

生物多样性的海拔分布格局研究及进展

刘秉儒

北方民族大学生物科学与工程学院, 宁夏 银川 750021

摘要: 生物多样性的海拔分布格局受制于气候、空间、环境等多种因子的影响, 综合大量研究发现, 无论是动植物还是微生物, 环境因子对其影响与驱动的作用最明显。海拔梯度是决定分布格局的重要因素之一, 因此探讨生物多样性在环境因子驱动下的海拔分布格局具有重要意义。文章分别探讨了植物、土壤动物和土壤微生物多样性沿海拔梯度的变化规律, 揭示了温度、湿度及人为干扰等因素下植物多样性沿海拔梯度的 5 种分布格局及可能机制, 土壤动物多样性沿海拔梯度的 3 种分布格局及可能机制, 同时揭示土壤微生物在海拔分布格局虽然有物种模式, 但是机制不是很明确; 最后对植物、土壤动物、土壤微生物生物多样性耦合关系的认识作了阐述。并在此基础上, 认为生物多样性的分布格局与尺度密切相关, 因此开展不同尺度的生物多样性的研究以及它们对全球气候变化的响应是未来研究的重要方向; 土壤动物群落的多样性的变化规律研究, 应致力于其生理型、营养型、生态型的多样性的研究; 在不同的研究尺度上, 驱动微生物群落构建机制的差异导致了群落演变规律的变化, 仍需要以地理学和生物学等相关学科理论为支撑, 并与微生物群落构建理论相结合, 对海拔分布格局下生物多样性的保护和生态系统稳定性研究提供科学依据。

关键词: 生物多样性; 植物多样性; 动物多样性; 土壤微生物多样性; 海拔梯度; 分布格局; 研究进展

DOI: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2021.02.0025

中图分类号: Q16; 14; X176

文献标志码: A

文章编号: 1674-5906 (2021) 02-0438-07

引用格式: 刘秉儒, 2021. 生物多样性的海拔分布格局研究及进展[J]. 生态环境学报, 30(2): 438-444.

LIU Bingru, 2021. Recent advances in altitudinal distribution patterns of biodiversity [J]. Ecology and Environmental Sciences, 30(2): 438-444.

生物多样性是指一个区域内所有的植物、动物、微生物及各个物种所拥有的基因和由各种生物与环境相互作用形成的生态系统, 包括遗传多样性、物种多样性和生态系统多样性 (马克平, 1993; Begon et al., 2006)。生物多样性在环境因子驱动下的变化规律已成为生物多样性研究的一个重要议题 (Kratowil, 1999; Theurillat et al., 2003; Rahbek, 2005; 刘秉儒等, 2013), 其中海拔梯度变化包含了各种环境因子的综合影响, 在一定程度上可以显著影响空间分布格局 (Gaston, 2000; Oommen et al., 2005; Rahbe, 2006), 这对于探讨生物多样性沿环境梯度的分布格局具有重要意义。

海拔梯度影响了温度、湿度和光照等各种环境因子, 并且海拔梯度上环境因子的变化要比纬度梯度上快 1 000 倍, 这种快速的变化决定了海拔梯度对生物多样性保护及研究生物多样性分布格局及其驱动因素具有重要意义 (厉桂香等, 2018)。本文通过揭示温度、湿度及人为干扰等因素下植物、

土壤动物和土壤微生物在海拔分布格局中的耦合机制, 在此基础上比较分析, 以期对海拔分布格局下生物多样性的保护和生态系统稳定性研究提供科学依据。

1 植物多样性沿海拔梯度的分布格局

山地植被植物群落物种多样性随海拔高度变化, 根据当前研究进展, 有 5 种模式 (贺金生等, 1997; 朱珣之等, 2005)。分别如下: (1) 二者呈负相关关系, 即物种多样性随着海拔高度的增加而降低 (郝占庆等, 2002; 唐志尧等, 2004a); (2) 大量文献支持“中间高度膨胀”模式, 即物种多样性随着海拔高度的增加呈先增加、后减少的趋势 (Wang et al., 2002; 王国宏, 2002); (3) 近来研究发现大多数地点的生物多样性沿海拔变化曲线的峰值位于梯度的中间偏下方 (即山中腰稍低的部位生物多样性最高), 即植物多样性在中等海拔达到最大 (Guo et al., 2013); (4) 植物群落物种多样性在中等海拔高度较低, 即物种多样性随海

基金项目: 国家自然科学基金项目 (32060280; 41061003); 中央高校基本科研业务费北方民族大学高层次人才引进启动项目 (GC18-03)

作者简介: 刘秉儒 (1971 年生), 男, 教授/研究员, 博士, 硕士研究生导师, 从事旱区生物多样性形成与维持机制、生态恢复过程与机理研究。

E-mail: bingru.liu@163.com

收稿日期: 2020-05-06

拔的升高有先降低后升高的趋势(唐志尧, 2004b); (5) 基于以上自我矛盾的研究, 岳明等(2002)提出植物群落物种多样性与海拔高度无关。

1.1 植物群落物种多样性与海拔高度呈负相关

在植物群落物种多样性的海拔分布格局中, 最常见的一种形式就是植物群落物种多样性随海拔的升高而降低, 这种格局既可以发生在热带湿润山区以及温带湿润山区, 同时也见于干旱地区, 如美国 Santa Catalina 山脉和 Great Smoky 山脉(唐志尧等, 2004b)。Unger et al. (2010) 认为, 亚热带森林存在生物量、生产力和生物多样性随着海拔上升而逐渐下降的现象, 岳明等(2002)指出秦岭佛坪段植物群落的物种多样性沿海拔梯度单调下降, 主要受群落内部因子的影响。

