

文章编号: 1008-2786-(2017)5-686-12

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000268

贡嘎山营养元素和重金属的生物地球化学研究现状与展望

祝 贺^{1,2}, 吴艳宏^{1*}, 邴海健¹, 周 俊¹, 孙宏洋¹, 何清清^{1,2}

(1. 中国科学院、水利部 成都山地灾害与环境研究所 山地表生过程与生态调控重点实验室, 成都 610041;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 本文对贡嘎山地区营养元素和重金属的生物地球化学循环的研究现状进行了总结, 在此基础上探讨了未来须关注的热点和方向。目前围绕贡嘎山生态系统的碳(C)、氮(N)生物地球化学循环研究主要开展了 C 和 N 的分布特征、储量、凋落物中元素的归还与释放等方面的工作; 磷(P)的生物地球化学研究包括不同海拔梯度和土壤演替阶段土壤 P 的形态、生物有效性、迁移转化及其影响因素、成土作用和微生物作用对土壤 P 的生物有效性的影响等; 重金属的生物地球化学研究主要围绕重金属的赋存特征、来源、影响因素和潜在生态风险等方面。未来需要将大气-水-土壤-植物-微生物系统作为一个整体, 系统研究养分元素的生物地球化学循环过程和机制以及重金属的迁移转化和关键控制因素, 加强各元素生物地球化学循环耦合关系研究, 建立多种元素循环的耦合模型, 为山地生态安全和生态修复提供理论基础。

关键词: 营养元素; 重金属; 植物; 微生物; 迁移转化; 贡嘎山

中图分类号: P951

文献标志码: A

在地球表层系统中物质从自然环境进入生物圈, 再由生物圈归还到自然环境的过程称为生物地球化学循环^[1]。生源元素碳(C)、氮(N)、磷(P)以及部分微量金属元素是生物生长必需的养分元素^[1], 它们在自然界中被生物吸收, 供给生物生理和生长的需求, 然后通过生物新陈代谢归还到自然环境中。由于自然过程和人类活动的影响, 土壤中部分元素存在一定程度的亏损或富集, 同时由于大气长距离传输会导致有害微量金属元素在异地生态系统中累积, 对生态系统的稳定发展和安全存在潜在影响。因此, 针对不同的生态系统开展生物地球化学研究, 探究元素的赋存、来源及循环过程对生态环境保护至关重要。

山地区域, 尤其是高山地区, 对全球变化比其他

地貌单元更为敏感^[1]。海拔高差明显的山地生态系统中气候和水分条件随海拔梯度发生显著变化, 由高海拔到低海拔风化作用、成土作用增强, 地表植被带谱发生明显分异。因此, 在高山生态系统针对营养元素和重金属元素开展研究有助于进一步拓展和深化生物地球化学领域的理论和方法, 以及揭示全球气候变化和人类活动进程对区域生态环境的影响。

我国是一个多山的国家, 山地和丘陵面积约占中国陆地面积的 2/3^[2]。山地生态系统是我国陆地生态系统的重要组成部分。贡嘎山位于青藏高原东南缘, 大雪山脉中南段, 主峰海拔 7556 m, 为横断山区海拔最高的山地^[2]。由于贡嘎山自身陡峭, 在其东坡海螺沟流域内 28 km 的水平距离形成了约 6400 m 的高差, 并且形成了独特的气候、水文等梯

收稿日期 (Received date): 2017-06-20; **改回日期** (Accepted date): 2017-09-12

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金(41630751), 中国科学院青年创新促进会人才项目[National Natural Sciences Foundation of China (41630751), Youth Innovation Promotion Association Fund]

作者简介 (Biography): 祝贺(1989-), 男, 博士研究生, 主要从事生物地球化学研究[Zhu He (1989-), male, Ph. D candidate, research on biogeochemistry] E-mail: zhuhe@imde.ac.cn

*** 通讯作者** (Corresponding author): 吴艳宏(1969-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事生物地球化学与山地环境变化研究[Wu Yanhong (1969-), male, professor, Ph. D supervisor, research on biogeochemistry and mountainous environment] E-mail: yhwu@imde.ac.cn

度变化特征,而且山地局地气候和土壤类型也发生明显分异^[3-4],拥有从亚热带到寒带完整的地带性自然垂直带谱^[4-5]。此外,自小冰期以来,在海螺沟海拔 2950 m 左右的冰川退缩迹地上,发育了长 2 km 宽 200 m 左右、落差仅 100 多米的原生演替序列,即从裸地到峨眉冷杉林的完整植被演替序列^[5-6]。冰川退缩形成的退缩迹地是研究早期成土过程、土壤发育和植被演替的绝佳场所,气候条件可能不是主导因素,而元素供给则可能是关键因子^[7]。特殊的自然环境对营养元素在贡嘎山生态系统中的分布、形态转化以及迁移过程也有明显的地带性。而且,由于贡嘎山远离人类活动中心,受人类活动直接影响较小,高大山体的冷凝作用可导致湿沉降增加,从而成为是大气来源的重金属的重要来源,高山地区土壤、植被、大气干湿沉降等可用来指示和监测区域大气环境的污染状况^[8-12]。综上,贡嘎山生态系统自身优越的环境条件为研究营养元素和重金属的生物地球化学循环提供了理想场所^[1,7,13]。

本文系统梳理了近 30 年来在贡嘎山生态系统中开展的营养元素和重金属的生物地球化学循环研究现状,在此基础上,提出了今后需要利用新的技术手段系统研究养分元素在大气-水-土壤-植物-微生物系统中的生物地球化学循环过程及机制,加强山地重金属迁移转化及影响机制研究,建立多元素循环的耦合模型的研究方向。

1 贡嘎山营养元素地球化学研究

在全球气候变化的背景下,C、N 和 P 作为生物生长所必需的营养元素是山地系统生物地球化学研究的热点,是维持生态系统服务与功能的重要元素^[14]。其生物地球化学循环过程是在初级生产力、呼吸和分解等过程中的生物化学反应实现^[1],其中 C 是生物基本生命过程的基本营养元素,而 N 和 P 是限制植物生长和不同生物过程的重要营养物质^[15-16]。

1.1 贡嘎山生态系统 C 和 N 的研究现状

目前在贡嘎山地区 C 和 N 研究主要针对其分布特征^[17-22]、储量^[23-30]、凋落物中元素的归还^[30-33],以及 C 和 N 的释放(例如 CO₂、CH₄ 和 N₂O)^[34-36]等方面。

1.1.1 土壤和植物中 C 和 N 的分布特征

土壤中 C 和 N 的分布与海拔高度密切相关^[37-41]。在贡嘎山东坡土壤中 C 和总 N(TN)的储

量整体呈现随海拔的升高而升高^[17-19],但是 C 和 TN 均在针阔混交林带和林线附近出现波动并出现最高值^[17],说明在植被过渡带特殊的气候和土壤环境条件有利于 C 和 N 的累积^[17]。王良健^[18]的研究发现土壤 C 和 TN 含量随海拔升高而升高,分布特征与海拔高度服从对数函数的关系且相关系数良好。Tan 等^[20]最近的研究认为,土壤中 C 和 TN 含量变化与海拔梯度并没有明显的相关关系,是微生物 N 的固定和植物的吸收两种机制共同作用产生的结果。在土壤剖面上,总有机 C(TOC)和 N 的分布特征相似,土壤 O 层和 A 层中 C 和 N 的储量大于土壤 B 层和 C 层,这与土壤中动植物残体的分布特征类似,说明土壤 C 主要来自凋落物和动植物残体,而 N 主要来自凋落物的分解^[17]。

土壤 TOC 和 TN 的含量与地表植被类型和生物量密切相关。研究表明,土壤 C 储量与不同海拔梯度上的生物量有关^[18-19]。Yang 等^[21]发现在海拔梯度上地上生物量在海拔 2500 ~ 2800 m 最大(524.55 t/hm²),然后分别向高海拔和低海拔处呈减小的趋势,所以在不同的海拔高度上植物 C 和 N 也呈现出先增加后减小的变化趋势(表 1),但是 Tan 等^[20]认为植物中 C 含量变化与海拔梯度并没有明显的相关关系,而植物 N 的含量与海拔梯度相关,原因在于温度降低导致土壤对植物营养元素 N 的供应减少使得植物中 N 储量产生海拔分异。

