

山地表生地球化学研究现状与展望

吴艳宏^{1,2}, 邴海健^{1,2}, 周 俊^{1,2}

(1. 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;

2. 中国科学院山地表生过程与生态调控重点实验室, 四川 成都 610041)

摘 要:山地是地球上重要的地貌单元, 占全球陆地面积的 20%, 中国山地占国土面积的 2/3。山地是全球物质和能量循环的起点, 是对全球气候变化最为敏感的区域。山地表生地球化学包括山地生物地球化学、山地环境地球化学和山地生态地球化学, 是山地科学的主要内容。结合当前研究热点, 山地表生地球化学重点关注山地表生生态系统对全球气候变化的响应与适应以及山地表生生态系统物质循环对山地生态环境健康的影响。未来需要在山地生态系统中将大气圈、水圈、土壤圈、生物圈作为一个整体, 系统地开展山地表生地球化学研究; 从初期的单一要素着手积累基础数据, 到后期的多单元、多因素研究的整合; 通过长期的野外监测和室内分析, 最终建立适合山地生态系统的物质地球化学循环模型, 预测将来全球气候变化和人类活动影响下山地生态环境的发展趋势和可能的潜在影响, 这对山地自身的生态环境安全以及山区社会、经济和文化的可持续发展具有重要的现实意义。

关键词:山地科学; 表生地球化学; 生态系统; 全球气候变化; 人类活动; 物质循环

中图分类号:P594

文献标志码:A

Review on Mountain Supergene Geochemistry

WU Yan-hong^{1,2}, BING Hai-jian^{1,2}, ZHOU Jun^{1,2}

(1. Chengdu Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Chengdu 610041, Sichuan, China; 2. Key Laboratory of Mountain Surface Processes and Ecological Regulation, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: Mountain is an important geomorphic type on the earth, which covers 20% of the total terrestrial areas. Mountain is the major part of Chinese land, which is nearly 2/3 of terrestrial area. Mountain is not only the beginning of global cycling of materials and energy, but also the most sensitive area to global climate changes. Mountain supergene geochemistry consists of mountain biogeochemistry, mountain environmental geochemistry and mountain ecological geochemistry (eco-geochemistry), which are the important contents of mountain science. According to current research hotspots, mountain supergene geochemistry is focusing on the responses and adaptations of mountain ecosystems to the global changes, and the impacts of the material cycling on the ecology and environment in the mountain areas. In future, it is necessary to synthetically study the mountain supergene geochemistry in combination with the atmosphere, hydrosphere, pedosphere and biosphere. The first work should measure the basic data for single object, and then integrate the multiple data. Based on the long-term field monitoring and the lab analysis, the suitable geochemical cyclical models of the materials are ultimately established for

收稿日期: 2014-11-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(41272200)

作者简介: 吴艳宏(1969-), 男, 江苏靖江人, 研究员, 博士研究生导师, 理学博士, E-mail: yhwu@imde.ac.cn。

the mountain ecosystems, and thus the impacts of the global climate changes and human activities on the development of mountain ecological environment as well as the potential eco-risk would be predicted, which is appreciably important for the safety of mountain ecosystems and for the sustainable development of society, economy and culture in the mountain areas.

Key words: mountain science; supergene geochemistry; ecosystem; global climatic change; human activity; material cycling

0 引言

山地是具有一定海拔、相对高度和坡度的,由高地及其相伴谷地、山岭等所组成的综合地域^[1-2],是多圈层(大气圈、生物圈、水圈、土壤圈和岩石圈)相互作用非常活跃的复杂区域^[3-4]。山地约占地球陆地表面面积的 20%,居住着世界上 10%的人口^[5]。中国是一个多山的国家,山地和丘陵面积约为 $6.3 \times 10^6 \text{ km}^2$, 占中国国土总面积的 $2/3$ ^[6]。

山地为人类提供多种赖以生存的自然资源。山地是世界上主要河流的发源地^[5],为全球超过 50%的人口提供了淡水资源^[7];山区河流巨大的垂直落差转换成的电能为人类提供了大量几乎零污染且廉价的电力资源^[8];此外,山地还是木材资源、动植物(含药材)资源和多种矿产资源的主要产地^[9]。

山地是重要的生态和环境安全屏障。山地森林不仅可以降低山区发生泥石流和滑坡等自然灾害的风险,保障山区民众的生命安全,而且其涵养水源和减少水土流失的功能对下游广大地区的水资源和水质安全尤为重要^[9];山地森林维持的碳库约占全球碳库的 44%^[10],在气候变暖不断加剧的背景下,山地森林对温室气体减排具有重要的现实意义,是减缓全球气候变暖的重要保障;全球一半的生物多样性热点区域都在山区^[11],至少 1/3 的陆地植物生活在山地^[12],而且山地复杂多变的地形、与外界相对隔离的“岛屿”生境以及特殊的地貌条件,使得山地成为物种分化、特有种和孑遗种分布的中心^[13-15]。

