
神农架地区香溪河流域水生昆虫物种 多样性与功能多样性研究

蒋万祥^{1, 2} 渠晓东³ 吴乃成⁴ 贾兴焕⁵ 蔡庆华¹¹

(1. 中国科学院水生生物研究所, 淡水生态与生物技术国家重点实验室,

湖北 武汉 430072; 2. 枣庄学院生命科学学院, 山东 枣庄 277160;

3. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038;

4. 宁波大学地理与空间信息技术系, 浙江 宁波 315211;

5. 中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 浙江 富阳 311400)

【摘要】: 物种多样性和功能多样性广泛应用于生态学和保护生物等领域的研究, 理清物种多样性和功能多样性之间的关系, 对于深入理解生物多样性组分间的关系及生物多样性的保护意义重大。以香溪河流域为例, 就水生昆虫物种多样性、功能多样性时空动态进行了分析, 并就生物多样性指数间的关系进行了探讨。主要结果如下: 物种丰富度介于 2~44 之间, 冬季最大, 春、秋季次之, 夏季最小; 香浓指数介于 0.38~3.03 之间, 均值在冬季最大, 春季次之, 夏、秋季最小; 均匀度指数介于 0.89~1 之间, 表现为春、夏季大于秋、冬季。物种丰富度和香浓指数在 4 条河流间均表现为九冲河最大, 香溪河次之, 高岚河和古夫河最小; 均匀度指数在 4 条河流间差异不显著。功能多样性方面, 除功能丰富度指数表现为冬季最大, 夏季最小外, 其它指数在时空序列上均无显著差异。Pearson 相关分析表明, 功能丰富度、功能均匀度、功能离散度指数间相关均不显著; 功能丰富度指数同物种丰富度和 Shannon 指数相关极显著; 功能均匀度指数同物种丰富度和 Shannon 指数相关显著; 功能离散度指数同物种丰富度和 Shannon 指数相关显著, 同均匀度指数相关极显著。运用回归分析研究物种多样性对功能多样性的影响, 结果表明, 物种丰富度、Shannon 指数对功能丰富度影响极显著, 物种丰富度对功能均匀度影响显著, 均匀度指数对功能离散度影响显著; 物种多样性同功能多样性指数间拟合度整体不高。

【关键词】: 香溪河流域 水生昆虫 物种多样性 功能多样性 生物多样性

【中图分类号】: Q958.8 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2021)06-1428-09

作者简介: 蒋万祥(1979~), 男, 副教授, 主要研究方向为底栖动物生态学. E-mail: jiangwanxiang@uuz. edu. cn
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); 国家重点研发项目(2017YFC0506406); 国家自然科学基金(51979241; 32071588)

自然资源过度开发^[1]、污染物排放^[2,3]、水文特征改变^[4]、栖息丧失、外来物种入侵^[5]及全球性气候变化^[6,7]致使淡水生态系统的物种正以前所未有的速率消失^[8],如占全球鱼类生物多样性 40%的淡水鱼类中的很多物种已经灭绝或被列入高危物种^[9]。淡水生态系统已然成为全球范围内受到最严重威胁的生态系统之一^[8]。

传统生物多样性保护的核心为物种多样性保护,主要关注物种在哪些区域出现(或哪些区域适宜物种生存)和怎样保护物种多样性;群落的物种数目通常被作为衡量生物多样性保护效果和栖息质量优劣的标尺^[10]。随着研究的深入,越来越多的研究表明,物种数量并不能全面的反映群落的一些生态学属性(如生态学、形态学、生理学等性状的多样性)^[11,12]。近年来,生物多样性研究已从群落物种多样性拓展至功能多样性层面;功能多样性在生态系统功能和服务研究中扮演的角色越来越重要^[13,14]。因此,理清物种多样性和功能多样性之间的关系,对于深入理解生物多样性组分间的关系及生态系统的保护意义重大。

底栖动物分类学相关参数作为传统的环境质量评价指标已有相当长的时间^[15];然而,在功能多样性研究方面,由于功能性状的量化和获取较为困难,因此,研究相对较少,在我国仍鲜见报道。本文采用香溪河水系水生昆虫调查数据,主要研究 2 个内容:(1)水生昆虫物种多样性、功能多样性时空格局;(2)生物多样性指数(物种多样性、功能多样性)间的关系。希望通过本研究基本明确研究区域水生昆虫多样性分布格局及相互关系,为后续深入开展相关研究(如功能性状与物种组成关系,土地利用、水电开发、城镇化等对区域生态系统影响等)及区域生物多样性保护奠定一定的理论基础。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

