

湖南张家界大鲵栖息地大型无脊椎动物组成及其与环境因子的关系

王崇瑞¹ 梁志强^{1,4} 索纹纹¹ 伍远安^{1,4} 何平³ 伍骥³ 危起伟^{2*} 刘训华¹

(¹湖南省水产科学研究所,长沙 410153; ²中国水产科学研究院长江水产研究所,武汉 430223; ³湖南省大鲵救护中心,湖南张家界 427000; ⁴水产高效健康生产湖南省协同创新中心,湖南常德 415000)

摘要 2013年1月和2014年1月对湖南张家界大鲵国家级自然保护区内5个大鲵栖息地河段进行了大型无脊椎动物采样调查.结果表明:2次采样分别鉴定出大型无脊椎动物73和78个分类单元,隶属5门8纲16目,均以水生昆虫为优势类群,分别占总分类单元总数的90.4%和89.7%;2次采样大型无脊椎动物平均密度分别为1610.4和1671.4 ind·m⁻²,平均生物量分别为11.22和12.34 g·m⁻².2次调查各采样点大型无脊椎动物 Shannon 指数平均值分别为2.45和2.33, Margalef 丰富度指数平均值分别为4.01和3.76, Pielou 均匀度指数平均值分别为0.72和0.69,表明大鲵栖息地河段生境质量有所下降.张家界大鲵栖息地河段大型无脊椎动物丰度-生物量曲线分析表明,骡子塔和芭茅溪采样点河段生境受到中等扰动,七眼泉为受干扰最轻微的河段.基于大型无脊椎动物密度的 Bray-Curtis 相似性系数的 NMDS 分析结果显示,在40%的相似度下,2013年各样点都可以较好地聚在一起,2014年各样点较为离散.对各采样点在 NMDS 第一轴和第二轴上的得分与环境因子的 Spearman 相关性分析表明,河宽、铵态氮、海拔、化学需氧量和五日生化需要量与大型无脊椎动物显著相关.保护区内大鲵栖息地生境整体上仍相对良好,可以满足大鲵的生态需求,但保护区的某些区域人为破坏较重.建议采取严格的管理制度和科学的保护措施来遏制人为破坏,并逐步恢复大鲵栖息地生境.

关键词 大鲵; 大型无脊椎动物; ABC 曲线; 环境因子; 生境评价

Relationship between macroinvertebrate composition and environmental factors in habitats of Chinese giant salamander in Zhangjiajie, Hunan Province, China. WANG Chong-rui¹, LIANG Zhi-qiang^{1,4}, SUO Wen-wen¹, WU Yuan-an^{1,4}, HE Ping³, WU Ji³, WEI Qi-wei^{2*}, LIU Xun-hua¹ (¹Hunan Fisheries Science Institute, Changsha 410153, China; ²Ministry of Agriculture Key Laboratory of Freshwater of Biodiversity Conservation, Yangtze River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Wuhan 430223, China; ³Chinese Giant Salamander Rescue Center of Hunan Province, Zhangjiajie 427000, Hunan, China; ⁴Collaborative Innovation Center for Efficient and Health Production of Fisheries in Hunan Province, Changde 415000, Hunan, China).

Abstract: In January 2013 and 2014, field investigations were conducted at 5 sampling sites located in the Hunan Zhangjiajie Chinese Giant Salamander National Nature Reserve. The results showed that: 1) A total of 73 and 78 taxa were identified in two surveys, respectively, belonging to 16 orders, 8 classes, and 5 phyla. Aquatic insects dominated the macroinvertebrate assemblages, accounting for 90.4% and 89.7% of the total number of taxa in the two surveys, respectively; 2) The average density of macroinvertebrates was 1610.4 ind·m⁻² and 1671.4 ind·m⁻², and the average biomass of macroinvertebrates was 11.22 g·m⁻² and 12.34 g·m⁻² in the two surveys, respectively; 3) The two surveys had, respectively, an average Shannon diversity index (*H*) of 2.45 and 2.33, an average Margalef diversity index (*d_m*) of 4.01 and 3.76, and an average Pielou even-

本文由公益性行业(农业)科研专项(201203086)、湖南省科技厅重点科研计划项目(2013NK2007)和农业部淡水生物多样性保护重点实验室开放课题(LFBC0809)资助. This work was supported by Special Fund for Agro-scientific Research in the Public Interest (201203086), Major Scientific Research Foundation of Science & Technology Department of Hunan Province, China (2013NK2007) and Open Topic of Key Laboratory of Freshwater Biodiversity Conservation, Ministry of Agriculture.