山地是科学研究的天然实验室。山地特有的海拔梯度变化,导致温度和降水等环境要素随海拔变化,进而产生与纬度地带性相似的山地土壤和植被垂直带谱,加之山地对全球气候变化的响应存在放大作用,是气候变化的敏感区^[16],从而山地为研究不同植被类型、物种多样性和营养元素的生物地球化学循环对气候变化(氮沉降、温度和降水变化)的响应、适应与反馈提供了理想的场所^[17];由于全球气候变暖的影响,高山地区的冰川大面积退缩,遗留越来越多的冰川退缩迹地,为研究早期的成土作用过

程和岩土演化机理以及风化过程、营养元素释放和植被原生演替之间的关系提供了平台与机会;山地系统(尤其是高山地区)一般远离大城市,较少受到人类活动的干扰,被认为是未被污染的“洁净”区域,因此,常作为监测和研究大气污染的敏感地区^[18]。

山地表生地球化学是研究山地表层化学组成、化学作用和化学演化的自然科学,是山地科学的重要分支。目前,山地表生地球化学研究主要包含了山地生物地球化学、山地环境地球化学以及山地生态地球化学等内容。山地生物地球化学主要关注山地生态系统中物质在自然环境中的传输和转化过程,即环境—生物—环境的循环过程,是针对“过程”开展的一门科学^[19];山地环境地球化学主要关注山地生态系统中天然及人为释放的污染物质(如重金属、有机污染物、废水、废渣等)的迁移转化机制,对生态环境质量和人类健康的影响,以及对下游生态系统的潜在影响;山地生态地球化学是近几年新兴起的一门学科,主要针对山地生态系统开展元素或者化合物的组成特征、来源、含量、形态、迁移转化规律及其产生的生态环境效应研究^[20]。3 个学科相互联系,相互补充,共同构成并促进了山地表生地球化学研究的发展。山地生态系统对全球气候变化的响应和适应以及物质循环研究是当前山地表生地球化学研究关注的热点问题。

1 山地表生生态系统对全球气候变化的响应和适应

全球气候变化不仅会导致生态系统的转变,而对生态系统造成破坏(酸雨、森林火灾、植物枯死、自然灾害等),而且物种对高温和干旱胁迫的脆弱性增加可能会导致死亡率上升和物种灭绝,因此,加强全球气候变化对山地生态系统的影响研究对山地生态安全具有实际意义。目前,在山地表生地球化学研究中,应注重全球气候变化对山地气候因子(温度、降水)、土壤环境以及生物影响等方面的研究工作。

1.1 山地气候因子(温度、降水)

温度和降水直接对山地生物地球化学循环产生

重要影响,并且气候变暖对高山生态系统的显著影响是冰川融化和降水的季节分配差异,从而打破山地生态系统平衡,引起不可预知的后果。冰川具有调节气候因子(温度、降水),影响全球物质循环以及储存污染物的作用。冰川融化不仅改变了水资源的分配^[21],干扰全球碳循环^[22],间接影响物质的迁移转化,而且冰川融化将会释放冰川中保存的物质^[23]。已有研究发现,阿尔卑斯山冰川中具有已溶解的有机化合物^[22];Todd等认为北美洛矶山脉分水岭的锌和其他金属浓度的显著增加与气候变暖导致的冰雪融化有关^[24]。

因此,在全球气候变化的背景下,有必要加强山地生态系统温度、降水等气候因子的长期观测,探寻全球气候变化对山地温度和降水的影响趋势,加强酸沉降和污染物大气沉降的观测记录,为山地生态系统发展和生态安全提供基础资料。

1.2 山地土壤环境

全球气候变化通过改变土壤属性(温度、水分、有机物组成等)进而对山地土壤物质平衡产生影响。一方面,全球气候变化对土壤的风化程度具有重要影响,温度升高和降水增加有助于土壤风化,造成化学物质释放速率的增加;另一方面,全球气候变化对于土壤中的物质转化具有重要影响。Hopkins等指出温带森林大部分土壤储存着数十年的碳,气候变暖将加速该储龄土壤碳的分解速度,这种正反馈机制将反过来影响全球气候变化趋势^[25]。此外,气候因子(如温度和降水)将对土壤微生物产生直接影响,进而间接影响土壤演化以及物质的迁移转化^[26-28]。Li等的研究显示,温度升高能够影响北方森林土壤微生物群落结构及其分泌酶的能力,从而使腐殖化土壤有机物的损失增加^[29]。