香溪河发源于神农架林区,流域面积 3099km²,自然落差 1540m^[16],流域年平均降水约 1000mm^[17,18],为三峡湖北库区最大的入库河流;拥有九冲河、古夫河、高岚河 3 条主要支流^[19,20]。本研究在香溪河流域共设样点 12 个(图 1),其中,九冲河 5 个(JC09、JC08、JC05、JC03、JC02),香溪河 4 个(XX23、XX21、XX17、XX14),高岚河 2 个(GL03、GL02),古夫河 1 个(GF04)。4 条河流中九冲河受人类活动干扰最小,栖息质量最好,香溪河干流次之,而高岚河和古夫河受干扰较为严重^[19,21]。

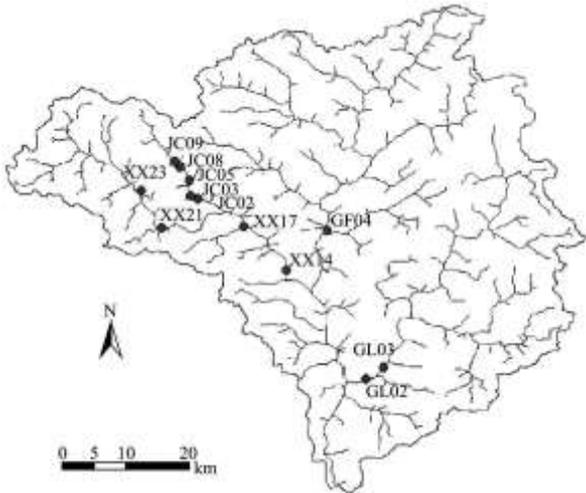


图 1 香溪河水系及样点分布图

1.2 底栖动物采集及鉴定

2005 年 7 月~2006 年 6 月每月中旬用 40 目网径、采样面积 0.09m²的索伯网(surbersampler)于每个样点沿河道断面采集 2~

3次，将网中的底栖动物拣出，装标本瓶中，用10%的福尔马林液固定。标本带回实验室后，参考相关文献[22, 23]分类、计数。

1.3 功能性状和功能多样性

功能性状等级划分主要参考文献^[24~26]。选择化性(Voltinism)、漂移性(Occurrence in drift)、游泳能力(Swimming ability)、吸附能力(Attachment)、形状(Shape)、成熟个体大小(Size at maturity)、流态偏好(Rheophily)、温度偏好(Thermal Preference)、生活型(Habit)、营养习性(Trophic habit)等10个功能性状的33个等级性状纳入分析(表1)。

功能丰富度(Functional richness)采用Mason等提出的功能范围指数计算^[27];功能均匀度(Functional evenness)参考Villéger等^[28]的研究方法计算;功能离散度(Functional divergence)参考Laliberté等^[29]的研究方法计算;物种丰富度、Shannon指数、均匀度指数参考文献^[30]方法计算。

表1 香溪河流域水生昆虫功能性状及等级

性状	性状等级	性状	性状等级
化性	少于1世代/年		捕食者
	1世代/年		撕食者
	2代或多代/年	生活型	穴居
形状	流线型		攀爬
	非流线型		蔓生
成熟个体大小	小(<9mm)		附着
	中等(9~16mm)		游泳
	大(>16mm)	游泳能力	无
流态偏好	沉积型		弱
	沉积和侵蚀型		强
	侵蚀性	漂移性	极少
温度偏好	喜凉		一般
	广温喜热		较高
营养习性	集食者	吸附能力	无
	滤食者		有
	植食者		二者兼备

1.4 数据处理

功能多样性计算运用的软件为 R3.1.3 和 FDiversity 软件包^[31]。为减小优势分类单元对样本组成过度影响,同时,使密度效应得以体现,生物多样性计算过程中各分类单元丰度均采用 $\log(1+x)$ 转换,其中 x 为各分类单元密度。单因素方差分析(One-wayANOVA)、相关分析(Correlation analysis)、回归分析(Regression analysis)使用 IBMSPSS19.0;分析图制作使用软件 Oringin8.0;表格制作在 EXCEL2007 中完成;样点图用 ArcGIS10.0 制作。

2 结果与分析

2.1 物种多样性时空格局

对香溪河流域水生昆虫物种多样性季节动态进行分析(图 2),结果表明:各样点物种丰富度介于 2~44 之间,春、夏、秋、冬 4 个季节物种丰富度均值分别为 21.9、14.4、19.9、28.1;运用单因素方差分析对 4 个季节间物种丰度进行比较,发现冬季最大,春、秋季次之,夏季最小($P < 0.05$)。同理而论,香浓指数介于 0.38~3.03 之间,均值在冬季最大,为 2.15,春季次之,为 2.14,夏、秋季最小,分别为 1.89、1.86($P < 0.05$)。均匀度指数介于 0.89~1 之间,表现为春、夏季(均值分别为 0.72、0.74)大于秋、冬季(均值分别为 0.65、0.66) ($P < 0.05$)。