1.2 植物群落物种多样性与海拔高度呈正相关

植物群落物种多样性随海拔高度的升高而增加的分布格局存在一些极端情况, 在新西兰的 Red Mountain 片麻岩基质上, 由于海拔增高引起的风、积雪及土壤的不同, 引起空间异质性增加, 从而导致物种多样性增加(Baruch, 1984)。通过对 Dolezal et al. (2002) 数据的重新整理发现随着海拔的升高, 草本植物群落盖度急剧减少引起光照增加, 从而导致草本物种多样性与海拔呈正相关关系(Hooper et al., 1997)。布买丽娅木·吐如汗(2017)对中国塔里木盆地北缘库车山区垂直海拔梯度上的植物群落进行了数量分类及结构及物种组成的分析, 结果表明随着海拔梯度的升高, 植物科、属、种总数呈现出先增加后降低的单峰分布结构, 水热因素是导致物种分布格局的主要环境因素, 在低海拔地区, 植物生长所需热量充足而水分不足; 在高海拔地区, 水分充足而热量不足; 而中海拔地区可能热量和水分都很充足, 是植物生长最好的区域。

1.3 植物群落物种多样性在中等海拔高度最大

在陆地植物群落物种多样性随海拔变化的形式中, 有一种形式被学者称之为“中间高度膨胀”, 即植物物种多样性在中等海拔高度最大(Dolezal et al., 2002; 刘兴良等, 2005; 刘秉儒等, 2013), 如 Whittaker et al. (1965) 研究了美国亚利桑那山植被种数与海拔的关系, 发现植物种数随海拔高度的变化曲线为一开口向下的抛物线。Jiang et al. (2000)、张东杰等(2016)对贺兰山植物物种多样性随海拔变化的研究, 以及朱彪等(2004)的研究均表明, 总体物种多样性随海拔变化呈现“单峰”分布格局, 这主要是因为中间海拔高度具有植物所需要的适宜的水热配置。高远等(2009)研究表明, 山东蒙山的物种多样性随海拔梯度近似呈现出单峰格局, 这除受温度、湿度、人为干扰及面积外,

还受该地区的植被亚顶极群落演替现状与所调查区域仅有 800 m 的海拔梯度的重要影响。吴裕鹏等(2013)对海南尖峰岭热带林乔灌木层物种多样性研究则表明, 原始林的物种丰富度呈现双峰型分布格局, 这主要受当地水热、光照、群落特性等因素的控制。

1.4 植物群落物种多样性在中等海拔高度较低

与上述相对的一种分布格局是植物群落物种多样性在中等海拔高度较低。在落基山脉国家公园 Front Range 山脉的东坡, 该区域森林郁闭度较低, 多样性在中等海拔及山坡中部的森林中较低, 在沟谷中的森林, 向高山草甸过渡地带, 地形干旱较开阔的地方, 多样性较高(Peet, 1978)。又如在佛坪自然保护区, 草本层植物的多样性呈现先降低而后升高的趋势, 在中等海拔处较低(岳明等, 2002)。

1.5 植物群落物种多样性与海拔高度无关

岳明等(2002)、方精云(2004)指出在温带半湿润山脉的植物群落, 草本植物物种多样性主要受制于群落结构, 由于群落盖度沿海拔没有固定的变化规律, 因而草本物种多样性与海拔的关系并不明确(刘兴良等, 2005)。在新西兰 Dunedin 地区, 研究的山体由于其特殊的海洋性气候而得不出植物群落物种多样性与海拔变化的相关关系(Wilson et al., 1988), 而东灵山地区和秦岭地区群落物种多样性随海拔的变化特征, 由于其他环境因子的干扰, 没有发现明显的变化规律(黄建辉等, 1997; 万明利, 2006)。

2 土壤动物多样性沿海拔梯度的分布格局

土壤动物不仅可以分解生物残体、改变土壤理化性质, 而且在土壤形成与发育、促进土壤物质循环和能量转化方面起着重要作用(林英华等, 2004; 王振海等, 2014)。土壤动物是一个非常大的分类单元, 而动物生态学研究往往仅关注部分类群, 如土壤节肢动物、土壤线虫等, 由于人们常致力于植物群落多样性的研究, 因此土壤动物群落多样性的研究报道很少(路有成等, 1994)。随着海拔梯度的变化土壤动物对应的变化规律分为以下三类, 一种是土壤动物类群数与个体数都和海拔高度呈负相关; 另一种是在中等海拔高度达到最大; 第三种是土壤动物多样性指数与海拔高度同样呈负相关(朱永恒等, 2005; 陈小鸟等, 2009; 殷秀琴等, 2010)。