土壤作为物质转换和污染物的重要储库,全球气候变化如何改变土壤结构将直接关系到山地生态系统的安全,因此,应注重以下研究:全球气候变化对冻土及其所含物质、土壤演化以及土壤属性的影响;水文状况对土壤物质的迁移转化;不同气候因子调控物质在土壤-微生物-植物、土壤-大气等系统之间的生物地球化学循环机制;全球气候变化条件下,土壤对物质的保持或者释放机制。

1.3 山地生物

在山地表生地球化学研究中,生物(植物、微生物)对养分、水分以及土壤属性的作用非常突出,生物(尤其是植物)对全球气候变化是十分敏感的,例如气候变暖会改变森林植被带的分布,加剧物种竞

争。Ross等根据新西兰西北部山体植物群落的最新证据发现,在过去半个世纪中,全球气候变化引起了温度、降水以及pH值的变化,造成5种植物栖息地环境的变化,进而使适应冷湿条件的特殊植物物种消失^[30]。Gottfried等针对欧洲17个山区60个联网观测点,调查研究了867个植被样地,发现生态系统快速响应气候持续变暖,即大部分植物的理想生境正在趋向更高的寒冷地带,同时发现逐渐上移的植被带将与高山植物群落展开激烈竞争,最终可能导致原有的高山带生境缩小或消失^[31]。Pauli等对欧洲山地植物多样性变化进行了调查,发现大部分植物均具有向上迁移的迹象,并把这种现象归因于全球气候变化导致植物可利用水分的减少^[32]。Dullinger等采用模型预测在当前气候变化趋势下有44%~50%的山地植物将在21世纪末灭绝^[33]。

微生物是土壤的重要组成部分,在土壤演变及植被演替等过程中,微生物均发挥着重要作用。全球气候变化同样影响着微生物的群落组成及微生物活性等,例如气候变暖会增加微生物活性,增加微生物对土壤有机物的矿化速率,最终不仅影响土壤的肥力,进而影响植物对养分的吸收^[34-36],而且也对营养物质的迁移转化产生直接作用^[37]。

全球气候变化对山地植物和微生物的影响将直接关系到山地生态系统的稳定发展,因此,应注重全球气候变化影响下植物种群分布、植被带迁移、植物生理过程在土壤发育和风化作用中的贡献,加强气候因子对微生物的种群分布、结构及活性等方面的研究,关注全球气候变化背景下植物和微生物在山地表生生态系统物质地球化学循环过程中所发挥的作用,最终建立气候因子-土壤-生物的耦合关系。

1.4 小结

气候变化对山地生态系统的影响是复杂而多变的,开展山地表生地球化学循环研究应将气候因子、土壤、生物、水文、大气等作为一个整体进行物质的迁移转化研究,确立不同气候条件下物质的保持、迁移机制,通过野外观测和室内模拟等手段建立适合山地生态系统的地球化学循环模型,为预测未来气候条件下山地生态系统的发展方向提供基础数据和理论基础。

2 山地表生生态系统物质循环与山地生态环境健康

有些元素(如C、N、P、S等)是植物生长的关键限制性元素,而有些元素(如Cd、Pb、Sb、Hg等)是

植物生长不需要的元素,当这些元素含量达到一定程度会对植物造成危害。此外,持久性有机污染物(POPs)在山地的累积将对山地生物的安全带来巨大威胁。由于海拔高度差异,山地存在明显的气候和生态组成上的差异,山地地形、土壤类型以及生物作用等均对山地表生生态系统中物质的循环过程造成重要影响。在山地生态系统中开展物质循环过程、转化机理研究有助于了解物质在山地生态系统中的赋存特征,识别物质来源以及评价潜在的生态风险,从而为山地生态系统的稳定发展和生态修复提供理论基础。

2.1 山地生态系统元素地球化学循环

2.1.1 微量元素分布规律和赋存现状

元素的海拔分布是高山生态系统元素地球化学研究的基础。大气沉降能够导致地表环境中某些微量元素的大量富集,而不同环境介质对微量元素的吸收、吸附和保存能力具有较大差别^[38-39],从而影响微量元素的时空分布特征。因此,需要对多环境介质中微量元素进行分析,进而更全面地阐明高山生态系统微量元素的海拔分布状况,为揭示微量元素的区域乃至全球尺度的传输过程和机制提供理论基础。