对生物多样性空间格局统计分析(图 3),结果表明:物种丰富度均值在九冲河最大,为 26.7;香溪河次之,为 20.4;高岚河、古夫河最小,分别为 13.2、13.6($P < 0.05$)。香浓指数均值在古夫河、高岚河、香溪河、九冲河分别为 1.66、1.67、1.95、2.28,表现为九冲河最大,香溪河次之,高岚河和古夫河最小($P < 0.05$)。均匀度指数均值在古夫河、高岚河、香溪河、九冲河分别为 0.66、0.67、0.68、0.72,方差分析表明其于 4 条河流间差异不显著($P > 0.05$)。

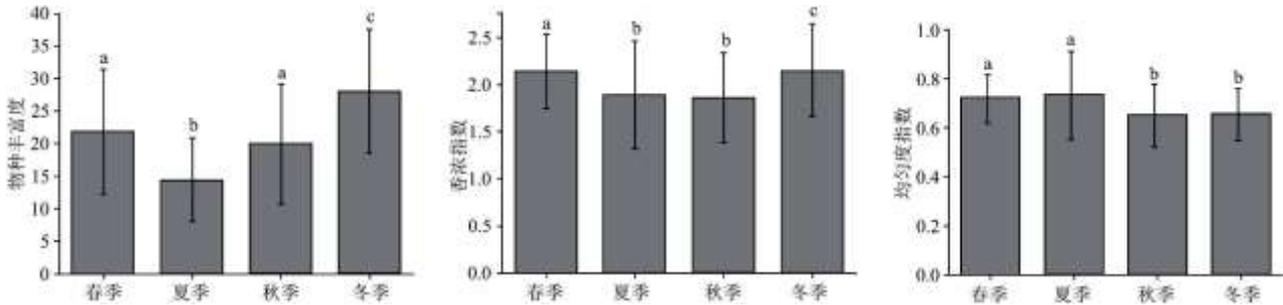


图 2 香溪河流域水生昆虫物种多样性指数季节动态

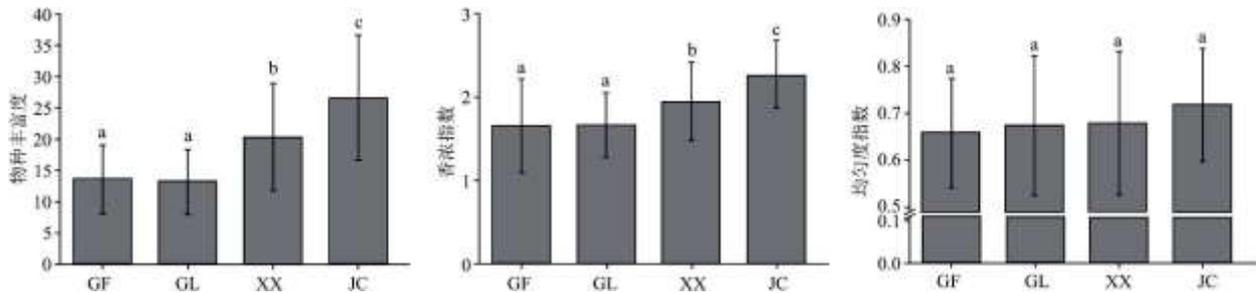


图 3 香溪河流域水生昆虫物种多样性指数空间格局

注: JC:九冲河 Jiuchong River;XX:香溪河 Xiangxi River;GL:高岚河 Gaolan River;GF:古夫河 Gufu River. 下同 The same below.

2.2 功能多样性时空格局

对功能多样性指数季节动态进行比较(图 4),结果表明,功能丰富度指数均值冬季最高,为 0.30,夏季最低,为 0.07;功能均匀度指数均值夏季最高,为 0.53,冬季最低,为 0.50;功能离散度指数均值冬季最高,为 2.55,秋季最低,为 2.46。方差分析表明,功能丰富度指数冬季和夏季差异显著($P < 0.05$),功能均匀度指数、功能离散度指数在 4 个季度间差异均不显著($P > 0.05$)。

对功能多样性指数空间格局进行分析(图 5),功能丰富度指数均值高岚河最高,为 0.105,古夫河最低,为 0.000489;功能均匀度指数均值高岚河最高,为 0.528,古夫河最低,为 0.486;功能离散度指数均值古夫河最高,为 2.153,高岚河最低,为 1.956。方差分析表明,功能多样性指数在 4 条河流间差异均不显著($P > 0.05$)。