2.1 随海拔高度的增加呈递减趋势

通常土壤动物的类群数及个体数量随海拔高度的增加呈递减趋势(孙云云等, 2010)。王邵军等(2010)对武夷山研究表明, 土壤动物类群总数、

总密度和多样性随海拔升高逐渐减少,其中,样地温度、土壤温度和凋落物数量是决定土壤动物多样性分布格局的关键因素。

2.2 土壤动物多样性在中等海拔高度最大

Samson et al. (1997) 指出土壤动物多样性在中等海拔高度最大。Sanders (2002)、Sanders et al. (2003) 对于干旱生态系统中蚂蚁丰富度沿海拔梯度的格局研究表明一些土壤动物多样性可能在中等海拔高度最大,其原因是较低温度和较高降雨量可以维持较高的生产力,这与其对美国3个州蚂蚁丰富度沿海拔梯度的分布格局的研究结果一致。肖能文等(2009)通过对高黎贡山的研究发现,土壤动物多样性随海拔高度的增加呈现出单峰格局,其原因是高黎贡山顶部海拔高气温低,不利于土壤动物的生长,土壤动物种类和数量都较少。陈小鸟等(2009)指出天童太白山土壤动物的 Shannon-Wiener 指数、Pielou 均匀度指数及 Margalef 丰富度指数仅在海拔 370 m 以下随海拔升高而增加,而在海拔 370 m 以上,Shannon-Wiener 指数与 Pielou 均匀度指数下降,丰富度指数在略有下降后再次上升,关于太白山为何在 370 m 海拔处形成临界点的原因有待于进一步分析。

2.3 多样性指数都随海拔高度的升高而降低

土壤动物垂直分布随时间和生境的不同而异,王振海等(2014)研究表明长白山苔原带土壤动物多样性指数、丰富度指数和均匀性指数都随海拔高度的升高而降低,下部苔原亚带高于上部苔原亚带,原因是下部苔原亚带具有更高的植被覆盖和更多的植物种类多样性,故能为土壤动物提供更多的栖息地和食物,时间上的差异主要凋落物的原因,同时取样层与时间、取样层与生境的交互作用都对调查结果有影响。路有成等(1994)对九华山的土壤动物物种多样性分布研究也支持了土壤动物物种丰富度指数都随海拔高度的升高而降低的结论。

3 土壤微生物多样性沿海拔梯度的分布格局

土壤微生物多样性在海拔梯度的分布格局研究近年来受到和动植物一样的重视程度(Johnson et al., 2003; Zak et al., 2003; 贺纪正等, 2008; 刘秉儒等, 2013)。土壤微生物作为主要的分解者(李延茂等, 2004),是陆地生态系统的重要组成部分,在地球化学物质循环和维持生态系统功能等方面发挥着极大的作用。微生物能够快速响应土壤、植被以及气候等引起的环境变化,较早地指示生态系统功能的变化(贺金生等, 2004; Bryant et al., 2008)。随着分子生物学技术在生态学研究中的应用,土壤微生物多样性在不同尺度、不同生境的地理分布格

局方面研究取得了重要进展(刘秉儒等, 2013)。

对土壤微生物多样性海拔分布格局的最新研究综述发现,土壤微生物海拔分布模式并不明确,表现为无趋势、下降、单峰或者下凹型等多种海拔分布模式(厉桂香等, 2018)。土壤微生物个体丰富度及多样性随某种环境变量在空间上呈某种规律性分布,在空间分布上是非随机的,微生物空间分布规律及维持机制研究还处于初步阶段(Noah et al., 2011; 贺纪正等, 2015a; 贺纪正等, 2015b)。

Singh et al. (2002a, 2002b) 指出在日本富士山,土壤微生物多样性在中等海拔高度最大。吴则焰等(2013)对中亚热带森林土壤微生物群落多样性进行了研究,结果表明随着海拔上升,土壤微生物群落多样性逐渐下降,其根本原因可能是海拔梯度上升引起土壤养分含量下降,从而间接影响土壤微生物群落多样性。刘秉儒等(2013)对于干旱区绿岛贺兰山的研究却发现,随海拔的升高土壤微生物群落物种丰富度指数(H)和均匀度指数(E)总体上均表现出增大的趋势。

4 植物、土壤动物、土壤微生物生物多样性耦合关系的认识

植物多样性和土壤生物多样性之间具有一定的关系,但是对这种关系还没有一致的认识。目前对植物多样性和土壤微生物多样性关系知之甚少,众多生物多样性海拔梯度耦合关系研究表明,土壤微生物多样性与植物群落多样性呈正相关(Johnson et al., 2003),历史进化(以地理上分隔的不同取样点或土壤类型、土壤剖面层次来表征)和现代环境扰动(以不同的取样时间和施肥处理来表征),对土壤细菌多样性变化的作用模式与大型动植物有相似之处,可能有一些对所有类型生物都适用的生物地理分布规律存在(贺纪正等, 2008; 贺纪正等, 2015a)。

但也有学者认为细菌多样性和植物多样性不相关,植物的功能性型对细菌种群具有很强的影响(Van der Heijden et al., 1998), Bryant et al. (2008)、Fierer et al. (2006)、Noah et al. (2011) 均发现微生物多样性的海拔梯度分布格局与植物多样性的分布格局不同。Wang et al. (2002) 通过比较土壤微生物与土壤动物多样性沿海拔梯度分布格局表明土壤微生物多样性与海拔高度呈负相关,而大型土壤动物多样性在中等海拔高度最大。Fierer et al. (2011) 利用 454 高通量测序技术研究发现秘鲁安第斯山脉随海拔升高植物、鸟类及蝙蝠的多样性显著降低,但土壤细菌多样性及群落组成与海拔没有显著相关性,据此得出“微生物模式不跟随动植物