目前,在高山地区微量元素的海拔分布特征研究上,采用较多的环境介质包括土壤、苔藓、植物组织、冰雪、降水和大气颗粒物等。Bacardit 等调查了比利牛斯山中部的低海拔地区土壤中 As 的分布,发现岩石风化是土壤中 As 浓度较高的主要原因^[40]。Fu 等针对贡嘎山东坡土壤中 Hg 的浓度进行研究,发现在 1 800~2 200 m 海拔范围内 Hg 浓度最高^[41]。苔藓没有真正意义上的根,赋存的微量金属几乎都来自大气,能很好地反映来自大气沉降的微量金属的空间分布状况。Gerdol 等指出阿尔卑斯山南段苔藓中 Pb、Ni、Mo 等的浓度随海拔升高而逐渐降低^[42]。Shparyk 等在乌克兰喀尔巴阡山地区利用植物组织,发现树木茎中 Pb、Zn、Ni 等元素浓度随海拔增加而逐渐降低,并认为人类活动是影响其空间分布的重要因素^[43]。Kang 等指出,珠穆朗玛峰积雪中的 Cd 和 Pb 浓度没有显著的海拔差异,并认为春季风可能影响微量元素的分布^[44]。以上研究表明:在高山生态系统中,微量元素在不同环境介质中的赋存具有较大的空间异质性,因此,需要根据当地、区域乃至全球尺度下的气候和人类活动等特征,采用多环境介质分析,充分获取微量元素在高山生态系统中的累积特征,探讨影

响微量元素时空分布的影响因素,最终揭示不同尺度上微量元素的迁移转化机制。

2.1.2 营养元素对植物和微生物生长发育的影响

在全球气候变化背景下,学者广泛关注 C、N 和 S 在生态系统的循环过程,不仅揭示了它们对气候变化的反馈机制^[45],而且也强调了营养元素对山地生态系统的限制作用^[46-47]。近年来,山地生态系统中 P 的地球化学循环研究受到了广泛关注。P 与 C、N 不同,山地生态系统中,P 的主要来源是岩石风化,而大气沉降对 P 的贡献非常少。在山地土壤中,P 存在多种赋存形态,不同 P 形态具有不同的生物可利用性,各赋存形态之间可以发生转化。因此,山地生态系统中 P 的地球化学循环具有特殊性。

目前,仍需重视营养元素对山地生态系统的限制作用研究。一方面,要注重单一营养元素在山地生态系统中的迁移转化过程,探讨营养元素的质量平衡关系;另一方面,应强调所有营养元素的共同作用,根据化学计量学原理,建立适合山地生态系统自身特征 C、N、P 的固定比值(Redfield Ratio)。此外,仍需重视其他主要营养元素(如 K、Ca、Mg 等)的地球化学循环过程以及对生态系统的限制作用研究。微量营养元素(尤其是 Cu、Zn 等)地球化学循环与主要营养元素具有较大差异,一旦造成它们在生态系统中的亏损,可能会带来比主要营养元素亏损更加严重的后果,尤其表现在生态修复手段上的欠缺。并且,仍需重视不同营养元素之间的相互作用或者相互竞争关系研究。许多针对农田或者湿地生态系统的研究发现,土壤微量营养元素之间以及主要营养元素与微量营养元素之间存在着竞争吸附的关系,从而导致某些元素在土壤中的保持存在差异。山地生态系统环境条件比较复杂恶劣,营养元素在土壤中的保持受到多种因素控制,来自营养元素之间的影响需要引起重视。

2.1.3 重金属和持久性有机污染物的潜在生态危害

尽管有些重金属元素(如 Cu、Ni、Zn 等)是植物生长所必需的微量营养元素,但当其含量超过植物所需含量时,它们与其他重金属元素(如 Cd、Sb、Hg 等)以及持久性有机污染物一样会对生物体造成巨大危害。

在山地生态系统中,一方面要建立山地土壤、植被、水体和大气重金属及持久性有机污染物的背景水平,调查它们在土壤中的富集/亏损状况,在不同空间尺度下采用多种方法(植物监测、同位素地球化学示踪等)判识污染物质的传输路径和来源;另一方

面,加强重金属和持久性有机污染物在山地生态系统中的保持能力研究,主要调查不同类型土壤对重金属和持久性有机污染物的赋存能力,评价污染物对山地生态系统具有的潜在危害,预测污染物对下游生态系统可能造成的威胁,最终提供生态系统恢复的有效措施;此外,关注人类活动影响下污染物在山地环境中的累积、迁移和转化,定量区分人类活动的贡献。

2.1.4 山地复杂的理化和生物因素对物质的迁移转化

物质在山地生态系统中的循环过程受到很多因素的影响。山地本身存在的气候特征(高度差异而引起的温度、降水差异)、地形(坡度、坡向等)、土壤类型、土壤属性(发育程度、pH值、阳离子交换能力、有机物等)、植被类型、微生物作用以及大气沉降等均对元素和污染物的迁移转化起到重要作用^[48-52]。对于不同的海拔水平或者不同植被带,了解控制物质迁移转化的主导因素,理解这些因素控制元素迁移转化的机制,采取措施调控由主导因素发生变化而造成的生态系统转变,是山地表生地球化学循环研究的重点。