1.1.2 C 和 N 的储存与归还

在生态系统发育早期,土壤中 C 和 N 的积累主要依赖于地表植被群落。在海螺沟冰川退缩区内土壤 TOC 和 TN 的储量随着植被群落的演替呈现明显增加的趋势,有机质层贡献了大部分 TOC 和 TN 的储量,TOC 的快速积累加速了土壤发育过程,但是累积速率却是随着发育时间的增加而降低^[22]。虽然王吉鹏等^[23]和 Yang 等^[21]对有机质层 C 的储量估算略有差异,但是一致认为植被类型是影响土壤中 C 和 N 累积速率的重要因素。同时,与其它研究区域对比,海螺沟冰川退缩区土壤 C 和 N 的累积速率较快,尤其是 2 ~ 125 年内的累积速率显著大于发育 1400 年的水平,更加适宜的气候和森林植被演替是造成这一现象的主要原因^[23-24]。

生长期不同,森林生态系统中 C 的储量也会有所差异,原因主要在于植物的光合强度和归还能力不同^[25-27]。例如,峨眉冷杉成熟林的地上生物量和 C 储量要大于中龄林,但是成熟林的固 C 能力要小

于中龄林(表1),原因在于中龄林生长速度快,光合作用固C能力更强^[28]。同位素技术在揭示植物光合作用途径方面具有明显优势,李嘉竹等^[29]和谢静等^[30]通过对贡嘎山东坡不同海拔C3植物的碳同位素研究表明,随着海拔的升高, $\delta^{13}\text{C}$ 值呈增高的趋势,温度和降水是影响光合作用的主要影响因子。

即使是同一植物,不同植物器官的C储存能力也会表现出很大差别。在贡嘎山生态系统中植物组织中C的储量整体上表现出叶>枝>树干的特征^[31]。因此,在凋落物分解而发生元素返还时,由于植物的生物量、固C能力以及凋落物量的差异造成不同植物和器官对C的返还能力存在差异^[32-33]。土壤N主要来源于凋落物分解,在贡嘎山东坡海拔2200~3580 m(落叶阔叶-常绿阔叶混交林带至亚高山针叶林带)范围内,凋落物产量逐渐降低,凋落物的N归还量也从落叶阔叶-常绿阔叶混交林的50.5 kg/(hm²·yr)降低到针叶林带的35.0 kg/(hm²·yr)(表2)。类似地,凋落物C的归还量从落叶阔叶-常绿阔叶混交林的2062.3 kg/(hm²·yr)降低到针叶林带的1483.6 kg/(hm²·yr)^[32]。

表1 贡嘎山东坡地上植被生物量和C储量(t/hm²)

Tab. 1 Aboveground biomass and C reserves in the plants of the eastern slope of Mt. Gongga (t/hm²)

海拔(m)	生物量	C 储量		参考 文献
		植物	土壤	
针叶林		143.2	172.4	
演替林	3000~3100	30.7	58.0	[28]
采伐迹地		1.5	18.3	
成熟林	2700~3600	351.8	172.7	
中龄林	2700~3600	121.8	58.0	[25]
常绿阔叶混交林	1900~2500	233.5	103.6	
针阔混交林	2500~2800	524.6	245.3	
亚高山暗针叶林	2800~3600	415.8	193.0	[19]
高山灌丛	3600~4200	20.6	9.8	

表2 贡嘎山东坡植物中C和N的归还量(kg/(hm²·yr))

Tab. 2 The returning amounts of C and N in the plants of eastern slope of Mt. Gongga (kg/(hm²·yr))

海拔(m)	植被类型	C	N	参考文献
	峨眉冷杉成熟林	1431.6	28.7	
3000	峨眉冷杉中龄林	1400.8	28.7	[29]
	峨眉冷杉幼龄林	1167.5	38.6	
2200	针阔混交林	2062.3	50.5	
3000	峨眉冷杉林	1431.6	28.7	[32]
3580	峨眉冷杉林	1483.6	35.0	

1.1.3 C和N释放

土壤呼吸作用释放CO₂是C循环的重要环节。现有研究表明,贡嘎山土壤呼吸作用释放CO₂的强度表现出明显的规律性^[34-36]。罗辑等^[34-35]分别对贡嘎山的冰川退缩区和垂直带谱的土壤呼吸进行了初步研究。在冰川退缩区,随着植被类型由先锋群落逐渐向峨眉冷杉群落演替,土壤CO₂的释放量逐渐增加,原因在于土壤发育年龄、生物量和净初级生产力等因素是影响不同植被群落土壤呼吸速率的主要因素,也是造成各群落之间土壤呼吸速率存在差异的主要原因^[35];在海拔3000 m的峨眉冷杉林,不同林龄类型呼吸强度表现为采伐迹地>成熟冷杉林>演替林,主要是因为采伐迹地由于草本植物增加、土壤温度升高导致呼吸强度增加进而释放大量的CO₂,所以表现出明显的C“源”作用^[34]。由于峨眉冷杉成熟林和演替林生物量较大,固C强度大于CO₂的释放强度,所以成熟林和演替林均表现为C“汇”作用^[34]。

对气候变化响应最为敏感的是采伐迹地,气候变暖将会加剧采伐迹地的土壤呼吸作用,进而影响亚高山暗针叶林区的C“源”与“汇”。Lu等^[42]利用基于过程的生物地球化学模型(Forest-DNDC)模拟研究了温度和降水变化对贡嘎山东坡亚高山峨眉冷杉林温室气体释放和C含量的影响。研究发现,温度变化强烈影响该种林地的C通量、土壤C动态和土壤温室气体的释放;而降水则对土壤N₂O和NO释放影响较大。齐玉春等^[43]对CH₄和N₂O的原位观测得出的结论与此类似。同样地,罗辑等^[34]和彭亮等^[44]基于原位调查研究发现,土壤温度是影响土壤呼吸时空变异的主要因子,而土壤湿度并不是影响贡嘎山高山生态系统土壤呼吸速率的重要因素。

1.1.4 C和N的循环通量

C的生物地球化学循环过程是植物通过光合作用固定大气中的CO₂,然后被植物利用,其中大部分C以木质素的形式保存在植物体中或者转化为土壤有机物质。植物在夜间进行呼吸作用释放CO₂,同时土壤中微生物活动也进行CO₂的释放。程根伟等^[25]对贡嘎山峨眉冷杉的研究表明(图1),植物通过光合作用固定的C为22~24 t/(hm²·yr),而通过地上(树冠层)和地下部分(土壤及根系)呼吸作用释放的C分别为3~5.5 t/(hm²·yr)和10~19 t/(hm²·yr),最终形成的地上和地下C的储量分别为177.4和143.2 t/(hm²·yr)。因此,贡嘎山峨眉

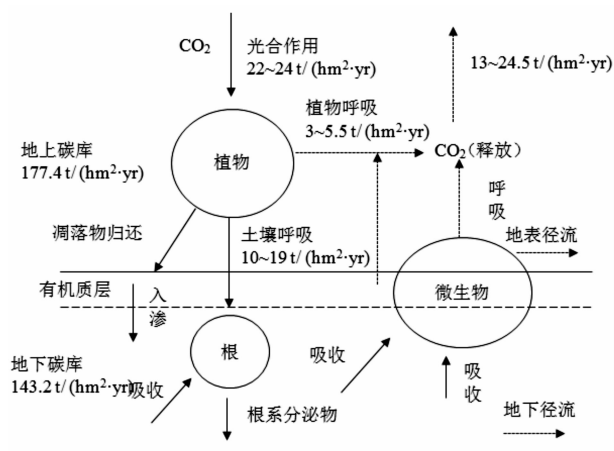


图1 贡嘎山森林生态系统C的生物地球化学循环示意图

Fig. 1 Characteristics of biogeochemical cycles of C in the ecosystem of Gongga Mountain

冷杉林每年净固定的C可以达到 $7.05 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{yr})$ 。但是,目前在贡嘎山生态系统中关于N的循环通量研究还未有报道。

1.2 贡嘎山P的研究现状

P与C和N不同,P主要来自土壤风化,大气沉降对P的贡献相对较少。目前在贡嘎山针对P的生物地球化学循环研究主要集中不同海拔梯度和土壤演替阶段土壤P的形态、生物有效性、迁移转化及其影响因素。

