in the South Alps\[外文期刊\] 2009\(01\)](#)
38. [宋洪涛;程颂;孙守琴 高山林线形成机制及假说的探讨\[期刊论文\]-生态学杂志 2009\(11\)](#)
39. [Kullman L Tree line population monitoring of Pinus sylvestris in the Swedish Scandes.1973-2005:Imp lieations for tree line theory and climate change ecology\[外文期刊\] 2007\(01\)](#)
40. [K\(o\)rner C;Panlsen J A worldwide study of high altitude treeline temperatures\[外文期刊\] 2004\(05\)](#)
41. [Kullman L;\(O\)berg L Post-Little Ice Age tree line rise and climale wanning in the Swedish Scandes:a landscape ecological perspective\[外文期刊\] 2009\(03\)](#)
42. [Gehrig-Fasel J;Guisan A;Zimmermann N E Tree line shifts in the Swiss Alps:climate change or land abandonment\[外文期刊\] 2007\(04\)](#)
43. [Butler D R;Malansen G P;Walsh S J Influences of geomorphology and geology on Alpine treeline in the American west--More important than climatic influences 2007\(05\)](#)
44. [Dullinger S;Dirnb\(o\)ck T;Grabherr G Modelling climate changedriven treeline shifts:relative effects of temperature increase,dispersal and invisibility\[外文期刊\] 2004\(02\)](#)

45. [Falge E;Baldocchi D;Tenhunen J Seasonality of ecosystem respiration and gross primary production as derived from FLUXNET measurements](#) 2002
46. [Schimel D;Braswell B H The role of Mid-latitude mountains in the carbon cycle:Global perspective and a Western US case study](#) 2005
47. [Root T L;Price J T;Hall K R Fingerprints of global warming on wild animals and plants](#)[外文期刊] 2003
48. [Shugart H H Remote sensing detection of high elevation vegetation change](#) 2005
49. [Rocky Mountain Research Station 2009 climate change research strategy](#) 2009
50. [Beniston M Climatic change and its possible impacts in the alpine region](#) 2005
51. [Liu S Y;Zhang Y;Zhang Y S Estimation of glacier runoff and future trends in the Yangtze River source region, China](#)[外文期刊] 2009(190)
52. [Immerzeel W W;van Beek L P H;Bierkens M F P Climate change will affect the Asian Water Towers](#)[外文期刊] 2010(5984)
53. [Hoelzle M;Paul F;Gruber S Glaciers and permafrost in mountain areas: different modeling approaches](#) 2005
54. [Merz R;Blöschl G Regionalisation of catchment model parameters](#)[外文期刊] 2004(287)
55. [Kandel D D;Western A;Grayson R Process parameterization and temporal scaling in surface runoff and erosion modeling](#)[外文期刊] 2004(08)
56. [Gurtz J;Zappa M;Jasper K A comparative study in modelling runoff and its components in two mountainous catchments](#)[外文期刊] 2003(02)
57. [Becker A Runoff processes in mountain headwater catchments: recent understanding and research challenges](#) 2005
58. [Jackson R B;Jobbagy E G;Avissar R Trading water for carbon with biological sequestration](#)[外文期刊] 2005(5756)
59. [Chisholm, R. A Trade-offs between ecosystem services: Water and carbon in a biodiversity hotspot](#)
60. [Austin M P Spatial prediction of species distribution: An interface between ecological theory and statistical modeling](#)[外文期刊] 2002(2-3)
61. [Bugmann H A review of Forest Gap Models](#)[外文期刊] 2001(3-4)
62. [Fagre D B;Running S W;Keane RE Assessing climate change effects on mountain ecosystems using integrated models: A case study](#) 2005
63. [刘昌明;陈志凯 中国水资源现状评价和供需发展趋势分析](#) 2001
64. [中国投资咨询网 2008年中国水电行业分析及投资咨询报告](#) 2008
65. [孙鸿烈 中国生态系统](#) 2005
66. [DeFries R S;Hansen M C;Townshend J R G A new global 1-km dataset of percentage tree cover derived from remote sensing](#)[外文期刊] 2000(02)
67. [陈国阶;方一平;高延军 中国山区发展报告--中国山区发展新动态与新探索](#) 2010
68. [吴宁;刘庆 山地退化生态系统的恢复与重建](#) 2007

## 本文读者也读过(9条)

1. 潘勇, 曹文宣, 徐立蒲, 殷守仁, PAN Yong, CAO Wen-xuan, XU Li-pu, YIN Shou-ren 国内外鱼类入侵的历史及途径[期刊论文]-大连水产学院学报2006, 21(1)
2. 董仕君, 崔英伟, Dong Shi-jun, Cui Yingwei 从生态学观点看城市社区的发展演进[期刊论文]-河北建筑工程学院学报2004, 22(4)
3. 沈万斌, 尚颖, 刘景帅, 高凯, 王黎黎 长白山旅游景区生态环境状况评价[期刊论文]-环境保护科学2011, 37(2)
4. 于奕, YU Yi 从城市设计的角度来认识城市水体生态观[期刊论文]-山西建筑2006, 32(23)
5. 吴楚材, 吴章文, WU Chu-cai, WU Zhang-wen 生态旅游产生背景及开发方向研究[期刊论文]-中南林学院学报2001, 21(2)
6. 张晓文, 杨仁全, 王纲, 周增产, ZHANG Xiao-wen, YANG Ren-quan, WANG Gang, ZHOU Zen-chan 植物检疫隔离温室的研究与开发[期刊论文]-农机化研究2007(1)
7. 李立, 浅析城市生态旅游的法律保护——以宜春市生态旅游为例[期刊论文]-传承(学术理论版)2011(1)
8. 师华, SHI Hua 疫病非疫区的划分和承认对国际贸易的影响[期刊论文]-法学家2008(5)
9. 周明华, 吴新华, 顾斌, 顾忠盈 中国与欧盟植物检疫审批的比较[期刊论文]-植物检疫2009, 23(z1)

## 引证文献(4条)

1. 李国亮, 赵军 黑河流域上游草地NPP分布及其与地形因子的关系分析[期刊论文]-甘肃科技 2013(21)
2. 周彬, 钟林生, 陈田, 涂玮 五台山生态旅游发展评价及对策[期刊论文]-山地学报 2013(3)
3. 周新年, 陈辉荣, 巫志龙, 胡喜生, 周成军, 郑端生 山地人工林择伐技术研究进展[期刊论文]-山地学报 2012(1)
4. 杜湘, 张国飞 基于知识图谱的山地生物多样性研究前沿分析[期刊论文]-昆明冶金高等专科学校学报

---

2013(5)

本文链接: [http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_sdxb201102001.aspx](http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_sdxb201102001.aspx)