2.2 山地生态系统生物地球化学循环

2.2.1 植物对控制物质循环和山地生态系统演化以及人类生存环境的调节作用

山地生态系统中植物种类丰富,不同海拔上植被发育和演替状况不同,从而对物质的迁移转化具有不同的影响机制。首先,不同类型的植物对土壤中物质的吸收不仅具有选择性上的差异^[53],而且不同类型植物对物质的吸收量和保存量也存在差异;其次,植物根区具有加速矿物风化,加快元素释放以及调节元素形态转化等功能^[54-55];再次,植被通过凋落物、根区分泌物等向土壤中归还营养物质^[56]。总之,植物调节着物质的输入、迁移、转化、循环和输出以及其与流域生态环境之间的关系。

因此,应加强山地土壤-植物界面研究。重点关注植物根区矿物风化、元素释放迁移以及形态转化的生物地球化学作用,采用同位素组成和通量等手段定量获取物质在土壤-植物间的转换量;另一方面,注重土壤-植被系统中C、N、P、S以及其他金属矿物养分的分布和迁移转化特征,调查其在植物不同组织中的累积和分配;此外,结合质量平衡、植物监测(如苔藓示踪大气沉降)和同位素地球化学示踪等手段,探讨污染元素或者有机污染物在土壤-植被系统中的生物地球化学行为,评价有害物质对山地

植被的潜在危害。

2.2.2 微生物在山地物质循环过程的转换作用

在山地生态系统土壤演化过程中,微生物发挥着重要作用,主要体现在分解土壤有机质,吸收、固定和释放养分,通过共生关系促进植物生长以及污染物的治理等^[37,57-58]。

目前,在山地生态系统中,学者们对在不同海拔梯度下微生物的种群结构、数量以及分布特征,微生物对营养元素在土壤-植物界面上的生物地球化学循环作用以及微生物对污染物质的降解等方面开展了较多的研究工作,但是仍要重点关注:①山地生态系统中与微生物有关的营养元素循环过程中输入-输出总量、通量、周转速率和分配比例研究;②不同时空尺度上微生物对物质迁移转化的影响以及其关联性研究;③从单一微生物单影响因素对营养物质的循环到多种微生物、多因素共同作用下营养物质的地球化学循环机理的扩展以及与其他元素的耦合机理研究;④在山地复杂的生态环境下微生物对物质的生物地球化学循环过程的影响研究。

3 结 语

山地生态系统是陆地生态系统中最为重要、敏感且复杂的生态系统之一。山地表生地球化学关系到碳循环、水循环、营养盐循环及流失、水土流失、污染物迁移转化和归趋、植被垂直带谱形成、森林生态系统发育与稳定、石漠化—荒漠化等山区生态与环境问题,关系到山区经济与社会发展。因此,开展山地表生地球化学循环研究应将全球气候变化、大气、水体、土壤、生物等有机结合,从初期的单一研究单元着手积累基础数据,到后期的多单元、多因素研究的整合,通过长期的野外监测、室内分析工作,最终建立适合山地生态系统的物质地球化学循环模型,预测将来全球气候变化和人类活动影响下山地生态环境的发展趋势及能带来的潜在影响,这对山地生态环境安全以及山区社会经济发展具有重要意义。

参考文献:

References:

- [1] 钟祥浩. 加强人山关系地域系统为核心的山地科学研究[J]. 山地学报, 2011, 29(1): 1-5.
ZHONG Xiang-hao. Strengthen Research on Mountain Sciences as the Core of Man-mountain Areal System[J]. Journal of Mountain Science, 2011, 29(1): 1-5.
- [2] 程根伟, 钟祥浩, 郭梅菊. 山地科学的重点问题与学科