1.2.1 土壤P的分布特征和形态变化

在高山生态系统P的分布特征受到局地气候、土壤发育和植被类型等多种因素的影响^[45-47]。在海拔梯度上,Zhou等^[24]发现随着海拔梯度增加土壤总P(TP)的浓度也呈现增加趋势,在海拔3838~4235 m土壤TP的储量明显高于2032~3614 m。表层土壤TP浓度和储量的最高值出现在海拔3800 m,最低点位于2032 m。随着海拔的升高Ca结合态P(Ca-P)的分布呈现高-低-高的分布趋势,原因在于P的空间分布特征与土壤pH、植被类型和土壤有机质有关,植被通过影响土壤理化性质和凋落物进而影响土壤P的空间分布。吴艳宏等^[48]对冰川退缩区的研究发现,土壤TP随着土壤发育时间的增加而减少,但是TP及其形态没有明显的季节差异。王吉鹏^[23]的研究发现,土壤O层和A层中TP随着成土时间和植被演替呈下降趋势,原因在于较长时间的土壤风化和植物吸收使土壤TP的含量降低,同时,其对冰川退缩区植被中P的储量进行估算,结果显示群落等级越高植物中P的储量越高,在大约125年的区域达到 $116.51 \text{ kg}/\text{ha}$ 。

多种方法已经应用于贡嘎山土壤P的形态分析,如Hedley连续提取^[48-50]和XANES方法^[48,51-53]。吴艳宏等^[48]利用Hedley连续提取和XANES方法对比研究发现,两种方法可以很好地区分生物有效P(Bio-P)的形态和金属结合态的P,同时发现在不同植物作用下土壤P的形态会产生明显差异。在海螺沟冰川退缩区,经过120年左右的植被演替表层土壤中原生矿物P快速减少,有机P快速增加^[50]。Wang等^[54]在对成土早期P的生物地球化学循环研究认为,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,同时在海螺沟冰川退缩区植被演替至80~120年左右,土壤中大量的P被植物固定在生物量中($299.3 \text{ kg}/\text{hm}^2$)。

在陆地向水体迁移和沉积过程中P的形态特征会发生明显变化。吴艳宏等^[55]对贡嘎山草海子流域P的形态及其迁移转化的研究发现,流域内土壤成土母质中P以Ca-P为主,表层土壤中P以Al和Fe结合态为主,占TP的49%~80%,而湖泊沉积物中Al和Fe结合态P下降到46%左右。在成土作用及植物吸收的过程中P由土壤剖面下部向上迁移,迁移的主要形态为树脂提取态(Rin-P),而Rin-P还是由陆地向水体迁移的主要P形态。

除此之外,微生物量P(MBP)也是P存在的一种重要形式^[56-57]。Sun等^[58]研究表明,贡嘎山东坡土壤MBP的含量呈低-高-低的抛物线分布模式。土壤MBP的最大值出现在以亚高山暗针叶林为主的区域(海拔约3300 m,浓度为 $167 \text{ mg}/\text{kg}$),最低值出现在高山草甸地带(海拔4221 m,浓度为 $51 \text{ mg}/\text{kg}$)。贡嘎山东坡的降雨、植被类型和土壤pH是影响MBP分布的主要因素,土壤类型、温度和凋落物的数量和质量也都与MBP的分布密切相关。

1.2.2 土壤P的生物有效性

虽然在贡嘎山土壤TP的含量较高,但是只有能被生物体获取的P(即生物有效磷)才会对生物生长和发育起到关键作用^[17]。P的生物有效性受土壤pH的限制,在酸性条件下磷酸根离子与Al和Fe形成沉淀,大部分P结合在土壤矿物质中或者以有机形式存在,难以被植物利用^[59]。随着土壤的不断发育,在较为成熟的土壤中P的流失会逐渐增加,进而造成土壤P的生物有效性降低,P会逐渐成为限制性养分元素。在冰川退缩区土壤Bio-P随着不同的演替阶段发生明显变化,土壤Bio-P随土壤发育逐渐增加。吴艳宏等^[48]的研究表明,在土壤发育

初期土壤 Bio-P 较低,难以满足植物生长需要,但是随着土壤发育和植被演替,在土壤发育 30 年后土壤 Bio-P 开始成倍增加。同样地,王吉鹏^[23]的研究也发现类似的结果,同时其研究表明,在大约 1400 年的植被带土壤 Bio-P 的含量最大,其次是 85 年的峨眉冷杉和麦吊杉为主的植被带。在海拔梯度上,土壤 Bio-P 的浓度和储量随海拔增加呈现出低-高-低的抛物线模式,最大值出现在海拔 3060 m^[24]。

微生物对 P 的吸收可以改变土壤 P 的生物有效性,MBP 在一定程度上可以指示 Bio-P 的高低^[23]。细菌和真菌等微生物种类的多样性和分布的不均匀性会影响土壤 P 的生物有效性、形态和分布^[58]。然而,在山地生态系统中,微生物过程和 P 的生物利用度之间的相互作用研究仍然较少。在温带森林系统中,土壤 N 和 P 是两种主要限制因子,在土壤发育初期由于 N 的短缺成为主要限制因子,而随着土壤发育进程 P 的流失而成为限制因子^[16]。

土壤 C、N、P 的化学计量比可以更好地探究营养元素的限制性。Bing 等^[60]对海拔 2000 ~ 4500 m 土壤 C、N、P 的计量比研究发现,在土壤剖面中随着土层深度增加,C:N:P 呈现出逐渐降低的趋势(O 层、A 层、B 层和 C 层分别是 556:22:1、343:16:1、

154:7:1、63:3:1)。土壤微生物也能够为植物生长提供所需的必要营养元素。在贡嘎山东坡土壤微生物量 C、N、P 计量比为 51:6.6:1,土壤 MBP 占到土壤 Bio-P 的 48%,说明了土壤 MBP 对土壤 Bio-P 具有重要贡献。与此同时,通过土壤 C、N、P 的化学计量学研究发现,随着海拔降低和土壤发育,在针阔混交林和针叶林带可能存在 P 的限制,而对于微生物来讲,P 的潜在限制性可能存在于针阔混交林的土壤中。Yang 等^[21]在海螺沟冰川退缩区的研究表明,地上植被中 C:N 随着土壤发育和植被群落演替并没有明显的改变,而土壤中 C:N 逐渐降低,说明随着土壤的发育土壤 N 的累积增加。Zhou 等^[24]的研究发现,虽然低海拔处的 Bio-P、MBP 和叶片中的 P 均显著低于高海拔,但是通过 C、N、P 计量比的结果并没有发现 P 的限制。

1.2.3 P 的循环

植物与微生物通过影响母岩风化、生理调节、凋落物分解、矿化和非活性磷酸盐等方式密切参与 P 的生物地球化学循环^[59]。P 与 C 和 N 的来源不同,土壤 P 主要来自岩石风化^[59]。受山地局地气候和土壤环境的影响,山地 P 的循环与低海拔地区不同,P 的生物地球化学循环具有明显的空间变异性,

