神农架南北坡底栖动物生物多样性研究

李杨[1,2] 杨顺益[1,2] 汪兴中[3] 蔡庆华[11]

(1. 中国科学院水生生物研究所，湖北 武汉 430071;

2. 长江航务管理局环境监测中心站，湖北 武汉 430019;

3. 湖州师范学院，浙江 湖州 313002)

【摘 要】: 生物多样性格局是生物地理学和保育生物学的研究重点。然而以前的研究主要关注物种多样性，忽视了遗传和功能方面。这导致对生物多样性格局的不完全揭示。以神农架南北坡的底栖动物为研究对象，分析物种多样性、分类学多样性和功能多样性的空间分布特征，探究生物多样性间的关系。结果表明，不同的底栖动物多样性对坡向因子响应不同：南坡的物种丰富度、物种均匀度和功能多样性参数变动范围明显大于北坡，而北坡的分类学多样性参数变动范围明显大于南坡；南坡的功能多样性参数的中位数明显高于北坡。显著性分析结果显示，南北坡底栖动物生物多样性无显著差异，表明局地尺度上坡向因子没能驱动生物多样性空间差异性分布。相关性分析结果显示分类学多样性和功能多样性无显著相关，生物多样性的不同面相关性较弱。研究表明，神农架底栖动物不同多样性具有差异性，在制定保护多样性策略的时候应该综合考虑生物多样性的谱系和功能方面。

【关键词】: 物种多样性 分类学多样性 功能多样性 坡向

【中图分类号】:S931.1**【文献标识码】**:A**【文章编号】**:1004-8227(2021)06-1400-06

生物多样性的评估通常是基于物种的计算，过去的几十年里，物种多样性是群落生态学、生物地理学和保育生物学的研究重点[1]。然而，物种多样性只能有限地代表生物多样性，因为它把所有物种视作在遗传和功能上相互独立的[2],忽视了物种共同进化和功能相关的信息[3,4]。而谱系多样性和功能多样性的研究为我们认识生物多样性形成和维持机制提供了的遗传和功能属性的信息[5,6]。最近的研究开始认识到生物多样性的多面性，发现不同的多样性揭示不同生态过程和环境筛选过程，同时表征不同的自然源和人为源扰动的响应[7]。在生物多样性的多面性研究中，分类学多样性作为谱系多样性的替代指标，与物种多样性和基于生物性状的功能多样性一起广泛用于群落构建[8]、物种保护[5]、多样性-稳定性关系[9]等领域研究。

神农架是湖北省境内长江与汉水之间的第一级分水岭，属于北亚热带季风气候区，为亚热带气候向温带气候过渡区域。南坡表现出北亚热带的气候特征，而北坡地区表现暖温带的气候特征[10]。本文以底栖动物为对象，在分析神农架南北坡物种多样性、分类学多样性和功能多样性基础上，主要研究 3 个问题：(1)不同多样性对坡向因子的响应是否相同；(2)南北坡的生物多样性是否存在差异；(3)不同多样性之间的关系，以期望为神农架地区生物多样性保护提供理论和数据支撑。

[1]**作者简介**：李杨(1990～),男，硕士研究生，主要研究方向为河流生态学.E-mail:liyang.1990@foxmail.com
蔡庆华 E-mail:qhcai@ihb.ac.cn
基金项目：中国科学院战略先导 A 类项目(XDA23080101);国家重点研发计划项目(2017YFC0506406)

1 材料与方法

1.1 研究区域与样点设置

在神农架林区河流生态系统长期监测中，选定 2007 年 7 月(夏季)、2007 年 10 月(秋季)、2008 年 3 月(冬季，2008 年大雪至采样推后)和 2008 年 5 月(春季)对神农架南北坡季节采样的数据，样点共计 9 个(图 1)。其中神农架南坡 5 个，分别记为 S1～S5;神农架北坡 4 个，分别记为 N1～N4。因交通困难等原因，部分样点未采集到，总共采集样点数 32 个。

1.2 底栖动物采集与鉴定

根据不同的底质类型，利用索伯网(Surbersampler)(40 目，采样面积 0.09m^2)放置于样点的河床，随机采集 5 个重复。所有生物样本置于 10%的福尔马林溶液中保存。实验室内，依据相关文献[11~13]对底栖动物进行鉴定计数。