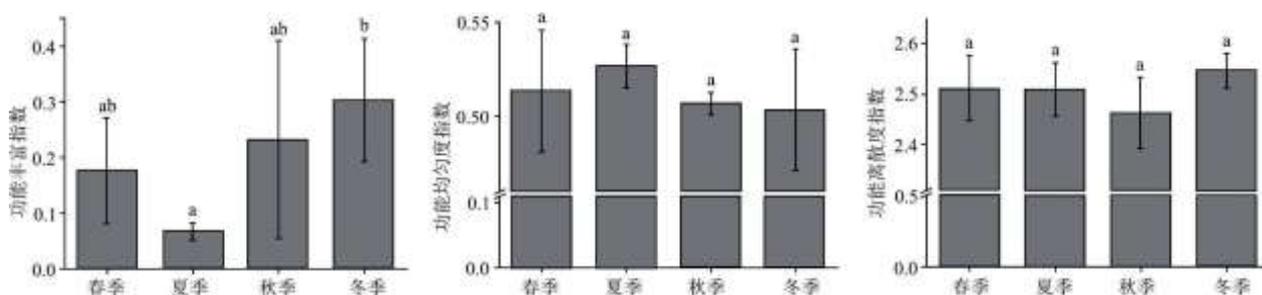


图 4 香溪河流域水生昆虫功能多样性指数季节动态

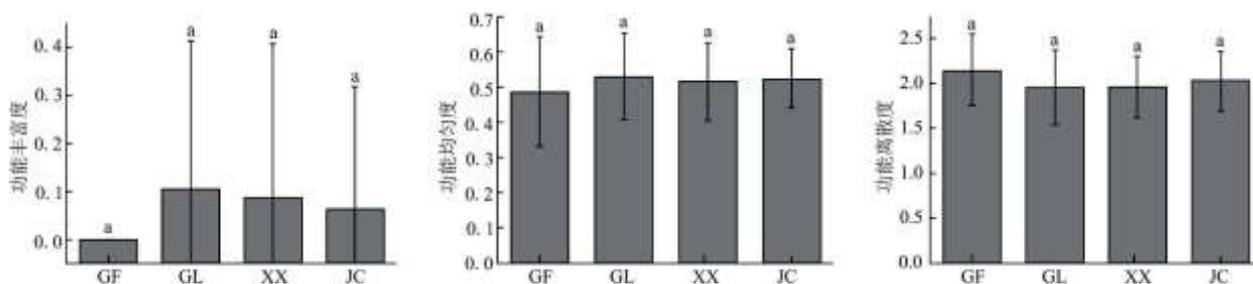


图 5 香溪河流域水生昆虫功能多样性指数空间格局

2.3 功能多样性与物种多样性的关系

采用 Pearson 相关分析法研究功能多样性指数间,以及功能多样性和物种多样性指数间的相关性(表 2),结果表明,3 种功能多样性(功能丰富度、功能均匀度、功能离散度)指数间相关性均不显著($P > 0.05$);功能丰富度指数同物种丰度和 Shannon 指数相关极显著($P < 0.01$);功能均匀度指数同物种丰度和 Shannon 指数相关显著($P < 0.05$);功能离散度指数同物种丰度和 Shannon 指数相关显著($P < 0.05$),同均匀度指数相关极显著($P < 0.01$)。

运用回归分析研究物种多样性对功能多样性的影响(见图 6),结果表明,物种丰度对功能丰富度影响极显著($P < 0.01$),对功能均匀度影响显著($P < 0.05$);Shannon 指数对功能丰富度影响极显著($P < 0.01$),对功能离散度影响显著($P < 0.05$);均匀度指数仅对功能离散度影响显著($P < 0.05$)。

表 2 功能多样性指数和物种多样性指数 Pearson 相关系数

	功能均匀度 F_{Eve}	功能离散度 F_{Dis}	物种丰富度 S	Shannon 指数 H	均匀度指数 E
功能丰富度 F_{Ric}	-.497	.286	.902**	.839**	.401
功能均匀度 F_{Eve}		-.204	-.617*	-.603*	-.156
功能离散度 F_{Dis}			.593*	.664*	.752**
物种丰富度 S				.974**	.630*
Shannon 指数 H					.735**

注：* $P < 0.05$ ，** $P < 0.01$ 。FRic: Functional richness, FEve: Functional evenness, FDis: Functional dispersion, S: Species richness, H: Shannon index, E: Evenness.