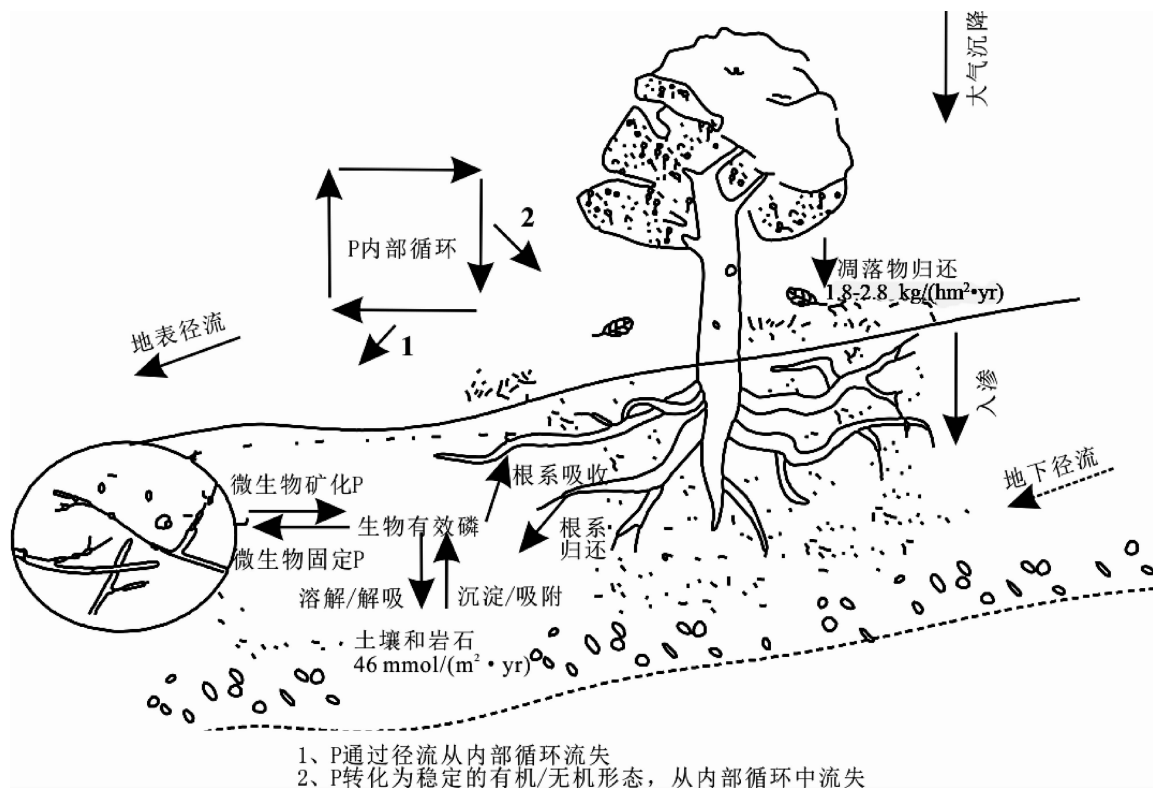


图2 贡嘎山生态系统磷的生物地球化学循环示意图

Fig. 2 Characteristics of biogeochemical cycles of P in the ecosystem of Gongga Mountain

而且在高山地区人为活动影响减少,自然生态系统的生物过程是控制P的生物地球化学循环的关键因素^[16]。贡嘎山土壤中90%的原生矿物P以磷灰石的形态存在,随着风化程度的增加,原生矿物P不断被释放^[50]。当针叶林成为优势群落后,P的释放速率显著增加,达到 $46 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{yr})$ (图2),高于热带地区P的释放速率,原因主要在于植被类型控制了土壤风化^[61-62],以及原生矿物P的风化速率^[42],其关键机制可能与影响土壤pH^[61-62]进而调控P的风化过程有关。

植物不仅影响土壤P的风化,而且通过对土壤P的摄取和凋落物的归还改变P的循环过程^[16]。不同植被类型影响了植物对土壤P的摄取能力。虽然峨眉冷杉对P的累积程度高于高山杜鹃,但是峨眉冷杉和高山杜鹃叶片和枝条的P随海拔梯度变化并没有明显的差异^[9]。一般情况下,同一生境的植物器官P的含量依次是叶>枝>根>皮>干^[31]。这些研究表明,随着海拔梯度变化植物根据生境条件调节自身对P的生理需求,从而保持P在不同器官中的稳定分布,即植物的内稳性。

当植物死亡和枝、叶凋落,被植物固定的P会通过枯落物分解作用归还到土壤中。P的归还量与不同海拔梯度的凋落物的种类和数量密切相关。贡嘎山东坡低海拔针阔混交林凋落物量显著高于高海拔峨眉冷杉凋落物量,造成低海拔地区针阔混交林P的归还量($2.8 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{yr})$)大于高海拔地区($1.8 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{yr})$)^[30-32](图2)。与此同时,温度降低明显减缓了高海拔区域凋落物的分解速率^[63]。凋落物的质量也是影响P的归还过程及归还量的重要因素。阔叶林的凋落物分解速率快,P会快速被归还到土壤中,而针叶树种的叶组织含有蜡质等难以分解的成分,进而导致其分解速率慢,所以其归还量和归还速率均小于阔叶林的凋落物^[31]。此外,森林年龄是影响凋落物P归还的另一因素^[28]。罗辑等^[28]的研究表明峨眉冷杉幼龄林和中龄林P的归还量较成熟林大。

除了上述因素外,P的流失也影响到P的循环过程,而且这个过程是不可逆的。Wu等^[64]在海螺沟冰川退缩区发现,在土壤发育52年后开始出现P的流失,发育到120年后,P的流失率达到17.6%,其中植物生物量P占流失量的36%。P的损失主要由地表径流和淋溶作用造成。

2 贡嘎山重金属的研究现状

在贡嘎山东坡研究了土壤重金属的赋存特征^[8]、来源^[11]、影响因素以及潜在的生态风险^[8]。研究的重金属元素包括Ag、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Sb和Zn等。

2.1 土壤重金属的分布特征

贡嘎山东坡重金属的分布特征随海拔变化显示出较大的差异性。Bing等^[8]和李睿等^[65]的研究表明,在土壤O层和A层中Pb随着海拔升高呈现出低-高-低的变化趋势;O层中Cd的变化趋势与Pb类似。Ag、Cd、Pb、Sb、Zn等在土壤O层和A层中随着海拔梯度均出现不同程度的富集,而在C层中各元素的浓度随着海拔无显著差异,土壤C层中元素的浓度与地球化学背景值基本一致^[63]。但是Luo等^[12]的研究结果略有不同,O层和A层中Pb随着海拔高度升高而逐渐降低,原因在其于采样的时间和采样的海拔高度不同。Fu等^[66]针对贡嘎山东坡土壤中Hg的浓度进行研究,发现在1800~2200 m的海拔范围内Hg的浓度最高。

在土壤剖面中,无论是海拔梯度上还是在海螺沟冰川退缩区,Cd、Pb和Zn的浓度随土层深度增加而减小,均表现出O层>A层>C层的趋势^[7,64,67],而Wang等^[68]在海拔梯度上并未发现明显的差异,原因在于其研究简单地将土层划分为表层土和非表层土。另外,Cu的浓度随着土壤深度增加而增加,与Cd、Pb和Zn表现出相反的趋势,这可能与它们的主要来源存在差异有关^[65]。同样地,As、Cr和Hg也在表层富集^[69]。

2.2 重金属的来源判别

由于贡嘎山远离人类活动区,大量研究发现了人类活动对重金属累积的贡献,而大气的长距离传输是重金属累积的重要途径。目前采用的来源判别介质包括土壤、植物(植物组织、苔藓)、湖泊沉积物、大气干湿沉降等。

土壤与植物和干湿沉降不同,其记录了较长时间尺度(百年至千年以上)重金属的累积特征,反映了长时间尺度下区域重金属的赋存特征。在贡嘎山东坡,Wu等^[70]调查了土壤中Cd的空间分布,认为大气沉降是Cd的主要来源。李睿等^[65,71]通过Pb同位素三元混合模型的研究,发现土壤Pb可能受到化石燃料的燃烧和矿物开采以及金属冶炼活动的

影响。Bing 等^[11]通过 Pb 同位素示踪,结合大气轨迹模型,得到贡嘎山海螺沟冰川退缩区土壤中 Pb 主要来自我国西南地区 and 南亚地区,大气的长距离传输是 Pb 进入该偏远山区的重要方式。Wang 等^[72]利用 Hg 稳定同位素示踪方法,发现当地人为 Hg 的排放是影响低海拔地区(3100 ~ 3600 m)土壤 Hg 浓度升高的主要原因,然而在较高海拔地区(3700 ~ 4300 m)大气长距离传输是影响 Hg 分布的主要原因。与此同时,他们发现贡嘎山森林系统土壤 Hg 的积累是通过植被叶片吸收大气 Hg,之后随凋落物进入到土壤中。凋落物 Hg 的沉降是山地森林土壤 Hg 的主要来源,而高海拔的气候条件影响了植物的生物量及其叶片对 Hg 的吸附,进而间接影响土壤 Hg 的分布与累积。

植物生物监测技术长期以来是监测大气重金属污染的有效手段^[73-76],而苔藓由于其自身的生理特性,目前是被用来识别重金属来源的主要载体^[77]。结合同位素示踪的方法来定量判识重金属的来源是目前常用的方法。Bing 等^[8,11]对树木组织和苔藓中 Cd、Pb 和 Zn 的研究表明,贡嘎山东坡明显受到人为排放的影响,而树木组织中 Cr、Cu 和 Ni 主要来自根的吸收。Luo 等^[12]通过 HYSPLIT 模型并充分考虑到凋落物的特征、森林生物量、大气沉降和植物器官中 Pb 的浓度特征,进一步证明 Pb 通过大气长距离传输进入到贡嘎山生态系统。