1.3 生物多样性计算

物种多样性选择物种丰富度(Richness,S)、香浓维纳指数(Shannon-Winner,H)和物种均匀度(Evenness,E)进行度量，计算同文献[14]。分类学多样性选择分类多样性指数指数((Taxonomic diversity index,Δ)和分类差异指数(Taxonomic distinctness sindex,Δ*)进行度量，计算公式如下[15]:

$$\Delta = \frac{\sum\sum_{i<j} w_{ij} X_i X_j}{\sum\sum_{i<j} X_i X_j + \sum_i X_i (X_i - 1)/2} \quad (1)$$

$$\Delta^* = \frac{\sum\sum_{i<j} w_{ij} X_i X_j}{\sum\sum_{i<j} X_i X_j} \quad (2)$$

式中：X_i为物种 i 的丰度；X_j为物种 j 种的丰度；w_{ij}为物种 i 和物种 j 在分类系统树状图中的分支路径长度。

功能性状主要参考文献[16~18],选择化性(Voltinism)、漂移性(Occurrence in drift)、游泳能力(Swimmingability)、附着能力(Attachment)、形状(Shape)、成熟个体大小(Sizeatmaturity)、流态偏好(Rheophily)、温度偏好(Thermal Preference)、生活型(Habit)、营养习性(Trophic habit)等 10 个功能性状纳入分析。功能性状及其等级描述同文献[19,20]。功能多样性选择功能丰富度(Functional Richness,FR_{ic})、功能均匀度(Functional Evenness,FE_{ve})、功能分离度(Functional Divergence,FD_{iv})进行度量，计算公式如下[21]:

$$FR_{ic} = \frac{SF_{ci}}{R_c} \quad (3)$$

式中：SF_{ci}为群落 i 内物种所占据的生态位空间；R_c为性状 c 的绝对值范围。

$$FE_{nr} = \frac{\sum_{i=1}^{S-1} \min\left(PEW_i \frac{1}{S-1}\right) - \frac{1}{S-1}}{1 - \frac{1}{S-1}} \qquad (4)$$

式中：S 为物种丰富度；PEW_i 为物种 i 的局部加权均匀度。

$$FD_{\pi} = \frac{2}{\pi} arctan\left[5 \times \sum_{i=1}^{N} \left[(\ln C_i - \overline{\ln x})^2 \times A_i\right]\right] \qquad (5)$$

式中：C_i 为第 i 项功能性状的数值；A_i 为第 i 项功能性状的相对丰度；$\overline{\ln x}$ 为物种特征值自然对数的加权平均值。

1.4 数据统计与分析

物种多样性和分类学多样性使用 R 语言的 vegan 包计算，功能多样性使用 R 语言的 FD 包计算。t 检验(t-test)、相关分析(Pearson Correlation analysis)和箱线图使用的软件为 R 的基础包，其中 t 检验用于比较南北坡生物多样性的差异性、相关分析用于计算生物多样性间的相关性，箱线图用于展示生物多样性在南北坡的分布特征。

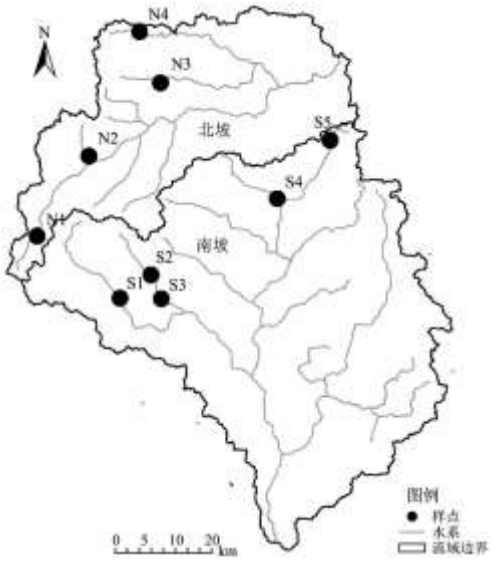

图 1 样点图

2 结果与分析

2.1 物种多样性的空间分布

南坡物种丰富度和物种均匀度分别介于 10～37、1.40～2.55 之间，较北坡的物种丰富度和物种均匀度 22～36 和 1.78～2.66 的变幅大，但其中位数相近(图 2 的左、右)。南坡香浓维纳指数的中位数 2.31 高于北坡的 2.17，而南北坡的香浓维纳指数的变幅差异不明显(图 2 的中间)。t 检验结果显示物种多样性参数在南北坡间没有显著差异(表 1)。