2017-01-12 Received, 2017-06-07 Accepted.

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: weiqw@yfi.ac.cn

ness index (J) of 0.72 and 0.69. By comparing the average biodiversity indices between January 2013 and 2014, the habitat quality of Chinese giant salamander appeared to have declined; 4) The comparison curves of abundance and biomass at each sampling site in the two surveys indicated that the quality of river habitat experienced moderate disturbance at sampling sites S_1 and S_5 , and that only sampling site S_4 was undisturbed; 5) Non-metric multidimensional scaling (NMDS) ordination, based on macroinvertebrate abundance, showed the convergence between all sampling sites was better in 2013 than in 2014 under a similarity of 40%; 6) The association between the NMDS ordination scores (axis 1 and axis 2) and environmental variables were tested by Spearman rank correlation. The results showed that the following environmental variables had explanatory power on macroinvertebrate assemblage: River width, NH_4^+-N , altitude, COD_{Mn} , and BOD_5 . In summary, the relationship between macroinvertebrate composition and environmental factors showed that some streams in the Reserve still supported a relatively favorable habitat, which could meet the habitat requirements for the Chinese giant salamander. However, some regions in this Reserve had been experiencing increased human impacts that made the habitat fragile. Therefore, we are calling for a strict management and protection strategy to be put in place in this region.

Key words: *Andrias davidianus*; macroinvertebrate; ABC curve; environmental factors; habitat evaluation.

大鲵 (*Andrias davidianus*) 隶属于两栖纲有尾目隐鳃鲵科, 是我国特有的濒危有尾两栖动物, 属于国家二级保护野生动物, 曾广泛分布于长江中上游、珠江中上游及汉水上游深山峡谷的溪流中, 具有较高的经济价值和重要的生态价值^[1-2], 目前已被列入《濒危野生动植物种国际贸易公约》附录 I 中^[3]. 自 20 世纪 70 年代起, 由于生境恶化和人为捕捉, 现今仅有少量的野生大鲵生存于人类难以到达的岩洞和地下暗河之中^[4]. 湖南张家界大鲵国家级自然保护区是国务院批准成立的第一个以大鲵为保护对象的国家级自然保护区. 野生大鲵对栖息环境有着特殊的需求^[5]. 由于大鲵的迁徙能力差且对水环境的敏感性极强, 多栖息于有岩石洞穴的山区溪流内. 张家界山区独特的地理环境和生物环境为大鲵的生存提供了天然的庇护所和索饵场. 一旦这些独特生境遭到破坏, 大鲵的生存会受到严重威胁. 因此, 大鲵栖息地生境的完整性和稳定性对保护大鲵十分重要. 近年来, 随着保护区内各类人为活动(主要为公路、铁路、电站和采石挖砂等) 愈加严重, 导致保护区部分水域的环境遭到破坏, 严重影响大鲵的栖息和繁衍. 为了对大鲵进行有效的保护, 亟需对保护区大鲵栖息地的水域生态环境做出准确评价.

大型无脊椎动物是河流生态系统中的重要类群, 具有生活场所固定、易于采集、不同种类对生境的敏感性差异大等优点, 在河流生态系统物质循环和能量代谢中具有不可替代的作用^[6], 也是了解河流生态系统结构和功能及健康状况的关键类群. 作为河流生态系统的重要指示生物, 大型无脊椎动物

类群被广泛应用于水生生态系统健康评价^[7-8]、水质生物学监测^[9]、生境质量评价^[10-12]以及流域气候变化^[13]等研究领域当中. 以往针对湖南张家界大鲵栖息环境的研究主要集中在水体理化性质和物理环境方面^[14-15], 然而传统的理化监测和评价方法往往存在一些缺陷与不足^[16-17]. 本文首次从生物学评价角度评价大鲵栖息地生境状况, 研究了大型无脊椎动物在大鲵栖息河段的群落组成及其与环境之间的关系, 旨在推动湖南张家界大鲵国家级自然保护区的水域生态环境的健康发展, 为完善大鲵保护机制提供理论依据.



图 1 湖南张家界大鲵国家级自然保护区大型无脊椎动物采样点分布

Fig.1 Distribution of sampling sites in Hunan Zhangjiajie Chinese Giant Salamander National Nature Reserve.