湖泊沉积物是重建不同时间尺度下区域人类活动信息的有效工具^[78-81],而高山湖泊由于其对全球变化的敏感性,能够很好地反映高山区域重金属的污染历史^[79,81]。Bing 等^[82]利用贡嘎山东坡草海子湖泊柱状沉积物,结合²¹⁰Pb 和¹³⁷Cs 定年技术,重建了过去 100 多年以来贡嘎山地区重金属的污染历史。结果发现,Pb 的污染历史要早于 Cd 和 Zn,自上世纪 50 年代以来沉积物中 Pb 的浓度明显增加,而 Cd 和 Zn 的明显累积开始于上世纪 80 年代。通过 Pb 同位素的二元混合模型,自上世纪 90 年代以来超过 80% 的 Pb 来自于人类活动的排放。通过重金属的累积历史,未来仍需加强区域重金属排放的限制,而且需要采取区域协同治理的手段来防止重金属污染。

大气干湿沉降是揭示大气重金属污染的直接手段,能够反映短时间尺度下大气重金属的污染。Fu 等^[66]通过监测大气气溶胶,发现贡嘎山东坡 Hg 主要来自大气沉降。Yang 等^[83]在贡嘎山东坡分析了

PM_{2.5} 和 PM₁₀ 中重金属的来源,结果显示 Ag、As、Cu、Ni、Pb 和 Zn 等在春季和冬季的浓度高于夏季和秋季,其来源主要是人类活动的排放,这些重金属很有可能通过南亚季风进行长距离的大气运输到达贡嘎山地区,而印度东北部正是污染的主要源区。李睿^[68]对贡嘎山东坡湿沉降的研究中,发现低海拔区域的降水中 Cd、Cu、Pb 和 Zn 主要来自当地人类活动排放。

梅露等^[84]对贡嘎山冰川水体中 Hg 的空间分布和源、汇特征进行研究,结果表明 Hg 的空间分布具有明显的海拔效应,低温高海拔区具有明显的捕捉和放大累积效应;通过主成分分析的方法定量确定了贡嘎山水体环境中大气沉降对 Hg 的贡献率较高,大气颗粒物的沉降是水体和土壤环境中 Hg 污染的重要来源。何晓丽等^[85]对贡嘎山河流水体中重金属的研究发现,目前河流水体中重金属的浓度明显低于长江中下游和全球河流的浓度;虽然大气沉降对水体中 Cd 和 Pb 的浓度产生一定的影响,但是其贡献程度较低。

2.3 重金属的污染和潜在生态风险

近 20 年来,贡嘎山东坡部分重金属的浓度明显增高^[8,57],重金属污染程度有所增加。Bing 等^[67]通过污染因子、富集因子、地累积指数和风险评价指数等多个指标,发现在表层土壤中多种重金属有不同程度的富集,例如 Cd(上述污染指数分别为:6.57、44.9、3.04、414)达到较高污染、潜在生态风险高,Pb(1.04、8.02、0.743、13.1)呈现中等污染、潜在生态风险低,Zn(0.97、4.49、-0.113、1.50)污染低,Cu(0.519、2.28、-1.05、4.04)在土壤中没有污染,李睿^[69]的研究结果与此一致。

重金属对生物的毒性效应与其形态密切相关,对重金属开展形态研究对生态保护更有针对性。在贡嘎山东坡土壤的研究中,C 层 Cd、Cu、Pb 和 Zn 均以残渣态为主,在 O 层和 A 层中 Cd 以可迁移态为主,Pb 和 Zn 以可还原态为主,Cu 以氧化态为主,说明在土壤表层 Cd 的迁移性较大,而 Pb 和 Zn 具有较高的潜在迁移性^[61]。在冰川退缩区的研究中也发现了类似的结果,O 层中金属迁移性表现为 Cd > Pb > Zn > Cu 的顺序,而 A 层中则是 Cd > Pb > Cu > Zn^[67]。土壤 pH 和有机物吸附和络合对土壤中 Cd、Pb 和 Zn 的活化和迁移具有重要影响。土壤中可氧化态 Cu 与有机物呈显著相关,反映了土壤有机质对 Cu 迁移转化和生态毒性的控制作用。

3 展望

山地生态系统对全球气候变化和人类活动更为敏感。目前针对贡嘎山地区元素生物地球化学研究包括了C、N、P和部分重金属的浓度、分布和形态特征,同时利用同位素示踪等技术手段对重金属的来源进行了识别,并且对贡嘎山地区重金属污染和潜在生态风险进行了评价,但是仍存在诸多问题需要进一步探究:

(1) 系统性研究养分元素在大气-水-土壤-植物-微生物系统中的生物地球化学循环过程及机制。目前的研究主要是针对土壤和地上元素的分布、累积和循环开展研究,而植物根系和微生物在养分元素循环的作用及机制研究还相对欠缺,尤其是植物和微生物的协同作用研究有待进一步探讨。此外,在以上过程中需要重视量化研究,获取不同系统中养分元素的分配、阈值等。

(2) 加强山地重金属迁移转化及影响机制研究。在继续监测重金属来源变化的基础上,利用同位素示踪、模型模拟等手段,重视重金属在土壤-植物-水系统中的迁移转化,获取关键控制机制,评价重金属迁移可能导致的水环境风险。

(3) 新技术、新方法的开发及应用。在P的研究中需结合新型P分析技术,例如, ^{31}P 核磁共振光谱技术、磷酸根 ^{18}O 同位素示踪技术和X射线吸收近边结构法等。利用梯度扩散薄膜技术(DGT)对P和重金属的生物有效态开展多维研究,充分认识其在土壤中的存在形式以及与生物间的联系。

(4) 模型的建立及应用。目前针对生物地球化学循环的模型较多是基于DNDC模型发展而来^[37,86]。但是由于P很少存在气体形式,针对P循环的模型较少,未来应当建立适合高山生态系统P的生物地球化学循环模型,并且从单一的C、N、P的模拟向多元素耦合循环的模型发展。

参考文献(References)