海拔分布而分布”的结论。Shen et al. (2014) 利用 454 高通量测序技术研究长白山土壤真核微生物群落的垂直分布, 同时与相同海拔梯度下的土壤细菌及植物群落分布特征进行比较, 结果表明, 土壤真核微生物群落组成随海拔梯度呈现出显著的分异; 真核微生物群落组成、多样性水平及原生生物不同门类的相对丰度与土壤 pH 最显著相关; 植物多样性随海拔升高而降低, 但真核微生物的多样性与海拔没有显著相关性。这些结果表明, 土壤真核微生物的海拔分布模式与植物可能有本质的不同, 相对于细胞结构的差异, 生物尺寸大小对海拔分布的影响可能更大。这项研究率先探究了土壤真核微生物群落的海拔分布模式, 并将微生物与宏观生物(植物)的海拔分布有机偶联。

目前, 在海拔梯度或大尺度地理分布角度综合研究植物与土壤动物、微生物生物多样性海拔梯度耦合关系的研究尚未见报道, 仅有植物与土壤动物以及植物与土壤微生物关系的研究(郑智, 2015)。由于技术手段的限制, 传统上人们往往认为微生物的地理分布与大型动植物的分布有着根本区别, 即微生物是全球性随机分布的。随着分子生物学技术在微生物生态学研究中的应用, 近年来发现土壤微生物群落结构和多样性同样具有一定的地理分布格局, 已经颠覆了人们传统上对于微生物全球性随机分布的认识, 而且发现历史进化是驱动大尺度下土壤细菌多样性变化的主控因子(Ge et al., 2008)。

然而, 当代环境条件与历史进化因素对于微生物群落空间变异的相对贡献仍存在很大的争议, 主要与生态系统类型、研究尺度、微生物类群、个体大小以及研究技术手段等相关。目前, 不同空间尺度下土壤微生物的分布规律、土壤微生物与植物群落是否存在协同分布与共进化的、如何预测土壤微生物分布及其对生态功能的影响等科学问题亟待深入研究(陆雅海, 2015; 褚海燕等, 2017), 而生态学代谢理论(metabolic theory of ecology, 简称 MTE)为联系微观和宏观生态系统理论的建立提供了契机, 已经在生态学的各个研究层次都有广泛的应用(Brown et al., 2004; Li et al., 2007)。

5 研究展望

(1) 生物多样性的分布格局与尺度密切相关, 因此开展不同尺度的生物多样性的研究以及它们对全球气候变化的响应是未来研究的重要方向。为了得到具有普适性的分布格局, 应深入分析研究区间的特征, 其中足够长的海拔高度是研究区间必备的因素之一。

(2) 深化对不同物种、不同山脉及不同气候带

物种多样性海拔梯度格局的比较研究也是一个重要的研究趋势。其中, 在进行不同山区比较时, 为了避免由于取样方法的不同引起偏差, 应充分考虑环境变量及调查方法的标准化。目前, 在土壤微生物多样性及其生态功能的研究方面, 方法学上的制约成为限制因素。因此, 应致力于各种方法的综合使用, 探索和创新微生物多样性的新方法和新技术从而避免方法本身所产生的偏差。

(3) 当前, 微生物群落构建理论基础主要有 3 种, 即生态位理论、中性理论和过程理论、多样性-稳定性理论(贺纪正等, 2015a)。土壤微生物时空分布规律都是建立于特定的时间和空间尺度乃至分类尺度上的。因此, 尺度效应是地理学与生态学等研究中必须考虑的关键问题。在不同的研究尺度上, 驱动微生物群落构建机制的差异导致了群落演变规律的变化(Heděnc et al., 2019)。包括在不同尺度上基于异速生长关系对生物学特征属性的描述和预测, 如生物量分配格局, 种群密度与群落结构、物种多样性的关系等(赵丹等, 2015; Zhou et al., 2016)。这一理论在动植物学研究中得到了证明, 但对于微生物的适用性一直未能厘清。事实上, 土壤微生物时空演变的研究是由生态学到微生物生态学领域的延伸, 多样性的海拔分布格局是否受山脉所处气候区(决定了底层植被的多样性)的调控, 阴阳坡微生物多样性海拔格局是否一致, 仍需要以地理学和生物学等相关学科理论为支撑, 并与微生物群落构建理论相结合, 对海拔分布格局下生物多样性的保护和生态系统稳定性研究提供科学依据。

(4) 土壤动物群落的多样性不仅包括物种的多样性, 还应包括生理型、营养型、生态型的多样性, 因此我们在将来的工作中应致力于其生理型、营养型、生态型的多样性的研究。

(5) 采用多种研究手段探索植物多样性与土壤生物多样性的内在机制, 建立土壤生物多样性的监测网络和评价体系并制定合理的土壤生物多样性保护策略将是重要的研究内容。

参考文献:

- BARUCH Z, 1984. Ordination and classification of vegetation along an altitudinal gradient in the Venezuelan paramos [J]. *Vegetation*, 55: 115-126.
- BEGON M, TOWNSEND C R, HARPER J L, 2008. *Ecology From Individuals to Ecosystems* [M]. 4th edition. New Jersey: Wiley-blackwell Press.
- BROWN J H, GILLOOLY J F, ALLEN A P, 2004. Toward a metabolic theory of ecology [J]. *Ecology*, 85(7): 1771-1789.
- BRYANT J A, LAMANNA C, MORLON H, et al., 2008. Microbes on mountainsides: contrasting elevational patterns of bacterial and plant