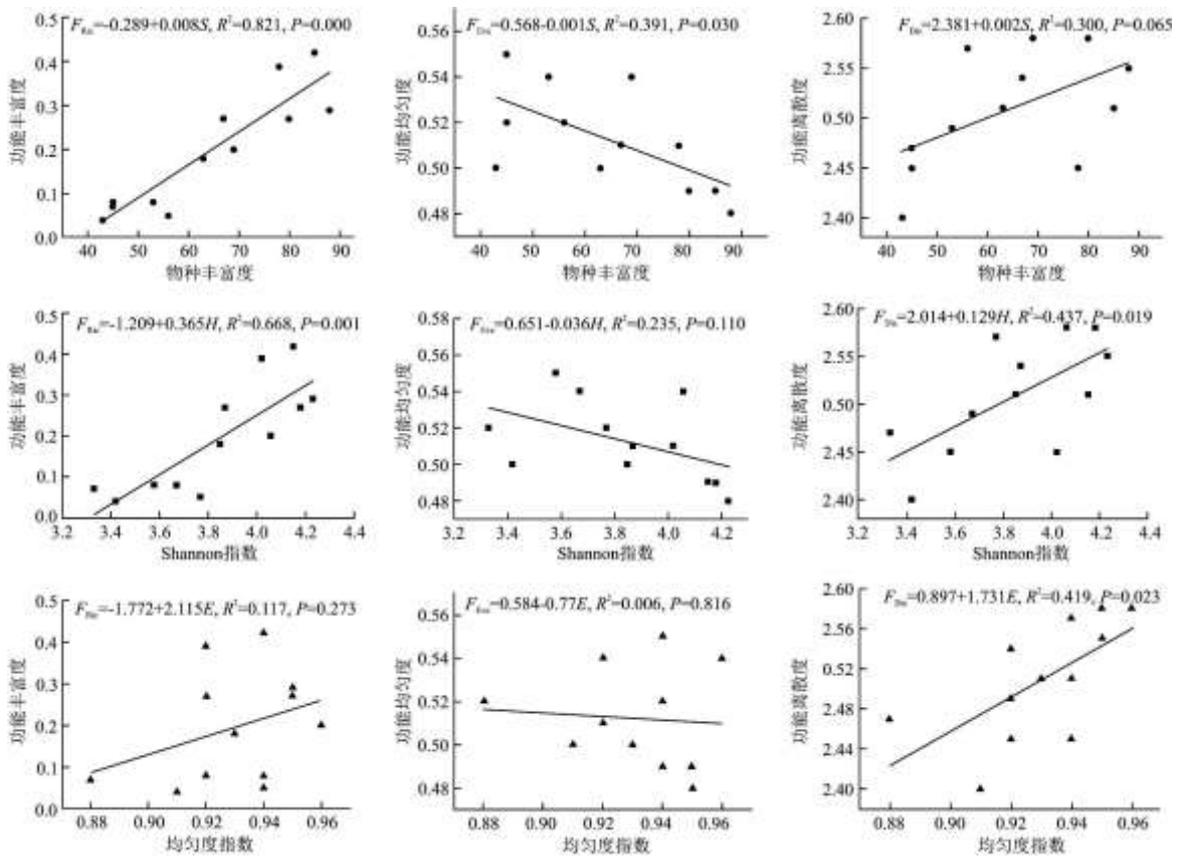


图 6 物种多样性指数同功能多样性指数间回归分析

3 讨论

3.1 物种多样性

水生昆虫物种多样性季节间差异显著，除受生活史本身影响外，季节变化引起的整个流域内环境特征(包括水文特征、水体

理化因子、河岸植被带等)的改变是这一结果出现的主要原因^[30];这些环境因子的变化影响了水生昆虫的生长、繁殖和种群演替^[32, 33],并最终使整个群落的组织发生变化^[34]。本研究中 3 种物种多样性指数均表现为冬季最高,夏季最低,原因在于研究区域夏季降水相对频繁,流域内小水电运行率高、强度大,由此产生的洪水事件对河道干扰的频率和力度相对较大,一些抗干扰能力较弱的类群数量大幅下降,甚至消失;另一方面,一些类群的繁殖活动通常也会避开干扰强度最大的雨季。这和蒋万祥等^[30]对该流域底栖动物的调查结果是一致的。

Wang 等^[19]对香溪河环境参数 3 周年的研究表明,香溪河生境质量总体表现为九冲河最好,香溪河次之,高岚河、古夫河相对较差;蒋万祥等^[30]对香溪河底栖动物 1 周年的调查也得出相同的结论。本研究与上述研究结果基本一致,即九冲河物种多样性指数最高,香溪河次之,高岚河和古夫河最低。九冲河海拔较高,沿岸植被丰富、郁闭度高,人口稀少,且水体主要来自神农架保护区,因此,河流受干扰相对较少,水质较好;同时,保护区生产的营养物质(如树叶碎屑)不间断通过下行效应进入河道,为水生生物的生存奠定了良好的物质基础。高岚河和古夫河样点处于海拔较低的居民聚居区,生活污染物的排放及土地利用格局的变化对河流生态系统影响较大^[35]。同时,高岚河样点上游的硫铁矿,古夫河样点上游的古洞口一级水库发电、泄洪等对水生生物群落均有较大影响^[36, 37]。