- [1] 吴艳宏,祁海健. 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 Yanhong, BING Haijian. Ecogeochemistry in mountain region—definition, progress and prospect[J]. Geological Review, 2012, **58**(1): 106–115]
- [2] 钟祥浩,张文敬. 贡嘎山地区山地生态系统与环境特征[J]. AMBIO-人类环境杂志, 1999, **28**(8): 648–654 [ZHONG Xianghao, ZHANG Wenjing. The characteristics of the mountain ecosystem and environment in the Gongga Mountain region[J]. Ambio, 1999, **28**(8): 648–654]
- [3] 余大富. 贡嘎山的土壤及其垂直地带性[J]. 土壤通报, 1984, **15**(2): 65–69 [YU Dafu. The vertical zonality of soil in Gongga mountain[J]. Chinese Journal of Soil Science, 1984, **15**(2): 65–69]
- [4] 王良健. 贡嘎山东坡森林土壤类型发生学基本特征的研究[J]. 西南师范大学学报自然科学版, 1991, **16**(1): 117–125 [WANG, Liangjian. Study on the types genesis features of the forest soils on the east slope of Gongga mountain[J]. Journal of Southwest China Normal University, 1991, **16**(1): 117–125]
- [5] 李逊,熊尚发. 贡嘎山海螺沟冰川退却迹地植被原生演替[J]. 山地学报, 1995, **13**(2): 109–115 [LI Xun, XIONG Shangfa. Vegetation primary succession on glacier foreland in Hailuoguo, Mt. Gongga[J]. Mountain Research, 1995, **13**(2): 109–115]
- [6] 赵芳,尹学明,伍杰,等. 海螺沟主要植被类型[J]. 四川林业科技, 2013, **34**(5): 61–64 [ZHAO Fang, YIN Xueming, WU Jie, et al. The main vegetation types in Hailuoguo[J]. Journal of Sichuan Forestry Science and Technology, 2013, **34**(5): 61–64]
- [7] 吴艳宏,周俊. 山地环境与全球变化研究的进展与展望[J]. 第四纪研究, 2011, **31**(5): 909–916 [WU Yanhong, ZHOU Jun. Progress and perspective of research on mountain environment and global change[J]. Quaternary Sciences, 2011, **31**(5): 909–916]
- [8] BING H J, WU Y H, ZHOU J, et al. Vegetation and cold trapping modulating elevation-dependent distribution of trace metals in soils of a high mountain in eastern Tibetan Plateau[J]. Scientific Reports, 2016, **6**: 24081.
- [9] 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 & Chemistry, 2011, **30**(11): 2608–2619.
- [10] 李芬,王训,罗辑,等. 1999年与2014年贡嘎山峨眉冷杉枝和叶中常见重金属的生物富集特征对比[J]. 环境科学, 2017, **38**(7): 3045–3053 [LI Fen, WANG Xun, LUO Ji, et al. Bioaccumulation of Heavy Metals in Twigs and Leaves of *Abies fabri* at Mount Gongga in China: A Comparison Study Between 1999 and 2014[J]. Environmental Science, 2017, **38**(7): 3043–3053]
- [11] BING H J, WU Y H, ZHOU J, et al. Biomonitoring trace metal contamination by seven sympatric alpine species in Eastern Tibetan Plateau[J]. Chemosphere, 2016, **165**: 388–398.
- [12] LUO J, TANG R G, SUN S Q, et al. Lead distribution and possible sources along vertical zone spectrum of typical ecosystems in the Gongga Mountain, eastern Tibetan Plateau[J]. Atmospheric Environment, 2015, **115**: 132–140.
- [13] 吴艳宏,祁海健,周俊. 山地表生地球化学研究现状与展望[J]. 地球科学与环境学报, 2015, **37**(2): 75–82 [WU Yanhong, BING Haijian, ZHOU Jun. Review on Mountain Supergene Geochemistry[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2015, **37**(2): 75–82]
- [14] 陆景陵. 植物营养学[M]. 北京: 中国农业大学出版社. 2016, 17–48 [LU Jingling. Plant Nutrition[M]. Beijing: China Agricultural University Press. 2016, 17–48]
- [15] 王小丹,朱万泽,程根伟. 贡嘎山高山生态系统观测试验和研

- 究进展[J]. 山地学报, 2006, **24**(5): 612 – 619 [WANG Xiaodan, ZHU Wanze, CHENG Genwei. Advances in observation and studies on Gongga station of alpine ecosystem in recent 20 years[J]. Mountain Science, 2006, **24**(5): 612 – 619]
- [16] 王吉鹏, 吴艳宏. 磷的生物有效性对山地生态系统的影响[J]. 生态学报, 2016, **36**(5): 1204 – 1214 [WANG Jipeng, WU Yanhong. Phosphorus bioavailability in mountain ecosystems: characteristics and ecological roles[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, **36**(5): 1204 – 1214]
- [17] 王琳, 欧阳华, 周才平, 等. 贡嘎山东坡土壤有机质及氮素分布特征[J]. 地理学报, 2004, **59**(6): 1012 – 1019 [WANG Lin, OUYANG Hua, Zhou Caiping, et al. Distribution characteristics of soil organic matter and nitrogen on the eastern slope of Mt. Gongga[J]. Acta Geograph. Sin., 2004, **59**(6): 1012 – 1019]
- [18] 王良健. 贡嘎山东坡森林土壤有机质的垂直分布规律研究[J]. 国土与自然资源研究, 1994, (3): 29 – 33 [WANG Liangjian. Study on vertical distribution law of soil organic matter in eastern slope of Gongga Mountain[J]. Research on Land and Natural Resources, 1994, (3): 29 – 33]
- [19] 周鹏, 朱万泽, 罗辑, 等. 贡嘎山典型植被地上生物量与碳储量研究[J]. 西北植物学报, 2013, **33**(1): 162 – 168 [ZHOU Peng, ZHU Wanze, LUO Ji, et al. Aboveground biomass and carbon storage of typical forest types in Gongga Mountain[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2013, **33**(1): 162 – 168]
- [20] TAN Q Q, WANG G A. Decoupling of nutrient element cycles in soil and plants across an altitude gradient[J]. Scientific Reports, 2016, **6**: 34875.
- [21] YANG Y, WANG G X, 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 & Management, 2014, **312**(312): 10 – 18.
- [22] HE L, TANG Y. Soil development along primary succession sequences on moraines of Hailuoguo Glacier, Gongga Mountain, Sichuan, China[J]. Catena, 2008, **72**(2): 259 – 269.
- [23] 王吉鹏. 海螺沟冰川退缩区微生物对磷的生物有效性的影响[D]. 成都: 中科院水利部成都山地灾害与环境研究所, 2016 [WANG Jipeng. Influences of soil microorganisms on phosphorus bioavailability in Hailuoguo glacier retreat area[D]. Chengdu, Institute of Mountain Hazards and Environment, Ministry of Water Resources, Chinese Academy of Sciences, 2016]
- [24] ZHOU J, WU Y H, BING H J, et al. Variations in soil phosphorus biogeochemistry across six vegetation types along an altitudinal gradient in SW China[J]. Catena, 2016, **142**: 102 – 111.
- [25] 程根伟, 罗辑. 贡嘎山亚高山林地碳的积累与耗散特征[J]. 地理学报, 2003, **58**(2): 179 – 185 [CHENG Genwei, LUO Ji. The carbon accumulation and dissipation features of sub-alpine woodland in Mt. Gongga[J]. Journal of Geographical Sciences, 2003, **58**(2): 179 – 185]
- [26] 钟祥浩, 罗辑. 贡嘎山山地暗针叶林带自然与退化生态系统生态功能特征[J]. 山地学报, 2001, **19**(3): 201 – 206 [ZHONG Xianghao, LUO Ji. Study of characteristics of ecological function of the natural and degraded ecosystems in the mountain dark coniferous forest zone in Mt. Gongga[J]. Mountain Research, 2001, **19**(3): 201 – 206]
- [27] 罗辑, 赵义海, 李林峰. 贡嘎山东坡峨眉冷杉林 C 循环的初步研究[J]. 山地学报, 1999, **17**(3): 251 – 254 [LUO Ji, ZHAO Yihai, Li Linfeng. A preliminary research on the carbon cycle of *Abies fabri* forests on the east slope of the Gongga Mountain[J]. Mountain Research, 1999, **17**(3): 251 – 254]
- [28] 罗辑, 杨忠, 杨清伟. 贡嘎山森林生物量和生产力的研究[J]. 植物生态学报, 2000, **24**(2): 191 – 196 [LUO Ji, YANG Zhong, YANG Qingwei. A study on the biomass and production of forest on the Gongga Mountain[J]. Acta Phytocologica Sinica, 2000, **24**(2): 191 – 196]
- [29] 罗辑, 程根伟, 李伟, 等. 贡嘎山天然林营养元素生物循环特征[J]. 北京林业大学学报, 2005, **27**(2): 13 – 17 [LUO Ji, CHENG Genwei, LI Wei. Characteristics of nutrient biocycling of natural forests on the Gongga Mountain[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2005, **27**(2): 13 – 17]
- [30] 罗辑, 程根伟, 陈斌如, 等. 贡嘎山垂直带林分凋落物及其理化特征[J]. 山地学报, 2003, **21**(3): 287 – 292 [LUO Ji, CHENG Genwei, CHEN Bingru, et al. Characteristic of forests litterfall along vertical spectrum on the Gongga Mountain[J]. Mountain Research, 2003, **21**(3): 287 – 292]
- [31] 罗辑, 程根伟, 宋孟强, 等. 贡嘎山峨眉冷杉林凋落物的特征[J]. 植物生态学报, 2003, **27**(1): 59 – 65 [LUO Ji, CHENG Genwei, SONG Mengqiang, et al. The characteristic of litterfall of *Abies fabri* forests on the Gongga Mountain[J]. Acta Phytocologica Sinica, 2003, **27**(1): 59 – 65]
- [32] 李嘉竹, 王国安, 刘贤超, 等. 贡嘎山东坡 C3 植物碳同位素组成及 C4 植物分布沿海拔高度的变化[J]. 中国科学, 2009, **39**(10): 1387 – 1396 [LI Jiazhu, WANG Guoan, LIU Xianzhao, et al. Variations in carbon isotope ratios of C3 plants and distribution of C4 plants along an altitudinal transect on the eastern slope of Mountain Gongga[J]. Science in China: Earth Science, 2009, **39**(10): 1387 – 1396]
- [33] 谢静, 朱万泽, 周鹏, 等. 贡嘎山木本植物碳同位素沿海拔梯度的变化[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2014, **38**(6): 33 – 37 [XIE Jing, ZHU Wangze, ZHOU Peng, et al. Variations in carbon isotope of the main woody plants along the elevational gradient on the Gongga Mountain[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2014, **38**(6): 33 – 37]
- [34] 罗辑, 杨忠, 杨清伟. 贡嘎山东坡峨眉冷杉林区土壤 CO₂ 排放[J]. 土壤学报, 2000, **37**(3): 402 – 409 [LUO Ji, YANG Zhong, YANG Qingwei. CO₂ emissions from soils in *Abies Fabri* forests region on the east slope of Gongga Mountain[J]. Acta Pedologica Sinica, 2000, **37**(3): 402 – 409]
- [35] 罗辑, 李伟, 廖晓勇, 等. 近百年海螺沟冰川退缩区域土壤 CO₂ 排放规律[J]. 山地学报, 2004, **22**(4): 421 – 427 [LUO Ji, LI Wei, LIAO Xiaoyong, et al. CO₂ emissions from soils of the deglaciated region on Hailuoguo glacier in the past 100 years[J]. Mountain Research, 2004, **22**(4): 421 – 427]
- [36] 刘允芬, 欧阳华, 曹广民, 等. 青藏高原东部生态系统土壤碳排