- 框架[J]. 山地学报, 2012, 30(6): 747-753.
- CHENG Gen-wei, ZHONG Xiang-hao, GUO Mei-ju. The Outlines on Study Fields and Subject Framework of Mountain Sciences[J]. Journal of Mountain Science, 2012, 30(6): 747-753.
- [3] 邓 伟. 科学面对山区发展已是刻不容缓——写自汶川大地震的警示[J]. 山地学报, 2009, 27(1): 1-4.
- DENG Wei. Faced with the Scientific Development of Mountain Area Is Imperative—Write Since Wenchuan Earthquake Warning[J]. Journal of Mountain Science, 2009, 27(1): 1-4.
- [4] 邓 伟, 程根伟, 文安邦. 中国山地科学发展构想[J]. 中国科学院院刊, 2008, 23(2): 156-161.
- DENG Wei, CHENG Gen-wei, WEN An-bang. The Conception of Mountain Science Development in China [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2008, 23 (2): 156-161.
- [5] BENISTON M, DIAZ H F, BRADLEY R S. Climatic Change at High Elevation Sites: An Overview[J]. Climatic Change, 1997, 36(3/4): 233-251.
- [6] 江晓波. 中国山地范围界定的初步意见[J]. 山地学报, 2008, 26(2): 129-136.
- JIANG Xiao-bo. Preliminary Study on Computing the Area of Mountain Regions in China Based on Geographic Information System[J]. Journal of Mountain Science, 2008, 26(2): 129-136.
- [7] VIVIROLI D, WEINGARTNER R. The Hydrological Significance of Mountains: From Regional to Global Scale[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2004, 8(6): 1016-1029.
- [8] PRICE M, KOHLER T, WACHS T, et al. Mountains of the World: Mountains, Energy and Transport[M]. Bern: ACUCSD, 2001.
- [9] PRICE M, WACHS T, KOHLER T. Mountains of the World: Mountain Forests and Sustainable Development[M]. Bern: ACUCSD, 2000.
- [10] 方精云. 全球生态学——气候变化与生态响应[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- FANG Jing-yun. Global Ecology—Climate Changes and Ecological Responses[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000.
- [11] KOHLER T, GIGER M, HURNI H, et al. Mountains and Climate Change: A Global Concern[J]. Mountain Research and Development, 2010, 30(1): 53-55.
- [12] BARTHLOTT W, LAUER W, PLACKE A. Global Distribution of Species Diversity in Vascular Plants: Towards a World Map of Phytodiversity[J]. Erdkunde, 1996, 50(4): 317-327.
- [13] 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 Jing-yun, SHEN Ze-hao, CUI Hai-ting. Ecological Characteristics of Mountains and Research Issues of Mountain Ecology[J]. Biodiversity Science, 2004, 12(1): 10-19.
- [14] 方精云, 朱江玲, 吉成均, 等. 从生态学观点看生态文明建设[J]. 中国科学院院刊, 2013, 28(2): 182-188.
- FANG Jing-yun, ZHU Jiang-ling, JI Cheng-jun, et al. Ecological Perspectives on Ecological Civilization Construction[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2013, 28(2): 182-188.
- [15] YANG H B, HOLMGREN N H, MILL R R. Pedicularis[M] // WU Z Y, RAVEN P H. Flora of China. Beijing: Science Press, 1998: 97-209.
- [16] BRADLEY R S, KEIMIG F, DIAZ H F. Projected Temperature Changes Along American Cordillera and Planned GCOS Network[J]. Geophysical Research Letters, 2004, 31(16): L16210.
- [17] KORNER C. The Use of ‘Altitude’ in Ecological Research[J]. Trends in Ecology and Evolution, 2007, 22 (11): 569-574.
- [18] WU Y H, BIN H J, ZHOU J, et al. Atmospheric Deposition of Cd Accumulated in the Montane Soil, Gongga Mt., China[J]. Journal of Soils Sediments, 2011, 11(6): 940-946.
- [19] 刘从强, 郎赞超, 李思亮, 等. 喀斯特生态系统生物地球化学过程与物质循环研究: 重要性、现状与趋势[J]. 地学前缘, 2009, 16(6): 1-12.
- LIU Cong-qiang, LANG Yun-chao, LI Si-liang, et al. Researches on Biogeochemical Processes and Nutrient Cycling in Karstic Ecological Systems, Southwest China: A Review[J]. Earth Science Frontiers, 2009, 16 (6): 1-12.
- [20] 吴艳宏, 邴海健. 山地生态地球化学——定义、进展及展望[J]. 地质论评, 2012, 58(1): 106-115.
- WU Yan-hong, BING Hai-jian. Ecogeochemistry in Mountain Region—Definition, Progress and Prospection[J]. Geological Review, 2012, 58(1): 106-115.
- [21] SORG A, BOLCH T, STOFFEL M, et al. Climate Change Impacts on Glaciers and Runoff in Tien Shan (Central Asia)[J]. Nature Climate Change, 2012, 2(10): 725-731.
- [22] SINGER G A, FASCHING C, WILHELM L, et al. Biogeochemically Diverse Organic Matter in Alpine Glaciers and Its Downstream Fate[J]. Nature Geoscience, 2012, 5(10): 710-714.