- diversity [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(Suppl 1): 11505-11511.
- DOLEZAL J, SRUTEK M, 2002. Altitudinal changes in composition and structure of mountain-temperate vegetation: A case study from the Western Carpathians [J]. *Plant Ecology*, 158: 201-221.
- FIERER N, JACKSON R B, 2006. The diversity and biogeography of soil bacterial communities [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 103(3): 626-631.
- FIERER N, MCCAIN C M, MEIR P, et al., 2011. Microbes do not follow the elevational diversity patterns of plants and animals [J]. *Ecology*, 92(4): 797-804.
- GASTON K J, 2000. Global patterns in biodiversity [J]. *Nature*, 405(6783): 220-226.
- GE Y, HE J Z, ZHU Y G, et al., 2008. Differences in soil bacterial diversity: driven by contemporary disturbances or historical contingencies? [J]. *The ISME Journal*, 2: 254-264.
- GUO Q F, KELT D A, SUN Z Y, et al., 2013. Global variation in elevational diversity patterns [J]. *Scientific Reports*, 3: 3007.
- HEDÉNEC P, JILKOVA V, LIN Q, 2019. Microbial communities in local and transplanted soils along a latitudinal gradient [J]. *CATENA*, 173: 456-464.
- HOOPER D U, VITOUSEK P M, 1997. The effect of plant composition and diversity on ecosystem processes [J]. *Science*, 277(5330): 1302-1305.
- JIANG Y, KANG M, LIU S, et al., 2000. A study on the vegetation in the east side of Helan Mountain [J]. *Plant Ecology*, 149(2): 119-130.
- KRATOCHWIL A, 1999. Biodiversity in ecosystems: some principles [M]//In: Kratochil A. (ed.) *Biodiversity in Ecosystems*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers: 5-38.
- LI Y, LI H T, JIN D M, et al., 2007. Application of WBE model to ecology: A review [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 27(7): 3018-3031.
- NOAH F, MCCAIN C M, MEIR P, et al., 2011. Microbes do not follow the elevational diversity patterns of plants and animals [J]. *Ecology*, 92(4): 797-804.
- OOMMEN M A, SHANKER K, 2005. Elevational species richness patterns emerge from multiple local mechanisms in Himalayan woody plants [J]. *Ecology*, 86(11): 3039-3047.
- PEET R K, 1978. Forest vegetation of the Colorado, Front Range: Pattern of species diversity [J]. *Vegetation*, 37: 65-68.
- SAMSON D A, RICKART E A, GONZALES P C, 1997. Ant diversity and abundance along an elevational gradient in the Philippines [J]. *Biotropica*, 29(3): 349-363.
- RAHBEK C, 2005. The role of spatial scale and the perception of large-scale species-richness patterns [J]. *Ecology Letters*, 8(2): 224-239.
- RAHBEK C, 2006. The elevational gradient of species richness: a uniform pattern [J]. *Ecography*, 18(2): 200-205.
- SANDERS N J, MOSS J, WAGNER D, 2003. Patterns of ant species richness along elevational gradients in an arid ecosystem [J]. *Global ecology and biogeography*, 12(2): 93-102.
- SANDERS N J, 2002. Elevational gradients in ant species richness: Area, geometry, and Rapoport's rule [J]. *Ecography*, 25(1): 25-32.
- SHEN C C, LIANG W J, YU S, et al., 2014. Contrasting elevational diversity patterns between eukaryotic soil microbes and plants [J]. *Ecology*, 95(11): 3190-3202.
- SINGH D, TAKAHASHI K, ADAMS J M, 2012a. Elevational patterns in archaeal diversity on Mt. Fuji [J]. *PLoS One*, 7(9): e44494.
- SINGH D, TAKAHASHI K, KIMM, et al., 2012b. A hump-backed trend in bacterial diversity with elevation on Mount Fuji, Japan [J]. *Microbial Ecology*, 63(2): 429-37.
- THEURILLAT J P, SCHLUSSEL A, GEISSLER P, et al., 2003. Vascular plant and bryophyte diversity along elevation gradients in the Alps [J]. 167: 185-193.
- UNGER M, LEUSCHNER C, HOMEIER J, 2010. Variability of indices of macronutrient availability in soils at different spatial scales along an elevation transect in tropical moist forests [J]. *Plant and Soil*, 336(1-2): 443-458.
- VAN DER HEIJDEN MGA, KLIRONOMOS J N, UREIC M, et al., 1998. Mycorrhizal fungal diversity determines plant biodiversity, ecosystem variability and productivity [J]. *Nature*, 396(6706): 69-72.
- WANG G H, ZHOU G S, YANG LM, et al., 2002. Distribution, species diversity and life-form spectra of plant communities along an altitudinal gradient in the northern slopes of Qilianshan Mountains, Gansu, China [J]. *Plant Ecology*, 165(2): 169-181.
- WANG J J, SOININEN J, ZHANG Y, et al., 2011. Contrasting patterns in elevational diversity between microorganisms and macroorganisms [J]. *Journal of Biogeography*, 38(3): 595-603.
- WHITTAKER R H, NIERING W A, 1965. Vegetation of the Santa Catalina Mountains, Arizona: A Gradient Analysis of the South Slope [J]. *Ecology*, 46(4): 429-452.
- WILSON J B, SYDES M T, 1988. Some tests for niche limitation by examination of species diversity in the Dunedin area, New Zealand [J]. *New Zealand Journal of Botany*, 26(2): 237-244.
- ZHOU J, DENG Y, SHEN L, et al., 2016. Temperature mediates continental-scale diversity of microbes in forest soils [J]. *Nature Communications*, 7: 12083.
- ZAK D R, HOLMES W E, WHITE D C, et al., 2003. Plant diversity, soil microbial communities, and ecosystem function: Are there any links? [J]. *Ecology*, 84(8): 2042-2050.
- JOHNSON D, BOOTH R E, WHITELEY A S, et al., 2003. Plant community composition affects the biomass, activity and diversity of microorganisms in limestone grassland soil [J]. *European Journal of Soil Science*, 54(4): 671-677.
- 布买丽娅木·吐如汗, 2017. 库车山区种子植物多样性海拔梯度格局研究 [D]. 乌鲁木齐: 新疆师范大学.
- TURGAN B, 2017. Altitudinal patterns of seed plant diversity in Kuche, Xinjiang (China) [D]. Urumqi: Xinjiang Normal University.
- 陈小乌, 由文辉, 易兰, 2009. 浙江天童太白山不同海拔土壤动物的群落结构[J]. *生态学杂志*, 28(2): 270-276.
- CHEN X N, WEN W H, YI L, 2009. Community structure of soil fauna along an altitudinal gradient in Taibai Mountain of Tiantong Region, Zhejiang Province [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 28(2): 270-276.
- 褚海燕, 王艳芬, 时玉, 等, 2017. 土壤微生物生物地理学研究现状与发展态势[J]. *中国科学院院刊*, 32(6): 585-592.
- CHU H Y, WANG YF, SHI Y, et al., 2017. Current status and development trend of soil microbial biogeography [J]. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, 32(6): 585-592.
- 高远, 慈海鑫, 邱振鲁, 等, 2009. 山东蒙山植物多样性及其海拔梯度格局[J]. *生态学报*, 29(12): 6377-6384.
- GAO Y, CI H X, QIU Z L, et al., 2009. Plant diversity and its elevational gradient patterns in Mengshan Mountain, Shandong, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 29(12): 6377-6384.
- 郭英荣, 雷平, 晏雨鸿, 等, 2015. 江西武夷山黄岗山西北坡植物物种多样性沿海拔梯度的变化[J]. *生态学杂志*, 34(11): 3002-3008.
- GUO Y R, LEI P, YAN Y H, et al., 2015. Plant species diversity changes along altitudinal gradient on the northwest slope of Huanggang Mountain of Jiangxi Wuyi Mountain [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 34(11): 3002-3008.