3.2 功能多样性

作为生态系统过程、生态系统恢复力、生态系统服务功能的关键驱动力,功能多样性已成为近年来生态学研究的热点和中心论题之一^[38]。随着研究的深入,发现仅用一个指数表征功能多样性的所有层面是不可能完成的^[39];Mason 等提出“功能多样性具有丰富度、均匀度、离散度 3 个层面的变量框架”的理论得到了较为普遍的认可^[27, 39]。功能丰富度取决于物种所占据的功能生态位空间的大小,也取决于功能特征值得范围。低的功能丰富度意味着群落中部分资源未被利用,导致生产力降低;同时,该指数也能表征群落抵抗力水平,因为功能丰富度较低的群落往往存在生态位空间上的空白区域,这些空白区域极易被入侵者利用^[27]。功能丰富度于干扰强度最大的夏季最低,结合上述对生境状况的分析,不难理解夏季频发的洪水事件产生的空白区域是造成这一结果的主要原因。同时,该结果与文献中“栖境过滤”理论较为一致^[40, 41],即干扰强度、频度最大的夏季“滤掉”的不适应性状最多。同物种多样性及理化指标^[33]空间格局不同,功能丰富度在 4 条河流间差异不显著,表明 4 条河流水生昆虫功能性状所占据的生态位空间大小无显著差异。这一结果主要归因于:一是 4 条河流同属一个水系,物种组成差异相对不大;二是采样频率较高、时间较长(一周年的月度调查),进一步加大了各河流物种组成的相似性。功能均匀度是功能性状在生态位空间中分布的均匀程度,主要体现群落内物种对资源的利用效率;低的功能均匀度表示资源利用不均匀,有的过度利用,有的利用较少或尚未利用^[27, 42]。功能均匀度于季节和河流间均无显著差异,主要原因在于功能性状间存在权衡关系(trade-off),即成熟群落中各功能性状是按一定比例存在的^[43]。Westoby^[44]分析了 7 个新热带森林中 2134 种木本植物的 7 种功能性状间的关系,发现同一地点的物种共存其实是多种生活策略(生物性状)的稳定组合,这和本研究的结果是一致的。功能分离度是功能空间中物种簇所处位置的差异性;功能离散度高表示资源异质性高,物种间资源竞争程度较低,资源利用较为充分^[27, 42]。本研究功能离散度指数于季节和河流间差异不显著,主要原因在于研究区域生境异质性较高,小生境多样(如底质组成包括鹅卵石、圆砾石、砂砾、粗沙、粉沙等),物种间资源竞争程度较低;此外,同功能均匀度一样,功能性状间的权衡关系也是这一结果出现的重要原因。

3.3 物种多样性与功能多样性关系

功能丰富度、功能均匀度、功能离散度指数相互独立,不存在显著的相关性,这和国内外相关研究结果是一致的^[27, 42],主要由于它们代表着功能多样性的不同侧面。功能丰富度同物种丰度和 Shannon 指数表现为极显著的正相关,主要因为物种越多,功能性状异质性越强,群落所占据的生态位空间一般也会越大,这和 Zhang 等^[38]的研究结果是一致的。物种丰富度同功能丰富度的相关系数、回归拟合度均高于 Shannon 指数,主要因为 Shannon 指数大小由物种丰度和均匀度共同决定,这也进一步佐证了物种丰富度在本研究中对功能丰富度的贡献。功能均匀度同物种丰度、Shannon 指数显著负相关,主要因为随着物种数的增加,极端性状出现的概率也会增加;功能均匀度是物种性状在功能空间的均匀分布,与物种均匀度无关,因此二者间不存在显著的相关性。功能离散度是功能性状空间中物种簇位置的差异性,该指数的计算实质上就是根据相对丰度计算各物种间的距离,因

此,物种丰富度对其影响不大^[42],这和本研究的结果是一致的。总之,功能多样性指数与物种多样性指数表现出一定的相关性,但通过回归分析发现两种指数间拟合度并不高(功能丰富度同物种丰富度除外)。Devictor 等^[11]基于整个法国鸟类调查数据对物种多样性与功能多样性的关系进行了研究,发现二者间的关系存在一定的不确定性。Zhang 等^[38]认为功能多样性能够提供一些物种多样性不能够提供特殊信息是导致二者间拟合度不高的主要原因。