- 放[J]. 自然资源学报, 2001, **16**(2): 152–160 [LIU Yunfen, OUYANG Hua, CAO Guangmin, et al. Soil carbon emission from ecosystems of eastern Qinghai-Tibet Plateau[J]. Journal of Natural Resources, 2001, **16**(2): 152–160]
- [37] LUCIANAF A, SIMONEA V, MARCOSA S, et al. Forest structure and live aboveground biomass variation along an elevational gradient of tropical Atlantic moist forest (Brazil) [J]. Forest Ecology & Management, 2010, **260**(5): 679–691.
- [38] VITOUSEK P, ASNER G P, CHADWICK O A, et al. Landscape-level variation in forest structure and biogeochemistry across a substrate age gradient in Hawaii [J]. Ecology, 2009, **90**(11): 3074.
- [39] 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 & Management, 2014, **329**: 255–263.
- [40] JUNG M, VETTER M, HEROLD M, et al. Uncertainties of modeling gross primary productivity over Europe: A systematic study on the effects of using different drivers and terrestrial biosphere models [J]. Global Biogeochemical Cycles, 2007, **21**(4): 553–566.
- [41] VOGEL J G, BOND-LAMBERTY B P, SCHUUR E A G, et al. Carbon allocation in boreal black spruce forests across regions varying in soil temperature and precipitation [J]. Global Change Biology, 2008, **14**(7): 1503–1516.
- [42] LU X Y, CHENG G W, XIAO F P, et al. Modeling effects of temperature and precipitation on carbon characteristics and GHGs emissions in *Abies fabric* forest of subalpine [J]. Journal of Environmental Sciences, 2008, **20**(3): 339.
- [43] 齐玉春, 罗辑, 董云社, 等. 贡嘎山山地暗针叶林带森林土壤温室气体 N_2O 和 CH_4 排放研究 [J]. 中国科学: 地球科学, 2002, **32**(11): 934–941 [QI Yuchun, LUO Ji, DONG Yunshe, et al. Study on greenhouse gas N_2O and CH_4 emissions from forest soil in dark coniferous forest in Gongga Mountain [J]. Science in China: Earth Science, 2002, **32**(11): 934–941]
- [44] 彭亮, 彭尽晖, 孙守琴, 等. 贡嘎山生态系统土壤呼吸带谱特征 [J]. 山地学报, 2015, **33**(6): 696–702 [PENG Liang, PENG Jinhui, SUN Shouqin, et al. Characteristics of mountain ecosystem soil respiration along an elevation gradient on Gongga Mountain [J]. Mountain Research, 2015, **33**(6): 696–702]
- [45] LITOR M I, SEASTEDT T R, WALKER M D, et al. The biogeochemistry of phosphorus across an alpine topographic/snow gradient [J]. Geoderma, 2005, **124**(1): 49–61.
- [46] CASSAGNE N, REMAURY M, GAUQUELIN T, et al. Forms and profile distribution of soil phosphorus in alpine Inceptisols and Spodosols (Pyrenees, France) [J]. Geoderma, 2000, **95**(1): 161–172.
- [47] LIPTZIN D, SANFORD R L, SEASTEDT T R. Spatial patterns of total and available N and P at alpine treeline [J]. Plant & Soil, 2013, **365**(1–2): 127–140.
- [48] 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 Yanhong, 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, Southwestern China [J]. Science in China: Earth Science, 2014, **49**(9): 2006–2015]
- [49] WU Y H, LI W, ZHOU J, et al. Temperature and precipitation variations at two meteorological stations on eastern slope of Gongga Mountain, SW China in the past two decades [J]. Journal of Mountain Science, 2013, **10**(3): 370–377.
- [50] ZHOU J, WU Y H, Prietzel 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**(1): 251–259.
- [51] WU Y H, Prietzel J, ZHOU J, et al. Soil phosphorus bioavailability assessed by XANES and Hedley sequential fractionation technique in a glacier foreland chronosequence in Gongga Mountain, Southwestern China [J]. Science China: Earth Sciences, 2014, **57**(8): 1860–1868.
- [52] PRIETZEL J, DUMIG A, WU Y H, et al. Synchrotron-based P K-edge XANES spectroscopy reveals rapid changes of phosphorus speciation in the topsoil of two glacier foreland chronosequences [J]. Geochimica Et Cosmochimica Acta, 2013, **108**(3): 154–171.
- [53] PRIETZEL J, WU Y H, DUMIG A, et al. Soil sulphur speciation in two glacier forefield soil chronosequences assessed by S K-edge XANES spectroscopy [J]. European Journal of Soil Science, 2013, **64**(2): 260–272.
- [54] 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**(6): 825–839.
- [55] 吴艳宏, 周俊, 邴海健. 贡嘎山冷杉林带草海子小流域土壤及湖泊沉积物中磷的形态及迁移特征 [J]. 地球环境学报, 2013, **4**(1): 1208–1214 [WU Yanhong, ZHOU Jun, BING Haijian. Soil and lake sediment phosphorus fractions and migrating in a small *Abies* forested watershed, Gongga Mountain, Southwest China [J]. Journal of Earth Environment, 2013, **4**(1): 1208–1214]
- [56] Sparling G P, Whale K N, Ramsay A J. Quantifying the contribution from the soil microbial biomass to the extractable P levels of fresh and air-dried soils. [J]. Soil Research, 1985, **23**(4): 613–621.
- [57] GEORGE T S, TURNER B L, GREGORY P J, et al. Depletion of organic phosphorus from Oxisols in relation to phosphatase activities in the rhizosphere. [J]. European Journal of Soil Science, 2006, **57**(1): 47–57.
- [58] SUN H Y, WU Y H, ZHOU J, et al. Variations of bacterial and fungal communities along a primary successional chronosequence in the Hailuoguo glacier retreat area (Gongga Mountain, SW China) [J]. Journal of Mountain Science, 2016, **13**(9): 1621–1631.
- [59] WU Y H, ZHOU J, YU D, et al. Phosphorus biogeochemical cycle research in mountainous ecosystems [J]. Journal of Mountain