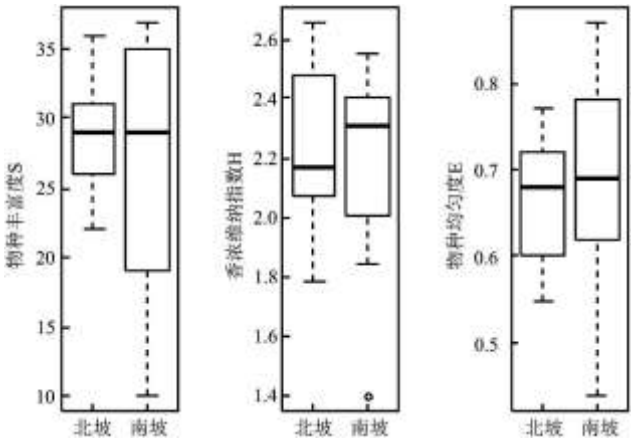

图 2 底栖动物物种多样性空间分布格局

表 1 南北坡生物多样性指数的 t 检验

	物种丰富度 S	香浓维纳指数 H	物种均匀度 E	分类多样性指数 Δ
P	0.53	0.77	0.54	0.66
	分类差异性指数 Δ＊	功能丰富度 FR_{ic}	功能均匀度 FE_{ve}	功能分离度 FD_{iv}
P	0.83	0.45	0.10	0.24

2.2 分类学多样性的空间分布

南坡分类多样性指数和分类差异性指数分别介于 29.36～48.37 和 46.35～60.87 之间，北坡分类多样性指数和分类差异性指数分别介于 35.79～52.66 和 46.45～65.38 的范围，北坡分类学多样性变幅明显大于南坡，但南北坡分类学多样性的中位数相近(图 3)。t 检验结果显示分类学多样性参数在南北坡间没有显著差异(表 1)。

2.3 功能多样性的空间分布

南坡的功能丰富度、功能均匀度和功能分离 0.88 之间，北坡的功能丰富度、功能均匀度和功能分离度分别介于 26.15～101.31、0.35～0.52、0.61～0.78 之间，南坡功能多样性参数变幅范围大于北坡，同时南坡功能丰富度、功能均匀度和功能分离度的中位数高于北坡(图 4)。但是 t 检验结果显示功能多样性参数在南北坡间没有显著差异(表 1)。

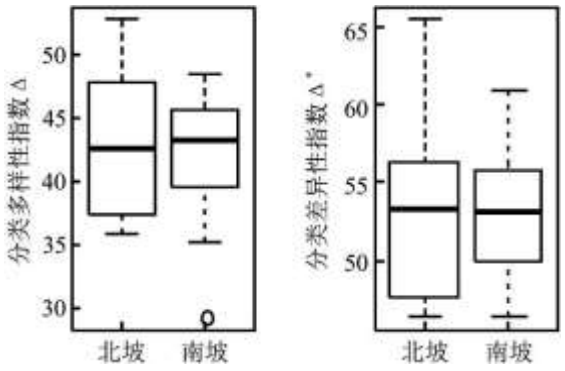

图 3 底栖动物分类学多样性空间分布格局

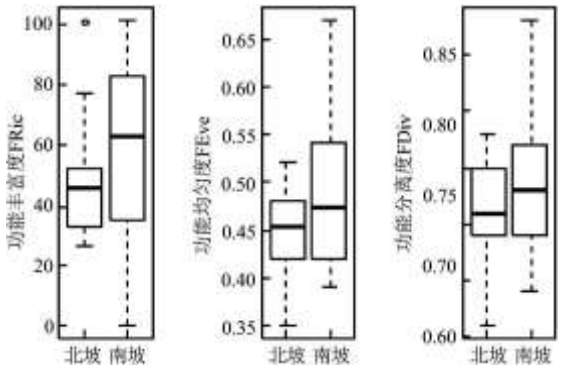

图 4 底栖动物功能多样性空间分布格局

2.4 不同多样性的相关性

相关分析结果显示(表 2):不同多样性的内部，只有物种多样性的香浓维纳指数和物种均匀的存在显著正相关。多样性之间，物种多样性与分类学多样性间，分类多样性指数与香浓维纳指度分别介于 0.04～101.71、0.39～0.67、0.64～数、物种均匀度存在显著正相关；物种多样性与功能多样性间，物种丰富度与功能丰富度、功能均匀度分别呈显著正相关和显著负相关；而分类学多样性与功能多样性不存在显著相关性。

表 2 生物多样性指数见 Pearson 相关分析

	香浓维纳指数	物种均匀度	分类多样性指数	分类差异性指数	功能丰富度	功能均匀度	功能分离度
物种丰富度	0.20	-0.52	0.06	0.24	0.87**	-0.55*	-0.40
香浓维纳指		0.71**	0.71**	-0.11	0.27	-0.35	-0.11
物种均匀度			0.57*	-0.24	-0.34	0.16	0.26
分类多样性指数				0.52	0.17	-0.20	0.16
分类差异性指数					0.31	0.03	0.23
功能丰富度						-0.48	-0.17