- [23] MEYER T, WANIA F. Organic Contaminant Amplification During Snowmelt[J]. *Water Research*, 2008, 42(8/9):1847-1865.
- [24] TODD A S, MANNING A H, VERPLANCK P L, et al. Climate-change-driven Deterioration of Water Quality in a Mineralized Watershed[J]. *Environmental Science and Technology*, 2012, 46(17):9324-9332.
- [25] HOPKINS F M, TORN M S, TRUMBORE S E. Warming Accelerates Decomposition of Decades-old Carbon in Forest Soils[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2012, 109(26):1753-1761.
- [26] 刘秉儒, 张秀珍, 胡天华, 等. 贺兰山不同海拔典型植被带土壤微生物多样性[J]. *生态学报*, 2013, 33(22):7211-7220.
- LIU Bing-ru, ZHANG Xiu-zhen, HU Tian-hua, et al. Soil Microbial Diversity Under Typical Vegetation Zones Along an Elevation Gradient in Helan Mountains[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(22):7211-7220.
- [27] 吴艳宏, PRIETZEL J, 周俊, 等. 两种形态分析方法对冰川退缩时间序列土壤中磷的生物有效性评价[J]. *中国科学:地球科学*, 2014, 44(9):2006-2015.
- WU Yan-hong, PRIETZEL J, ZHOU Jun, et al. Soil Phosphorus Bioavailability Assessed by XANES and Hedley Sequential Fractionation Technique in a Glacier Foreland Chronosequence in Gongga Mountain, South-western China[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2014, 44(9):2006-2015.
- [28] 吴艳宏, 周俊, 邴海健, 等. 贡嘎山海螺沟典型植被带总磷分布特征[J]. *地球科学与环境学报*, 2012, 34(3):70-74.
- WU Yan-hong, ZHOU Jun, BING Hai-jian, et al. Characteristic of Total Phosphorus Distribution in Typical Vegetation Zones Along Hailuoguo of Gongga Mountain[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2012, 34(3):70-74.
- [29] LI J W, ZIEGLER S, LANE C S, et al. Warming-enhanced Preferential Microbial Mineralization of Humified Boreal Forest Soil Organic Matter: Interpretation of Soil Profiles Along a Climate Transect Using Laboratory Incubations[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2012, 117(G2). doi:10.1029/2011jg001769.
- [30] ROSS L C, WOODIN S J, HESTER A J, et al. Biotic Homogenization of Upland Vegetation: Patterns and Drivers at Multiple Spatial Scales over Five Decades[J]. *Journal of Vegetation Science*, 2012, 23(4):755-770.
- [31] GOTTFRIED M, PAULI H, FUTSCHIK A, et al. Continent-wide Response of Mountain Vegetation to Climate Change[J]. *Nature Climate Change*, 2012, 2(2):111-115.
- [32] PAULI H, GOTTFRIED M, DULLINGER S, et al. Recent Plant Diversity Changes on Europe's Mountain Summits[J]. *Science*, 2012, 336:353-355.
- [33] DULLINGER S, GATTRINGER A, THUILLER W, et al. Extinction Debt of High-mountain Plants Under Twenty-first-century Climate Change[J]. *Nature Climate Change*, 2012, 2(8):619-622.
- [34] SAHU M K, SIVAKUMAR K, THANGARADJOU T, et al. Phosphate Solubilizing Actinomycetes in the Estuarine Environment: An Inventory[J]. *Journal of Environmental Biology*, 2007, 28(4):795-798.
- [35] RICHARDSON A E, BAREA J M, MCNEILL A M, et al. Acquisition of Phosphorus and Nitrogen in the Rhizosphere and Plant Growth Promotion by Microorganisms[J]. *Plant and Soil*, 2009, 321(1/2):305-339.
- [36] RICHARDSON A E, HOCKING P J, SIMPSON R J, et al. Plant Mechanisms to Optimise Access to Soil Phosphorus[J]. *Crop and Pasture Science*, 2009, 60:124-143.
- [37] RICHARDSON A E, HOCKING P J, SIMPSON R J, et al. Soil Microorganisms Mediating Phosphorus Availability[J]. *Plant Physiology*, 2011, 156:989-996.
- [38] SUN S Q, WU Y H, ZHOU J, et al. Comparison of Element Concentrations in Fir and Rhododendron Leaves and Twigs Along an Altitudinal Gradient[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2011, 30(11):2608-2619.
- [39] YANG H D, ROSE N L, BATTARBEE R W. Distribution of Some Trace Metals in Lochnagar, a Scottish Mountain Lake Ecosystem and Its Catchment[J]. *Science of the Total Environment*, 2002, 285(1/2/3):197-208.
- [40] BACARDIT M, CAMARERO L. Major and Trace Elements in Soils in the Central Pyrenees: High Altitude Soils as a Cumulative Record of Background Atmospheric Contamination over SW Europe[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2010, 17(9):1606-1621.
- [41] FU X W, FENG X B, WANG S F. Exchange Fluxes of Hg Between Surfaces and Atmosphere in the Eastern Flank of Mount Gongga, Sichuan Province, South-western China[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2008, 113(D20). doi:10.1029/2008jd009814.
- [42] GERDOL R, BRAGAZZA L, MARCHESINI R. Ele-