- Science, 2013, **10**(1): 43–53.
- [60] 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**(2): 405–416.
- [61] 扬子江, 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[J]. 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 [J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, **52**(3): 507–516]
- [62] 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.
- [63] 陈晓丽, 王根绪, 杨燕, 等. 山地森林表层土壤酶活性对短期增温及凋落物分解的响应[J]. 生态学报, 2015, **35**(21): 7071–7079 [CHEN Xiaoli, WANG Genxu, YANG Yan, et al. Response of soil surface enzyme activities to short-term warming and litter decomposition in a mountain forest [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, **35**(21): 7071–7079]
- [64] WU Y H, ZHOU J, BING H J, et al. Rapid loss of phosphorus during early pedogenesis along a glacier retreat chronosequence, Gongga Mountain (SW China) [J]. PeerJ, 2015, **3**(6): 593–596.
- [65] 李睿, 吴艳宏, 邴海健, 等. 青藏高原东麓贡嘎山东坡土壤中Pb的来源解析[J]. 环境科学研究, 2015, **28**(9): 1439–1448 [LI Rui, WU Yanhong, BING Haijian, et al. Source identification of lead in soils on the eastern slope of Gongga Mountain, eastern Tibetan Plateau [J]. Research of Environmental Sciences, 2015, **28**(9): 1439–1448]
- [66] FU X W, FENG X B, ZHU W Z, et al. Total particulate and reactive gaseous mercury in ambient air on the eastern slope of the Mt. Gongga area, China [J]. Applied Geochemistry, 2008, **23**(3): 408–418.
- [67] BING H J, WU Y H, ZHOU J, et al. Mobility and eco-risk of trace metals in soils at the Hailuoguo Glacier foreland in eastern Tibetan Plateau [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, **23**(6): 5721–5732.
- [68] WANG X D, CHENG G W, ZHONG X H, et al. Trace elements in sub-alpine forest soils on the eastern edge of the Tibetan Plateau, China [J]. Environmental Geology, 2009, **58**(3): 635–643.
- [69] 曹洋, 张丹, 李伟, 等. 贡嘎山东坡土壤重金属质量比的初步分析及风险评价[J]. 安全与环境学报, 2012, **12**(1): 156–162 [CAO Yang, ZHANG Dan, LI Wei, et al. Preliminary analysis and risk evaluation of heavy metals in soil from eastern slope of Gongga Mountain [J]. Journal of Safety & Environment, 2012, **12**(1): 154–160]
- [70] WU Y H, BING H J, ZHOU J, et al. Atmospheric deposition of Cd accumulated in the montane soil, Gongga Mt. China [J]. Journal of Soils and Sediments, 2011, **11**(6): 940–946.
- [71] 李睿. 贡嘎山生态系统微量金属的海拔分布特征及潜在生态风险评价[D]. 成都: 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 2016 [LI Rui. Altitude distribution characteristics and potential ecological risk assessment of trace metals in Gongga Mountain ecosystem [D] Chengdu: Institute of Mountain Hazards and Environment, Ministry of Water Resources, Chinese Academy of Sciences, 2016]
- [72] WANG X, LUO J, YIN R S, et al. Using mercury isotopes to understand mercury accumulation in the montane forest floor of the eastern Tibetan Plateau [J]. Environmental Science & Technology, 2016, **51**(2): 801–809.
- [73] Tomašević M, Aničić M, Jovanović L J, et al. Deciduous tree leaves in trace elements biomonitoring: a contribution to methodology [J]. Ecological Indicators, 2011, **11**(6): 1689–1695.
- [74] HARMENS H, NORRIS DA, STEINNES E, et al. Mosses as biomonitors of atmospheric heavy metal deposition: spatial patterns and temporal trends in Europe [J]. Environmental Pollution, 2010, **158**(10): 3144–3156.
- [75] MEYER C, DIAZ-De-QUIJANO M, Monna F, et al. Characterisation and distribution of deposited trace elements transported over long and intermediate distances in north-eastern France using *Sphagnum*, peatlands as a sentinel ecosystem [J]. Atmospheric Environment, 2015, **101**: 286–293.
- [76] SAWIDIS T, BREUSTE J, MITROVIC M, et al. Trees as bioindicator of heavy metal pollution in three European cities [J]. Environmental Pollution, 2011, **159**(12): 3560–3570.
- [77] 梁鹏, 杨永奎, 何磊, 等. 贡嘎山原始森林区苔藓植物重金属含量及其对汞的吸附特征[J]. 应用生态学报, 2008, **19**(6): 1191–1196 [LIANG Peng, YANG Yonghui, HE Lei, et al. Heavy metals contents and Hg adsorption characteristics of mosses in virgin forest of Gongga Mountain [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, **19**(6): 1191–1196]
- [78] BACARDIT M, KRACHLER M, CAMARERO L. Whole-catchment inventories of trace metals in soils and sediments in mountain lake catchments in the Central Pyrenees: Apportioning the anthropogenic and natural contributions [J]. Geochimica Et Cosmochimica Acta, 2012, **82**(4): 52–67.
- [79] BINDLER R, RENBERG I, KLAMINDER J. Bridging the gap between ancient metal pollution and contemporary biogeochemistry [J]. Journal of Paleolimnology, 2008, **40**(3): 755–770.
- [80] REIMANN C, CARITAT P D. 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**(1–3): 91–107.
- [81] SHOTYK W, KRACHLER M. The isotopic evolution of atmospheric Pb in central Ontario since AD 1800, and its impacts on the soils, waters, and sediments of a forested watershed, Kawagama Lake [J]. Geochimica Et Cosmochimica Acta, 2010, **74**(7): 1963–1981.
- [82] BING H J, WU Y H, ZHOU J, et al. Historical trends of anthropogenic metals in Eastern Tibetan Plateau as reconstructed

- from alpine lake sediments over the last century [J]. *Chemosphere*, 2016, **148**: 211–219.
- [83] YANG Y J, WANG Y S, WEN T X, et al. Elemental composition of PM_{2.5} and PM₁₀ at Mount Gongga in China during 2006 [J]. *Atmospheric Research*, 2009, **93**(4): 801–810.
- [84] 梅露, 王训, 冯新斌, 等. 青藏高原贡嘎山冰川区水体中 Hg 的空间分布及其源汇特征 [J]. *环境化学*, 2016, **35**(8): 1549–1556 [MEI Lu, WANG Xun, FENG Xinbin, et al. Spatial distribution and source/sink characteristic of mercury in the water samples from the Mt. Gongga area in the Tibetan Plateau [J]. *Environmental Chemistry*, 2016, **35**(8): 1549–1556]
- [85] 何晓丽, 吴艳宏, 周俊, 等. 贡嘎山地区地表水化学特征及水环境质量评价 [J]. *环境科学*, 2016, **37**(10): 3798–3805 [HE Xiaoli, WU Yanhong, ZHOU Jun, et al. Hydro-chemical characteristics and quality assessment of surface water in Gongga Mountain Region [J]. *Environmental science*, 2016 **37**(10): 3798–3805]
- [86] LU X Y, CHENG G W. Climate change effects on soil carbon dynamics and greenhouse gas emissions in *Abies fabri* forest of subalpine, southwest China [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2009, **41**(5): 1015–1021.

Progress and Perspective of Research on Biogeochemistry of Nutrient Elements and Heavy Metals in Mt. Gongga

ZHU He^{1,2}, WU Yanhong^{1*}, BING Haijian¹, ZHOU Jun¹, SUN Hongyang¹, HE Qingqing^{1,2}

(1. Key Laboratory of Mountain Surface Processes and Ecological Regulation, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The research on the biogeochemical cycles of nutrient elements and heavy metals on the Mt. Gongga was systemically reviewed, and the focuses and perspectives of future research were also prospected. The research of the biogeochemistry of carbon (C) and nitrogen (N) in the ecosystem of Mt. Gongga was involved in their distribution characteristics, pools, and returning/release from litterfall through decomposition. The biogeochemical cycles of phosphorus (P) have mainly explored the variations of its fractions and bioavailability along the altitudinal gradient and with soil development, and the migration and transformations of soil P as well as its controlling factors were comprehensively deciphered. Moreover, the effects of microbial activity and pedogenesis on the P bioavailability have been preliminarily explored. The distribution characteristics, sources and influencing factors of heavy metals on the eastern slope of Mt. Gongga have been systematically investigated in last few years according to multiple methods, and their contamination and potential ecological risks have also been assessed. In future, the systematic research on the biogeochemical processes and mechanisms of nutrient cycling need be delineated in the air-water-soil-plant-microbial systems. Meanwhile, the processes of migration and transformation of heavy metals should be highlighted, and the key mechanisms controlling these processes need be further explored. A quantity of conceptual and numerical coupling models for the element cycles will be established to provide a theoretical basis for mountain ecological safety and ecological restoration.

Key Words: Nutrient elements; heavy metals; plants; microorganisms; migration and transformation; Mt. Gongga