功能均匀度							0.51

3 讨论

3.1 南北坡生物多样性的空间分布特征

根据底栖动物生物多样性空间分析可知，南坡的物种丰富度、物种均匀度和功能多样性参数变动范围明显大于北坡，而北坡的分类学多样性参数变动范围明显大于南坡；南坡的物种丰富度、物种均匀度和分类学多样性参数的中位数与北坡相近，南坡的功能多样性参数的中位数明显高于北坡。这表明神农架不同多样性对坡向因子的响应不同。群落的不同多样性参数对空间因子和环境变量有着不一致的响应[22],是因为群落的不同面可能由不同机制驱动[23]。神农架南北坡生物多样性不同面变化的不一致性，可能是的群落的物种多样性、分类学多样和功能多样性对关键生态过程的响应截然不同[2]。这种生物多样性不同面变化的不一致性广泛存在河流生态系统[8,22~24]、湖泊生态系统[7,25]、陆地生态系统[5]中。

显著性分析发现，南北坡的生物多样性参数差异不显著。神农架坡向因子没能驱动底栖动物生物多样性差异性分布，表明局地尺度的空间变量可能对群落生物多样性的变动驱动力弱[3,24]。芬兰北方河流底栖动物生物多样性就表现出与坡度、海拔等景观变量的弱相关[1]。西藏河流底栖动物的物种多样性和功能多样性的变动与环境变量更相关，而其空间因子只在分类学多样性的变异上有较高的解释度[8]。

3.2 生物多样性不同面的关系

相关性分析表明，神农架底栖动物不同多样性的相关性较弱。不同多样性内部，只有物种多样性参数的香浓维纳指数和物种均匀度存在显著正相关。香浓维纳指数是基于物种丰富度和物种均匀度，所以香浓维纳指数与物种均匀度显著相关[8];不同多样性之间，分类学多样性和功能多样性之间无显著相关。香浓维纳指数、物种均匀度与分类多样性指数存在显著正相关。物种丰富度与功能丰富度、功能均匀度分别呈显著正相关和显著负相关。许多研究都表明物种丰富度与功能多样性有较强的相关性[8,21],而物种多样性和分类学多样性参数间的相关性变动较大[1,26]。水生态系统的生物多样性参数之间的关系可能是高度变化、且受研究对象和度量方式影响的[7,8]。

有些研究强调空间大尺度上多样性的不同面可能有很强的相关性[27],认为保护物种丰富度的可以同时保护生物多样性所有面。然而区域尺度的研究[3,26,28]表明生物多样性不同面表现出弱相关，应该避免以单一生物多样性指数作为保护策略的核心指标[29]。神农架底栖动物生物多样性不同面没有相似性，保护其多样性应该需要兼顾遗传和功能属性。

4 结论

(1)神农架底栖动物的不同多样性在南北坡的分布特征不同，不同多样性对坡向因子的响应不同；(2)神农架南北的底栖动物生物多样性没有显著性差异；(3)不同多样性之间关系较弱，不同多样性表征生物多样性的不同面；(4)保护神农架生物多样性，应该关注其遗传和功能属性。

参考文献：

[1]HEINO J,MYKR H,KOTANEN J.Weak relationships between landscape characteristics and multiple facets of stream macroinvertebrate biodiversity in a boreal drainage basin[J].Landscape Ecology,2008,23(4):417-426.

[2]LI Z F,LIU Z Y,HEINO J,et al.Discriminating the effects of local stressors from climatic factors and dispersal processes on multiple biodiversity dimensions of macroinvertebrate communities across subtropical drainage basins[J].Science of the Total Environment,2019,711.

[3]HILL M J,HEINO J,WHITE J C,et al.Environmental factors are primary determinants of different facets of pond macroinvertebrate alpha and beta diversity in a human-modified landscape [J].Biological Conservation,2019,237:348-357.

[4]SAITO V S,SIQUEIRA T,FONSECA-GESSNER A A.Should phylogenetic and functional diversity metrics compose macroinvertebrate multimetric indices for stream biomonitoring?[J].Hydrobiologia,2015,745,167-179.

[5]GUILHAUMON F,ALBOUY C,CLAUDET J,et al.Representing taxonomic,phylogenetic and functional diversity:new challenges for Mediterranean marine-protected areas[J].Diversity and Distributions,2015,21(2):175-187.

[6]JARZYNA M A,JETZ W.Detecting the multiple facets of biodiversity[J].Trends in Ecology and Evolution,2016:S0169534716300222.