- 郝占庆, 于德永, 杨晓明, 等, 2002. 长白山北坡植物群落 α 多样性及其随海拔梯度的变化[J]. 应用生态学报, 13(7): 115-122.
- HAO Z Q, YU D S, YANG X M, 2002. α diversity of communities and their variety along altitude gradient on northern slope of Changbai Mountain [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 13(7): 115-122.
- 贺金生, 陈伟烈, 1997. 陆地植物群落物种多样性的梯度变化特征[J]. 生态学报, 17(1): 91-98.
- HE J S, CHEN W L, 1997. A review of gradient changes in species in species diversity of land plant communities [J]. Acta Ecologica Sinica, 17(1): 91-98.
- 贺纪正, 葛源, 2008. 土壤微生物生物地理学研究进展[J]. 生态学报, 28(11): 5571-5582.
- HE J Z, GE Y, 2008. Recent advances in soil microbial biogeography [J]. Acta Ecologica Sinica, 28(11): 5571-5582.
- 贺纪正, 王军涛, 2015a. 土壤微生物群落构建理论与时空演变特征[J]. 生态学报, 35(20): 6575-6583.
- HE J Z, WANG J T, 2015a. Mechanisms of community organization and spatiotemporal patterns of soil microbial communities [J]. Acta Ecologica Sinica, 35(20): 6575-6583.
- 贺纪正, 陆雅海, 傅伯杰, 2015b. 土壤生物学前沿[M]. 北京: 科学出版社.
- HE J Z, LU Y H, FU B J, 2015b. Frontier of Soil Biology [M]. Beijing: Science Press.
- 贺金生, 王政权, 方精云, 2004. 全球变化下的地下生态学: 问题与展望[J]. 科学通报, 49(13): 1226-1235.
- HE J S, WANG Z Q, FANG J Y, 2004. Belowground ecology under global change: Problems and prospects[J]. Chinese Science Bulletin, 49(13): 1226-1235.
- 黄建辉, 高贤明, 马克平, 等, 1997. 地带性森林群落物种多样性的比较研究[J]. 生态学报, 17(6): 611-618.
- HUANG J H, GAO X M, MA K P, et al., 1997. A Comparatives study on species diversity in zonal forest communities [J]. Acta Ecologica Sinica, 17(6): 611-618.
- 李延茂, 胡江春, 汪思龙, 等, 2004. 森林生态系统中土壤微生物的作用与应用[J]. 应用生态学报, 15(10): 1943-1946.
- LI Y M, HU J C, WANG S L, et al., 2004. Function and application of soil microorganisms in forest ecosystem [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 15(10): 1943-1946.
- 厉桂香, 马克明, 2018. 土壤微生物多样性海拔格局研究进展[J]. 生态学报, 38(5): 1521-1529.
- LI G X, MA K M, 2018. Progress in the study of elevational patterns of soil microbial diversity [J]. Acta Ecologica Sinica, 38(5): 1521-1529.
- 林英华, 张夫道, 等, 2004. 农田土壤动物与土壤理化性质关系的研究[J]. 中国农业科学, 37(6): 871-877.
- LIN Y H, ZHANG D F, et al., 2004. Study on the relationship between agricultural soil fauna and soil physicochemical properties [J]. Scientia Sgricoltura Sinica, 37(6): 871-877.
- 刘秉儒, 张秀珍, 胡天华, 等, 2013. 贺兰山不同海拔典型植被带土壤生物多样性[J]. 生态学报, 33(22): 7211-7220.
- LIU B R, ZHANG X Z, HU T H, et al., 2013. Soil microbial diversity under typical vegetation zones along an elevation gradient in Helan Mountains [J]. Acta Ecologica Sinica, 33(22): 7211-7220.
- 刘兴良, 史作民, 杨冬生, 等, 2005. 山地植物群落生物多样性与生物生产力海拔梯度变化研究进展[J]. 世界林业研究, 18(4): 27-34.
- LIU X L, SHI Z M, YANG D S, et al., 2005. Advances in Study on Changes of Biodiversity and Productivity Along Elevational Gradient in Mountainous Plant Community [J]. World Forestry Research, 18(4): 27-34.
- 陆雅海, 2015. 土壤微生物学研究现状与展望[J]. 中国科学院院刊, 30(Z1): 106-114.
- LU Y H, 2015. Recent development of soil microbiology and future perspectives [J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 30(Z1): 106-114.
- 路有成, 王宗英, 1994. 九华山土壤动物的垂直分布[J]. 地理研究, 13(2): 74-81.
- LU Y C, WANG Z Y, 1994. Vertical distribution of soil animal on the Jiuhua Mountain [J]. Geographical Research, 13(2): 74-81.
- 马克平, 1993. 试论生物多样性的概念[J]. 生物多样性, 1(1): 20-22.
- MA K P, 1993. On the concept of biodiversity [J]. Biodiversity Science, 1(1): 20-22.
- 曲广鹏, 参木友, 赵景学, 等, 2015. 念青唐古拉山东南坡植被群落数量生态分析及群落多样性[J]. 生态环境学报, 24(10): 1618-1624.
- QU G P, CAN M Y, ZHAO X J, et al., 2015. Quantitative ecology and species diversity of the vegetation in southeast slope of the Nyenchentanglha Mountain [J]. Ecology and Environment Sciences, 24(10): 1618-1624.
- 孙云云, 赵兰坡, 2010. 土壤质量评价的生物指标及其相关性研究进展[J]. 中国农学通报, 26(5): 116-120.
- SUN Y Y, ZHAO L P, 2010. Progress in study of biological indexes of soil quality evaluation and analysis of the correlations [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 26(5): 116-120.
- 唐志尧, 方精云, 张玲, 2004a. 秦岭太白山木本植物物种多样性的梯度格局及环境解释[J]. 生物多样性, 12(1): 115-122.
- TANG Z Y, FANG J Y, ZHANG L, 2004a. Patterns of woody plant species diversity along environmental gradients on Mt. Taibai, Qinling Mountains [J]. Biodiversity Science, 12(1): 115-122.
- 唐志尧, 方精云, 2004b. 植物物种多样性的垂直分布格局[J]. 生物多样性, 12(1): 20-28.
- TANG Z Y, FANG J Y, 2004b. A review on the elevational patterns of plant species diversity [J]. Biodiversity Science, 12(1): 20-28.
- 王国宏, 2002. 祁连山北坡中段植物群落多样性的垂直分布格局[J]. 生物多样性, 10(1): 7-14.
- WANG G H, 2002. Species diversity of plant communities along an altitudinal gradient in the middle section of northern slopes of Qilian Mountains, Zhangye, Gansu, China [J]. Biodiversity Science, 10(1): 7-14.
- 王邵军, 阮宏华, 汪家社, 等, 2010. 武夷山典型植被类型土壤动物群落的结构特征[J]. 生态学报, 30(19): 5174-5184.
- WANG S J, RUAN H H, WANG J S, et al., 2010. Composition structure of soil fauna community under the typical vegetations in the Wuyi Mountains, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 30(19): 5174-5184.
- 王振海, 殷秀琴, 蒋云峰, 2014. 长白山苔原带土壤动物群落结构及多样性[J]. 生态学报, 34(3): 755-765.
- WANG Z H, YIN X Q, JIANG Y F, 2014. Structure and diversity of soil fauna communities in the tundra of the Changbai Mountains, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 34(3): 755-765.
- 吴裕鹏, 许涵, 李意德, 等, 2013. 海南尖峰岭热带林层物种多样性沿海拔梯度分布格局[J]. 林业科学, 49(4): 16-23.
- WU Y P, XU H, LI Y D, et al., 2013. Elevation patterns of tree and shrub species diversity of tropical forests in Jianfengling, Hainan Island [J]. Scientia Silvae Sinicae, 49(4): 16-23.
- 吴则焰, 林文雄, 陈志芳, 等, 2013. 中亚热带森林土壤微生物群落多样性随海拔梯度的变化[J]. 植物生态学报, 37(5): 397-406.
- WU Z Y, LIN W X, CHEN Z F, et al., 2013. Variations of soil microbial community diversity along an elevational gradient in mid-subtropical forest [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 37(5): 397-406.
- 肖能文, 刘向辉, 戈峰, 等, 2009. 高黎贡山自然保护区大型土壤动物群落特征[J]. 生态学报, 29(7): 3576-3584.