S_1 : 骡子塔 Luozita; S_2 : 乌木峪 Wumuyu; S_3 : 上洞街 Shangdongjie; S_4 : 七眼泉 Qianquan; S_5 : 芭茅溪 Bamaoxi. 下同 The same below.

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区概况

湖南张家界大鲵国家级自然保护区位于湖南省西北部的张家界市境内,与黔、鄂、渝三省市交界.保护区属山地季风湿润气候,年平均气温 13.4~16.8℃,年降雨量 1500 mm 左右,境内有澧水发源地和部分沅水支流.保护区内以喀斯特地貌为主,深潭、阴河、泉眼众多,水质清澈,构成了大鲵栖息繁衍的独特生境条件^[13].本文涉及的 5 个大型无脊椎动物采样点均分布在野生大鲵自然繁殖洞穴所在的溪流河段,包括 3 处出苗点和 2 处历史出苗点(图 1).其中,骡子塔(S_1)和乌木峪(S_2)出苗点属沅水流域,上洞街(S_3)出苗点位于澧水南源干流,七眼泉(S_4)和芭茅溪(S_5)出苗点澧水北源干流,采样点详细信息详见表 1.

1.2 样本采集与处理

分别在 2013 年 1 月和 2014 年 1 月采用索伯网(Surber sampler, 40 目纱, 0.09 m²)进行定量采集.依据各样点生境特点,每个采样点采集 3 个重复样.采样时,将索伯网口逆水流方向放置于河床,先仔细清洗网内的大型石块,使得石块上的大型无脊椎动物随着水流进入索伯网内,较大石块挑拣完后,利用铁铲搅动石块下方的底质,搅动深度大于 10 cm.将采集的底质样本放入 40 目分样筛筛洗后,装入 1 L 广口瓶带回实验室,当天在白色解剖盘中进行分检,放入 70% 的乙醇溶液中固定保存,分别进行镜检分类、计数,并用感量为 0.0001 g 的电子天平称量.大型无脊椎动物鉴定工作参考相关文献^[18-22],大部分鉴定到属或种水平.

1.3 水体理化因子测定

水体理化因子测定包括现场测定和水样固定后实验室测定.其中,现场测定指标 6 项:水温和 pH 采用梅特勒-托利多 SevenGo™ pH-SG2 测定,地理坐标

和海拔采用 Garmin60 CSX GPS 测定,流速采用 LSH10-1A 型超声波多普勒流速仪测定,河宽和水深采用卷尺测定;实验室测定指标共有溶解氧(DO)、生化需氧量(BOD₅)、化学需氧量(COD_{Mn})、铵态氮(NH₄⁺-N)、总氮和总磷.水样采集、固定和测定方法参照《水和废水监测分析方法》(第四版)^[23]和《中华人民共和国地表水质量标准》(GB 3838—2002)^[24].

1.4 数据处理

采用 Shannon 多样性指数(H)、Margalef 丰富度指数(d_M)和 Pielou 均匀度指数(J)分析各采样点大型无脊椎动物生物多样性.计算公式如下:

$$H = - \sum P_i \ln P_i$$

$$d_M = (S-1) / \ln N$$

$$J = H / \ln S$$

式中: P_i 为物种 i 在某一采样点所有样本中的相对丰度; S 为采样点大型无脊椎动物总种类数; N 为采样点大型无脊椎动物总个体数.

使用配对样本 T 检验检测 2 次采样之间采样点水体理化指标、物种数、生物量、物种丰度和多样性指数等之间是否存在差异性.配对样本 T 检验使用 SPSS 17.0 软件完成.

基于 Connell 的中度扰动假说^[25]和 Huston 的种类多样性假说^[26]将各采样点大型无脊椎动物群落丰度和生物量的 k -优势曲线绘制在同一张图上进行比较,即构成丰度/生物量比较曲线(ABC 曲线).丰度/生物量比较曲线分析通过英国普利茅斯海洋研究所研发的 PRIMER V6 软件来实现.