- ment Concentrations in the Forest Moss *Hylocomium splendens*: Variation Associated with Altitude, Net Primary Production and Soil Chemistry[J]. *Environmental Pollution*, 2002, 116(1): 129-135.
- [43] SHPARYK Y S, PARPAN V I. Heavy Metal Pollution and Forest Health in the Ukrainian Carpathians [J]. *Environmental Pollution*, 2004, 130(1): 55-63.
- [44] KANG S C, ZHANG Q G, KASPARI S, et al. Spatial and Seasonal Variations of Elemental Composition in Mt. Everest (Qomolangma) Snow/Firn [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, 41(34): 7208-7218.
- [45] FINZI A C, AUSTIN A T, CLELAND E E, et al. Responses and Feedbacks of Coupled Biogeochemical Cycles to Climate Change: Examples from Terrestrial Ecosystems[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2011, 9(1): 61-67.
- [46] ELSER J J, BRACKEN M E S, CLELAND E E, et al. Global Analysis of Nitrogen and Phosphorus Limitation of Primary Producers in Freshwater, Marine and Terrestrial Ecosystems[J]. *Ecology Letters*, 2007, 10(12): 1135-1142.
- [47] HARPOLE W S, NGAI J T, CLELAND E E, et al. Nutrient Co-limitation of Primary Producer Communities[J]. *Ecology Letters*, 2011, 14(9): 852-862.
- [48] REIMANN C, CARITAT P. Distinguishing Between Natural and Anthropogenic Sources for Elements in the Environment: Regional Geochemical Surveys Versus Enrichment Factors[J]. *Science of the Total Environment*, 2005, 337(1/2/3): 91-107.
- [49] REIMANN C, ARNOLDUSSEN A, FINNE T E, et al. Element Contents in Mountain Birch Leaves, Bark and Wood Under Different Anthropogenic and Geogenic Conditions[J]. *Applied Geochemistry*, 2007, 22(7): 1549-1566.
- [50] LIU H, CHEN L P, AI Y W, et al. Heavy Metal Contamination in Soil Alongside Mountain Railway in Sichuan, China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2009, 152(1/2/3/4): 25-33.
- [51] BACARDIT M, CAMARERO L. Fluxes of Al, Fe, Ti, Mn, Pb, Cd, Zn, Ni, Cu, and As in Monthly Bulk Deposition over the Pyrenees (SW Europe): The Influence of Meteorology on the Atmospheric Component of Trace Element Cycles and Its Implications for High Mountain Lakes[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2009, 114 (G2). doi: 10. 1029/2008jg000732.
- [52] GONZALEZ-MIQUEO L, ELUSTONDO D, LASHERAS E, et al. Heavy Metal and Nitrogen Monitoring Using Moss and Topsoil Samples in a Pyrenean Forest Catchment[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2010, 210(1/2/3/4): 335-346.
- [53] LODHIYAL N, LODHIYAL L S. Aspects of Nutrient Cycling and Nutrient Use Pattern of Bhabar Shisham Forest in Central Himalaya, India[J]. *Forest Ecology and Management*, 2003, 176(1/2/3): 237-252.
- [54] WANG X, TANG C, GUPPY C N, et al. Phosphorus Acquisition Characteristics of Cotton (*Gossypium Hirsutum* L.), Wheat (*Triticum Aestivum* L.) and White Lupin (*Lupinus Albus* L.) Under P Deficient Conditions[J]. *Plant and Soil*, 2008, 312(1/2): 117-128.
- [55] CARVALHAIS L C, DENNIS P G, FEDOSEYENKO D, et al. Root Exudation of Sugars, Amino Acids, and Organic Acids by Maize as Affected by Nitrogen, Phosphorus, Potassium, and Iron Deficiency[J]. *Journal of Plant Nutrient and Soil Sciences*, 2011, 174(1): 3-11.
- [56] DAKORA F D, PHILLIPS D A. Root Exudates as Mediators of Mineral Acquisition in Low-nutrient Environments[J]. *Plant and Soil*, 2002, 245(1): 35-47.
- [57] NILSSON L O, WALLANDER H. Production of External Mycelium by Ectomycorrhizal Fungi in a Norway Spruce Forest was Reduced in Response to Nitrogen Fertilization[J]. *New Phytologist*, 2003, 158(2): 409-416.
- [58] 连 宾, 陈 烨, 朱立军, 等. 微生物对碳酸盐的风化作用[J]. *地学前缘*, 2008, 15(6): 90-99.
- LIAN Bin, CHEN Ye, ZHU Li-jun, et al. Progress in the Study of the Weathering of Carbonate Rock by Microbes[J]. *Earth Science Frontiers*, 2008, 15(6): 90-99.