- XIAO N W, LIU X H, GE F, et al., 2009. Research on soil faunal community composition and structure in the Gaoligong Mountains National Nature Reserve [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 29(7): 3576-3584.
- 岳明, 张林静, 党高弟, 等, 2002. 佛坪自然保护区植物群落物种多样性与海拔梯度的关系[J]. *地理科学*, 22(3): 349-354.
- YUE M, ZHANG L J, DANG G D, et al., 2002. The Relationships of Higher Plants Diversity and Elevation Gradient in Foping National Reserve [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 22(3): 349-354.
- 方精云, 2004. 探索中国山地植物多样性的分布规律[J]. *生物多样性*, 12(1): 1-4.
- FANG J Y, 2004. Exploring altitudinal patterns of plant diversity of China's mountains [J]. *Biodiversity Science*, 12(1): 1-4.
- 万明利, 2006. 宽坝林区主要森林群落植物多样性及其种间关系研究[D]. 雅安: 四川农业大学.
- WAN M L, 2006. Study on plant diversity and interspecific association of main forest communities in forest region of Kuanba [D]. Ya'an: Sichuan Agriculture University.
- 赵丹, 刘鹏飞, 潘超, 等, 2015. 生态代谢组学研究进展[J]. *生态学报*, 35(15): 4958-4967.
- ZHAO D, LIU P F, PAN C, et al., 2015. Advances in ecometabolomics [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 35(15): 4958-4967.
- 张东杰, 徐翔, 曾小强, 等, 2016. 宁夏贺兰山种子植物区系垂直分布格局及其气候解释[J]. *安徽农业科学*, 44(32): 53-56.
- ZHANG D J, XU X, ZENG X Q, et al., 2016. Altitudinal patterns of seed plants floristic composition and their climatic explanation in Helan Mountain Nature Reserve, Ningxia Province [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 44(32): 53-56.
- 郑智, 2015. 白水江自然保护区植物、两栖爬行动物物种多样性海拔分布格局的研究[D]. 兰州: 西北师范大学.
- ZHENG Z, 2015. The study on elevational patterns of plant, amphibian and reptile species diversity in the Baishuijiang Nature Reserve [D]. Lanzhou: Northwest Normal University.
- 朱彪, 陈安平, 刘增力, 2004. 广西猫儿山植物群落物种组成、群落结构及树种多样性的垂直分布格局[J]. *生物多样性*, 12(1): 44-52.
- ZHU B, CHEN A P, LIU Z L, 2004. Changes in floristic composition, community structure, and tree species diversity of plant communities along altitudinal gradients on Mt. Mao'er, Guangxi, China [J]. *Biodiversity Science*, 12(1): 44-52.
- 朱永恒, 赵春雨, 王宗英, 等, 2005. 我国土壤动物群落生态学研究综述[J]. *生态学杂志*, 24(12): 1477-1481.
- ZHU Y H, ZHAO C Y, WANG Z Y, et al., 2005. Research on soil animal community ecology in China [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 24(12): 1477-1481.
- 朱珣之, 张金屯, 2005. 中国山地植物多样性的垂直变化格局[J]. *西北植物学报*, 25(7): 1480-1486.
- ZHU X Z, ZHANG J T, 2015. Altitudinal patterns of plant diversity of China mountains [J]. *Acta Botanica Boreali-occidentalia Sincia*, 25(7): 1480-1486.
- 殷秀琴, 宋博, 董炜华, 等, 2010. 我国土壤动物生态地理研究进展[J]. *地理学报*, 65(1): 91-102.
- YIN X Q, SONG F, DONG W H, et al., 2010. A review on the eco-geography of soil fauna in China [J]. *Acta Geographica Sincia*, 65(1): 91-102.