为提高大型无脊椎动物群落与环境因子相关性分析的准确性,本文将 2 次采样的大型无脊椎动物数据进行合并分析.首先,采样 PRIMER V6 对各采样点 2 次大型无脊椎动物密度数据进行 Bray-Curtis 相似性系数的非度量多维标度分析(non-metric

表 1 采样点概况

Table 1 General status of sampling sites

编号 Number	坐标 Coordinate		遮蔽度 Shade (%)	底质类型 Sediment type	是否出苗 Spawning or not	水系 River
	E	N				
S_1	110°26'23.748"	28°55'27.432"	60	碎石	是	沅水
S_2	110°19'43.220"	28°57'07.200"	85	砾石+砂	是	沅水
S_3	109°57'25.062"	29°19'07.800"	70	卵石	是	澧水
S_4	109°54'45.360"	29°42'54.936"	90	卵石	否	澧水
S_5	110°02'18.468"	29°39'48.756"	65	卵石+砂	否	澧水

S_1 : 骡子塔 Luozita; S_2 : 乌木峪 Wumuyu; S_3 : 上洞街 Shangdongjie; S_4 : 七眼泉 Qiyanguan; S_5 : 芭茅溪 Bamaoxi. 下同 The same below.

表 2 采样点环境因子
Table 2 Environmental factors of each sampling site

时间 Time	样地号 Sampling No.	海拔 Altitude (m)	河宽 River width (m)	流速 Flow rate (m · s ⁻¹)	水温 Water temperature (°C)	pH	溶解氧 DO (mg · L ⁻¹)	化学耗氧量 COD _{Mn} (mg · L ⁻¹)	生化需氧量 BOD ₅ (mg · L ⁻¹)	铵态氮 NH ₄ ⁺ -N (mg · L ⁻¹)	总氮 TN (mg · L ⁻¹)	总磷 TP (mg · L ⁻¹)
2013-01	S ₁	342	20	0.013	8.6	7.91	11.18	1.71	2.10	0.1124	0.6019	0.0135
	S ₂	466	7	0.128	11.0	7.62	9.68	1.73	1.42	0.0695	1.3052	0.0469
	S ₃	365	50	0.223	14.2	7.46	7.82	2.34	0.83	0.4288	2.9893	0.0465
	S ₄	488	81	0.289	10.2	7.81	8.33	1.47	0.15	0.8225	1.1333	0.0071
	S ₅	344	55	0.015	11.6	8.00	9.83	1.47	0.37	0.0833	0.7022	0.0086
2014-01	S ₁	342	20	0.012	13.0	7.47	9.79	1.92	3.53	0.2224	1.6762	0.062
	S ₂	466	7	0.167	13.6	7.74	9.80	1.53	2.51	0.0641	1.3641	0.0374
	S ₃	365	50	0.231	14.9	8.19	9.54	1.44	0.63	0.2982	1.5072	0.0389
	S ₄	488	81	0.322	12.4	7.97	10.85	1.92	2.82	0.4663	0.8484	0.0152
	S ₅	344	55	0.021	11.7	7.82	11.18	0.18	1.88	0.0848	0.7144	0.1090
<i>P</i>	-	-	-	0.099	0.057	0.711	0.275	0.352	0.048	0.394	0.777	0.252

multidimensional scaling ,NMDS) ,然后 ,对各采样点在 NMDS 第一轴和第二轴上的得分与环境因子进行 Spearman 相关性分析.Spearman 相关性分析使用 SPSS 17.0 软件完成.

2 结果与分析

2.1 采样点水体的理化特征

2013 年 1 月和 2014 年 1 月 2 次调查各采样点的水体理化参数见表 2.依据《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) [24] ,除了总氮(TN) 在各样点略超过 II 类标准限值外 ,其余指标均优于 II 类.各采样点的瞬时流速范围的 0.012~0.322 m · s⁻¹ ,均属于中等流速.各采样点 pH 介于 7.46~8.19 之间.配对样本 T 检验分析结果显示 ,2013 年 1 月和 2014 年 1 月水体理化参数除 BOD₅(*P*<0.05) 外 ,其他参数间均无显著性差异(*P*>0.05) .

2.2 大型无脊椎动物的群落结构变化

2013 年 1 月和 2014 年 1 月 2 次调查采样 ,分别鉴定出大型无脊椎动物 73 和 78 个分类单元 ,均以水生昆虫为绝对优势类群 ,分别占总分类单元数的 90.4%和 89.7% ,其他种类包括线形动物、扁形动物、软体动物及甲壳动物等的比例均较低(图 2) .

2 次调查采样的各采样点物种数有较大的差异 ,平均物种数分别为 30.4 和 28.8 种.2013 年 1 月上洞街(S₃) 采样点物种数最多 ,为 39 种 ,2013 年 1 月乌木峪(S₂) 和 2014 年 1 月上洞街采样点物种数最少 ,为 22 种(图 3) .