[7]TOLONEN K T,VILMI A,KARJALAINEN S M,et al.Do different facets of littoral macroinvertebrate diversity show congruent patterns in a large lake system?[J].Community Ecology,2017,18:109-116.

[8]LI Z F,JIANG,X M,JUN W,et al.Multiple facets of stream macroinvertebrate alpha diversity are driven by different ecological factors across an extensive altitudinal gradient[J].Ecology and Evolution,2019,9:1-17.

[9]CRAVEN D,EISENHAUER N,PEARSE W D,et al.Multiple facets of biodiversity drive the diversity-stability relationship[J].Nature Ecology and Evolution,2018(2).

[10]汪兴中.神农架地区溪流底栖动物分布特征及其与环境因子关系研究[D].武汉：中国科学院水生生物研究所，2010.

[11]MORSE J C,YANG L F,TIAN L X.Aquatic insect of China useful for monitoring water quality.Nanjing [M].China:Hehai University Press,1994.

[12]MERRITT R W,BERG M B,FLINT O,et al.An introduction to the aquatic insects of North American [M].Dubuque:Kendall/Hunt Publishing Company Press 4th ed,2008.

[13]WIGGINS G B.Larvae of the North American caddisfly genera (Trichoptera) (2nd eds) [M].Toronto:University of Toronto Press,1996.

[14]刘乐丹，王先云，陈丽平，等.淀山湖底栖动物群落结构及其与沉积物碳氮磷的关系[J].长江流域资源与环境，2018,27(6):1269-1278.

[15]解崇友，牛亚兵，罗德怀，等.三峡库区重要支流鱼类多样性初探[J].长江流域资源与环境，2018,27(12):2747-2756.

[16]POFF N L,OLDEN J D,VIEIRA N K M,et al.Functional trait niches of North American lotic insects:traits based

ecological applications in light of phylogenetic relationships[J].Journal of the North American Benthological Society,2006,25(4):730-755.

[17]USSEGLIO-POLATERA P,BOURNAUD M,RICHOUX P,et al.Biological and ecological traits of benthic freshwater macroinvertebrates:Relationships and definition of groups with similar traits[J].Freshwater Biology,2001,43(2):175-205.

[18]TACHET H,RICHOUX P,BOURNAUD M,et al.Invertebres d’ eau douce:systematique,biologie,ecologie [M].Paris:CNRS editions,2002.

[19]蒋万祥，何逢志，蔡庆华.香溪河水生昆虫功能性状及功能多样性空间格局[J].生态学报，2017,37(6):1861-1870.

[20]蒋万祥，陈静，王红妹，等.新薛河典型生境底栖动物功能性状及其多样性[J].生态学报，2018,38(6):2007-2016.

[21]陈静，蒋万祥，贺诗水，等.新薛河底栖动物物种多样性与功能多样性研究[J].生态学报，2018,38(9):3328-3336.

[22]WANG J,JIANG X M,LI Z F,et al.Changes in multiple facets of macroinvertebrate alpha diversity are linked to afforestation in a subtropical riverine natural reserve[J].Environmental Science and Pollution Research.2018.

[23]ROCHA M P,BINI LM,GRONROOS M,et al.Correlates of different facets and components of beta diversity in stream organisms[J].Oecologia,2019,191.

[24]HEINO J,TOLONEN K.Ecological drivers of multiple facets of beta diversity in a lentic macroinvertebrate metacommunity[J].Limnology and Oceanography,2017,62(6):2431-2444.

[25]HEINO J,TOLONEN K.Untangling the assembly of littoral macroinvertebrate communities through measures of functional and phylogenetic alpha diversity[J].Freshwater Biology,2017,62(7):1168-1179.

[26]HEINO J,SOININEN J,LAPPALAINEN J,et al.The relationship between species richness and taxonomic distinctness in freshwater organisms[J].Limnology and Oceanography,2005,50:978-986.

[27]STRECKER A L,OLDEN J D,WHITTIER J B,et al.Defining conservation priorities for freshwater fishes according to taxonomic,functional,and phylogenetic diversity[J].Ecological Application,2011,21:3002-3013.

[28]CAI J,ZHANG M,XU J,et al.Geographical gradients in the biodiversity of Chinese freshwater molluscs:Implications for conservation[J].Diversity and Distributions,2018,24:485-496.

[29]DEVICTOR V,MOUILLOT D,MEYNARD C,et al.Spatial mismatch and congruence between taxonomic,phylogenetic and functional diversity:The need for integrative conservation strategies in a changing world[J].Ecology Letter,2010,13:1030-1040.