综上所述,本文对香溪河水系水生昆虫物种多样性和功能多样性的时空格局及关系进行了分析,主要发现:(1)物种多样性(除均匀度指数空间格局外)对时空变化响应敏感,而功能多样性指数中,仅功能丰富指数在不同季节间表现出显著的差异性。(2)代表功能多样性的3个指数间无显著相关性,物种多样性指数与功能多样性指数间拟合度整体不高。基于此,提出一些亟需解答的科学问题:(1)为什么功能丰富度指数在时间序列上表现出同物种多样性相似的变化趋势,而对空间格局变化响应性上不如物种多样性。(2)功能多样性指数在4条河流间差异不显著,是否表明流域内空间尺度效应对功能多样性影响不大。(3)怎样应用功能多样性评价河流生态系统,功能冗余度是否应纳入评价体系。(4)功能多样性和物种多样性指数拟合度不高的原因是什么。深入开展物种—性状—多样性研究是解决一系列生态学问题的有效途径。

参考文献:

[1]WU N, CAI Q, FOHRER, N. Development and evaluation of a diatom-based index of biotic integrity (D-IBI) for rivers impacted by run-of-river dams[J]. *Ecological Indicators*, 2012, 18:108-117.

[2]HE F, JIANG W, TANG T, et al. Assessing impact of acid mine drainage on benthic macroinvertebrates: can functional diversity metrics be used as indicators? [J]. *Journal of Freshwater Ecology*, 2015, 30(4):30(4):513-524.

[3]蒋万祥, 贾兴焕, 唐涛, 等. 底栖动物功能摄食类群对酸性矿山废水的响应研究[J]. *生态学报*, 2016, 36(18):5670-5681.

[4]COLLARES-PEREIRA M J, COWX I G. The role of catchment scale environmental management in freshwater fish conservation[J]. *Fisheries management and Ecology*, 2004, 11(3-4):303-312.

[5]COWX I G. Analysis of threats to freshwater fish conservation: past and present challenges. In: *Conservation of Freshwater Fishes: Options for the Future* (Eds COLLARES-PEREIRA M J, COWX I G, COELHO M M) [M]. Oxford: Fishing News Books, Blackwell Science, 2002, 201-220.

[6]WOODWARD G, PERKINS D M, BROWN L E. Climate change and freshwater ecosystems: impacts across multiple levels of organization[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2010, 365(1549):2093-2106.

[7]LI F, CAI Q, JIANG W, et al. The response of benthic macroinvertebrate communities to climate change: evidence from subtropical mountain streams in Central China[J]. *International Review of Hydrobiology*, 2012, 97(3):200-214.

[8]DUDGEON D, ARTHINGTON A H, GESSNER M O, et al. Freshwater biodiversity: importance, threats, status and conservation challenges[J]. *Biological reviews*, 2006, 81(2):163-182.

[9]HERMOSO V, LINKE S, PRENDA J. Identifying priority sites for the conservation of freshwater fish biodiversity in a Mediterranean basin with a high degree of threatened endemics[J]. *Hydrobiologia*, 2009, 623(1):127-140.

[10]MARGULES C R, PRESSEY R L. Systematic conservation planning[J]. *Nature*, 2000, 405(6783):243-253.

-
- [11]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 letters*, 2010, 13(8): 1030-1040.
- [12]PETCHEY O L, GASTON K J. Functional diversity: back to basics and looking forward[J]. *Ecology letters*, 2006, 9(6): 741-758.
- [13]HEINO J, SCHMERA D, ER ? 昆 S T. A macroecological perspective of trait patterns in stream communities[J]. *Freshwater Biology*, 2013, 58(8): 1539-1555.
- [14]DÍAZ S, LAVOREL S, DE BELLO F, et al. Incorporating plant functional diversity effects in ecosystem service assessments[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2007, 104(52): 20684-20689.
- [15]DEMARS B O, KEMP J L, FRIBERG N, et al. Linking biotopes to invertebrates in rivers: biological traits, taxonomic composition and diversity[J]. *Ecological indicators*, 2012, 23: 301-311.
- [16]TANG T, CAI Q, LIU J. Using epilithic diatom communities to assess ecological condition of Xiangxi River system[J]. *Environment Monitoring and Assessment*. 2006, 112: 347-361.
- [17]蔡庆华, 刘敏, 何水坤, 等. 长江三峡库区气候变化影响评估报告. 北京: 气象出版社, 2010: 83-104.
- [18]LI F Q, CAI Q H, YE L. Developing a benthic index of biological integrity and some relationship to environmental factors in the subtropical Xiangxi River, China[J]. *International Review of Hydrobiology*, 2010, 95(2): 171-189.
- [19]WANG X Z, CAI Q H, YE L, et al. Evaluation of spatial and temporal variation in stream water quality by multivariate statistical techniques: A case study of the Xiangxi River basin, China[J]. *Quaternary International*, 2012, 282: 137-144.
- [20]WU N C, TANG T, ZHOU S C, et al. Changes in benthic algal communities following construction of a run-of-river dam[J]. *Journal of the North American Benthological Society*, 2009, 28: 69-79.
- [21]蒋万祥, 蔡庆华, 唐涛, 等. 香溪河大型底栖无脊椎动物空间分布[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(11): 2443-2448.
- [22]EPLER J H. Identification manual for the larval chironomidae (Diptera) of North and South Carolina[M]. America: EPA Grant#X984170-97. 2001: 1-500.
- [23]MORSE J C, YANG L F, TIAN L X. Aquatic Insects of China Useful for Monitoring Water Quality[M]. Nanjing: Hohai University Press, 1994: 1-568.
- [24]POFF N L, OLDEN J D, VIEIRA N K M, et al. Functional trait niches of North American lotic insect: traits-based ecological applications in light of phylogenetic relationships[J]. *Journal of the North American Benthological Society*, 2006, 25(4): 730-755.