2013 年 1 月各采样点大型无脊椎动物丰度平均为 1610.4 ind · m⁻² ,骡子塔(S₁) 最高 ,为 2455.6

ind · m⁻² ,乌木峪最低 ,为 872.2 ind · m⁻²; 2014 年 1 月各采样点大型无脊椎动物丰度平均为 1671.4 ind · m⁻² ,乌木峪最高 ,为 2350 ind · m⁻² ,上洞街最低 ,为 1045.8 ind · m⁻²(图 4) .各采样点大型无脊椎动物总丰度与优势类群丰度相关.2013 年 1 月各采样点大型无脊椎动物丰度变化受到四节蜉(*Baetis* sp.) 丰度的影响 ,其中骡子塔采样点四节蜉丰度达到 1077.8 ind · m⁻² ,而乌木峪采样点四节蜉丰度仅为 88.9 ind · m⁻² ,为所有采样点最低; 2014 年 1 月

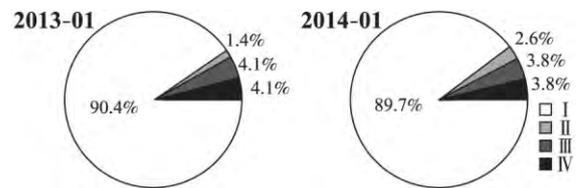


图 2 各采样点大型无脊椎动物的组成
Fig.2 Species composition of macroinvertebrate in all sampling sites.

I: 水生昆虫 Aquatic insects; II: 环节动物 Annelid; III: 软体动物 Mollusks; IV: 其他 Others.

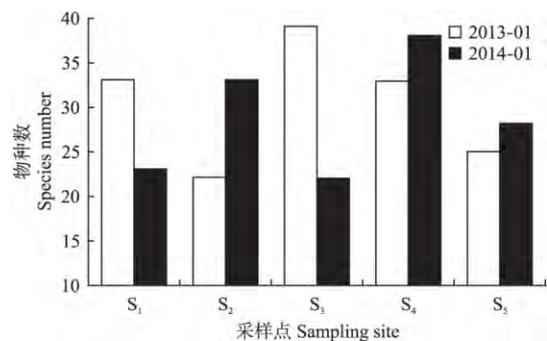


图 3 各采样点大型无脊椎动物的物种数
Fig.3 Number of species of macroinvertebrate in each sampling site.

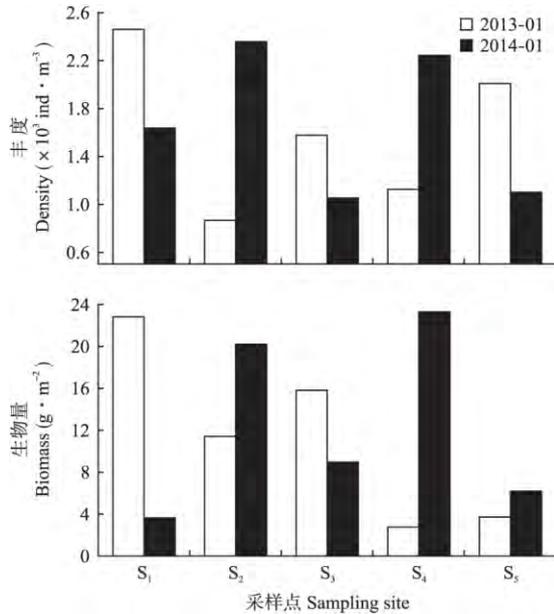


图4 各采样点大型无脊椎动物的丰度和生物量
Fig.4 Abundance and biomasses of macroinvertebrate in each sampling site.

乌木峪大型无脊椎动物优势种为四节蜉和高翔蜉 (*Epeorus* sp.), 其丰度分别为 494.4 和 $527.8 \text{ ind} \cdot \text{m}^{-2}$, 上洞街仅直突摇蚊属一种 (*Orthocladius* sp1.) 为绝对优势种, 丰度为 $516.7 \text{ ind} \cdot \text{m}^{-2}$.

2013年1月各采样点大型无脊椎动物平均生物量为 $11.22 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 骡子塔最高, 为 $22.60 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 七眼泉(S_4) 最低, 为 $2.80 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$; 2014年1月各采样点大型无脊椎动物平均生物量为 $12.34 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 七眼泉最高, 为 $23.11 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 骡子塔最低, 为 $3.56 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ (图4). 各采样点大型无脊椎动物生物量与优势类群和个体大小相关. 2013年1月, 骡子塔四节蜉生物量为 $6.85 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 其次为纹石蛾 (*Hydropsyche* sp.) 和角石蛾 (*Stenopsyche* sp.), 生物量分别为 4.94 和 $2.42 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 而七眼泉生物量最大的角石蛾属仅为 $0.77 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$; 2014年1月, 七眼泉角石蛾生物量为 $13.25 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 为所有采样点最高.