Recent Advances in Altitudinal Distribution Patterns of Biodiversity

LIU Bingru

College of Biological Science and Engineering, North Minzu University, Yinchuan 750021, China

Abstract: The altitude distribution pattern of biodiversity is influenced by many factors, including climate, space, and environment and so on. A large number of studies have found that environmental factors play the most significant role in driving the responses of plants and microorganisms, therefore, it is of great significance to explore altitudinal distribution pattern of biodiversity driven by environmental factors. This paper reviews the changes of plant, soil animal and soil microbial biodiversity along the altitudinal gradient, and five distribution patterns and possible mechanisms of plant diversity and three distribution patterns and possible mechanisms of soil animal diversity along altitudinal gradient under temperature, humidity and human disturbance were revealed. At the same time, it was revealed that although there were species patterns in the distribution pattern of soil microorganisms at altitudinal gradient, the mechanism was not very clear on this basis, it was considered that the distribution pattern of biodiversity was closely related to the scale, so it was an important direction for future research to carry out the research on biodiversity at different scales and their response to global climate change; the research on the change law of soil animal community diversity should focus on its physiological type, nutritional type and ecological type at different research scales, the difference of driving mechanism of microbial community construction led to the change of community evolution law, which still needed to be supported by the theories of geography, biology and other related disciplines, and combined with the theory of microbial community construction, to provide scientific basis for the protection of biodiversity and the study of ecosystem stability under the pattern of sea-level distribution.

Key words: biodiversity; plant diversity; animal diversity; soil microbial diversity; altitudinal gradient; distribution patterns; recent advances