-
- [25]USSEGLIO-POLATERA P,BOURNAUD M,RICHOUX R,et al.Biological and ecological traits of benthic freshwater macroinvertebrates:relationships and definition of groups with similar traits Revised database[J].Freshwater Biology,2000,43(2):175-205.
- [26]TACHET H,RICHOUX P,BOURNAUD M,et al. Invertebres d'Eau Douce:Systematique,Biologie,Ecologie[M].Paris:CNRS editions,2002:1-552.
- [27]MASON N W,MOUILLOT D,LEE W G,et al.Functional richness,functional evenness and functional divergence:the primary components of functional diversity[J].Oikos,2005,111(1):112-118.
- [28]VILLÉGER S,MASON N W H,MOUILLOT D.New multidimensional functional diversity indices for a multifaceted framework in functional ecology[J].Ecology,2008,89(8):2290-2301.
- [29]LALIBERTÉ E,LEGENDRE P.A distance-based framework for measuring functional diversity from multiple traits[J].Ecology,2010,91(1):299-305.
- [30]蒋万祥,贾兴焕,周淑婵,等.香溪河大型底栖动物群落结构季节动态[J].应用生态学报,2009,20(4):923-928.
- [31]CASANOVE F,PLA L,DI RIENZO J A,et al.FDiversity:a software package for the integrated analysis of functional diversity[J].Methods in Ecology and Evolution,2011,2(3):233-237.
- [32]WISE E J.Seasonal distribution and life histories of Ephemeroptera in a north-Umbrian river[J].Freshwater Biology,1980,10(2):101-111.
- [33]VANNOTE R L,SWEENEY B W.Geographic Analysis of thermal equilibria:A conceptual model for evaluating the effect of natural and modified thermal regimes on aquatic insect communities[J].American Naturalist,1980,115(5):667-695.
- [34]BECHE L A,MCELRAVY E P,RESH V H.Long-term seasonal variation in the biological traits of benthic macroinvertebrates in two Mediterranean climate streams in California,USA[J].Freshwater Biology,2006,51(1):56-75.
- [35]李凤清.东亚季风区河流大型底栖无脊椎动物群落特征及其对土地利用变化和气候变化的响应——以香溪河流域为例[D].武汉:中国科学院研究生院博士学位论文,2010:45-54.
- [36]蒋万祥,唐涛,贾兴焕,等.硫铁矿酸性矿山废水对大型底栖动物群落结构的影响[J].生态学报,2008,28(10):4805-4814.
- [37]贾兴焕,蒋万祥,李凤清,等.大型水电站对河流底栖藻类群落的影响[J].应用生态学报,2009,20(7):1731-1738.
- [38]ZHANG J T,XIAO J,LI L.Variation of plant functional diversity along a disturbance gradient in mountain meadows of the Donglingshan reserve,Beijing,China[J].Russian Journal of Ecology,2015,46(2):157-166.
- [39]MOUILLOT D,MASON W N,DUMAY O,et al.Functional regularity:a neglected aspect of functional diversity[J].

Oecologia, 2005, 142(3):353-359.

[40]MENEZES S,BAIRD D J,SOARES A M.Beyond taxonomy:A review of macroinvertebrate trait-based community descriptors as tools for freshwater biomonitoring[J].Journal of Applied Ecology,2010,47(4):711-719.

[41]KEDDY P A.Assembly and response rules:two goals for predictive community ecology[J].Journal of Vegetation Science,1992,3(2):157-164.

[42]薛倩妮, 闫明, 毕润成. 山西五鹿山森林群落木本植物功能多样性[J].生态学报, 2015, 35(21):7023 -7032.

[43]刘晓娟, 马克平. 植物功能性状研究进展. 中国科学: 生命科学[J]. 2015, 45(4):325-339.

[44]WESTOBY M. A leaf-height-seed (LHS) plant ecology strategy scheme[J].Plant and soil,1998,199(2):213-227.