配对 T 检验分析结果显示, 2013年1月和2014年1月各采样点的物种数、丰度和生物量等参数之

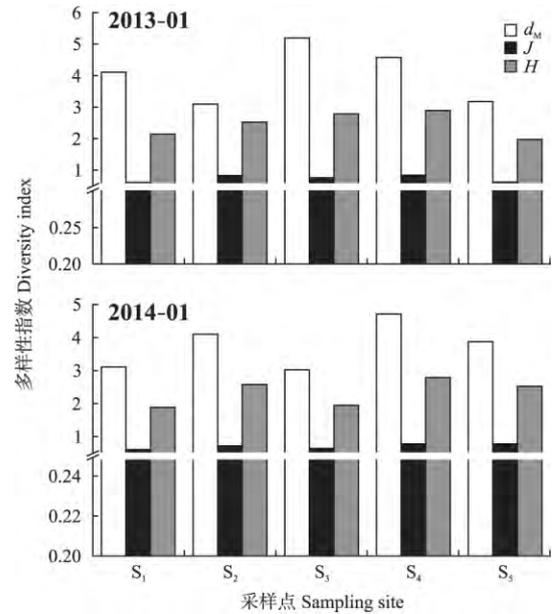


图5 各采样点大型无脊椎动物群落多样性指数
Fig.5 Diversity indices of macroinvertebrate community in each sampling site.

间无显著性差异 (表3)。

2.3 大型无脊椎动物多样性和均匀度指数

各采样点大型无脊椎动物群落多样性指数如图5所示. 2013年1月, Shannon 指数(H) 范围为 $1.96 \sim 2.89$, 平均值 2.45 , 七眼泉最高, 芭茅溪最低; Margalef 指数(d_M) 范围为 $3.10 \sim 5.16$, 平均值 4.01 , 上洞街最高, 乌木峪最低; Pielou 指数(J) 范围为 $0.60 \sim 0.83$, 平均值 0.72 , 七眼泉最高, 芭茅溪最低. 除乌木峪采样点 Margalef 指数外, 其他采样点大型无脊椎动物多样性指数变化趋势基本一致. 2014年1月, Shannon 指数范围为 $1.88 \sim 2.78$, 平均值 2.33 ; Margalef 指数范围为 $3.02 \sim 4.70$, 平均值 3.76 ; Pielou 指数范围为 $0.59 \sim 0.77$, 平均值 0.69 . 七眼泉3种多样性指数均最高, 骡子塔 Shannon 指数和 Pielou 指数最低, 上洞街 Margalef 指数最低.

配对 T 检验分析发现, 2013年1月和2014年1月各采样点 Shannon 指数、Margalef 指数和 Pielou 均匀度指数之间无显著差异 ($P > 0.05$) (表3)。

表3 2013年1月和2014年1月各采样点大型无脊椎动物物种丰富度、丰度、生物量、多样性指数和均匀度指数比较
Table 3 Comparison of richness, abundance, biomass, diversity index and evenness index between January 2013 and January 2014 in each sampling site

时间 Time	物种数 Species	丰度 Abundance ($\text{ind} \cdot \text{m}^{-2}$)	生物量 Biomass ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)	Shannon 指数 H	Margalef 指数 d_M	Pielou 指数 J
2013-01	30.4 ± 6.5	1610.4 ± 641.9	11.22 ± 8.32	2.45 ± 0.40	4.01 ± 0.89	0.72 ± 0.11
2014-01	27.8 ± 5.6	1671.4 ± 610.4	12.34 ± 8.73	2.33 ± 0.40	3.76 ± 0.70	0.69 ± 0.08
P	0.615	0.910	0.875	0.632	0.688	0.591

2.4 大型无脊椎动物的丰度/生物量曲线

各采样点大型无脊椎动物丰度/生物量曲线(ABC曲线)如图6所示.2013年1月和2014年1月骡子塔及2013年1月芭茅溪(S_5)采样点均受到中等程度的干扰,2013年1月乌木峪和七眼泉采样点受到中等程度的干扰,2014年1月芭茅溪采样点与此相似.2013年1月和2014年1月上洞街、2014年乌木峪和七眼泉采样点大型无脊椎动物群落未受

到明显的干扰.

2.5 大型无脊椎动物群落与环境因子的关系

基于5个采样点2次采样大型无脊椎动物密度的Bray-Curtis相似性系数的非度量多维标度分析(NMDS)显示,在40%的相似度下,2013年各样点较好地聚在一起,2014年各样点较为离散(图7).

对各样点在NMDS第一轴和第二轴上的得分与环境因子的Spearman相关性分析显示,河宽和铵

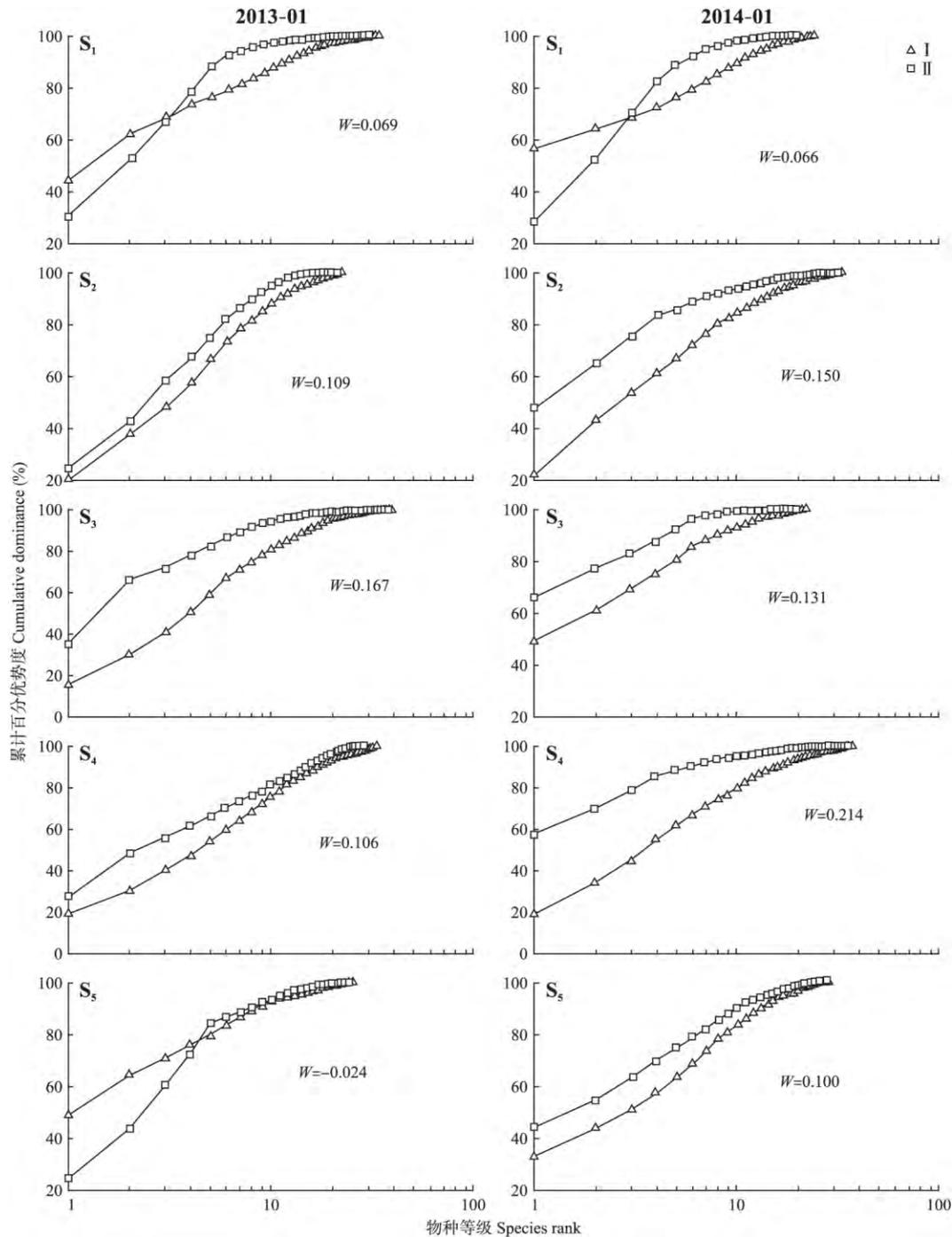


图6 大型无脊椎动物的丰度(I)/生物量(II)曲线

Fig.6 Abundance (I) /biomass (II) curves of macroinvertebrate in each sampling site.

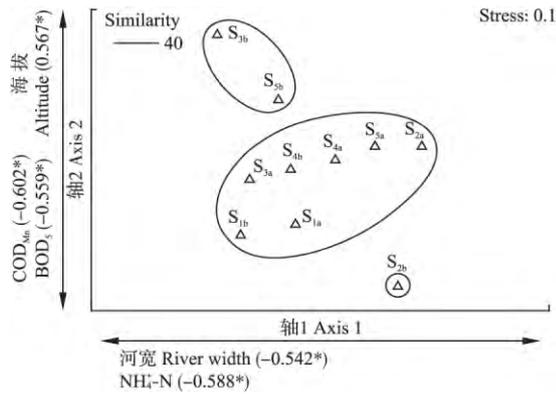


图 7 各采样点大型无脊椎动物 NMDS 图

Fig.7 Non-metric multidimensional scaling (NMDS) plot of macroinvertebrate community in each sampling site.

a) 2013-01; b) 2014-01. 图中为与第一轴和第二轴显著相关的环境因子 Significantly correlated environmental factors with axis 1 and 2 were given. * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$.

态氮浓度与第一轴呈显著负相关; 海拔与第二轴显著正相关; 化学需氧量和五日生物需要量与第二轴呈显著负相关(图 7)。

3 讨 论

大鲵是湖南张家界生物多样性的代表物种之一, 具有较高的生态价值、经济价值和美学价值。本文选择 Shannon 指数、Margalef 指数和 Pielou 指数 3 个 α 生物多样性指数来研究大鲵栖息地河段大型无脊椎动物的群落特征。结果显示, 2014 年 1 月各采样点河段生境质量较 2013 年 1 月都有所下降, 在 5 个采样点中, 受干扰最小的为七眼泉采样点, 变化最大的为上洞街采样点, 而骡子塔采样点所受干扰一直较重。分析认为, 七眼泉位于澧水北源上游源头区, 居民数量少, 并且处于八大公山自然保护区范围内, 受人为干扰程度最小; 而上洞街采样点位于村庄附近, 2014 年某些河段区域养殖畜禽类, 导致 2014 年该河段生境受干扰严重; 骡子塔不仅位于居民集中区也是采石集中区, 所受干扰程度最高。

配对样本 T 检验结果表明, 2013 和 2014 年湖南张家界 5 个大鲵典型栖息地河流生境状况总体稳定, 水质条件和大型无脊椎动物群落构成并无显著性差异, 表明湖南张家界大鲵栖息地生境在受到人为干扰的情况下, 其整体生境质量状况暂时未受到重大影响, 但随着时间的推移和人为干扰的加剧, 保护区内大鲵生境的恶化趋于加重。因此, 应对大鲵栖息地生境开展连续性监测评价, 并开展大鲵栖息地保护和采取生境恢复措施。

Warwick^[27] 和 Adams^[28] 提出的丰度/生物量比

较曲线(ABC 曲线) 广泛用于监测环境污染对大型无脊椎动物群落的扰动。对于未受扰动的群落, 生物量往往是一个或几个体形较大但数量较少的物种占优势, 而数量占优势的是个体相对较小的物种, 其丰度随机性强。在这种情况下, 生物量的 k -优势度曲线始终位于丰度曲线之上; 当群落受到中等程度的扰动时, 个体较大的种的优势度被削弱, 丰度和生物量优势度的不均等程度减弱, 丰度和生物量曲线接近重合, 或出现部分交叉; 当环境被严重扰动时, 群落逐渐由一种或几种个体较小的种类占优势, 则丰度曲线位于生物量曲线之上^[29]。2013 年 1 月至 2014 年 1 月期间, 5 个采样点中, 乌木峪、上洞街和七眼泉 3 个采样点的大型无脊椎动物群落生物量曲线均在丰度曲线上方, 表明这 3 处河段环境条件相对稳定, 大型无脊椎动物群落受干扰程度较低, 骡子塔和芭茅溪采样河段大型无脊椎动物群落呈现出了不同程度的干扰。基于 ABC 曲线对大型无脊椎动物群落受干扰程度的分析与生物多样性指数分析结果总体相似, 骡子塔和芭茅溪河段的环境条件最不稳定, 受干扰程度最高, 可能也是导致该河段野生大鲵资源逐步减少的原因。ABC 曲线方法早期常常应用于监测海洋污染状况, 因其具有原理简单、统计方便、无参照点对比和结果易于分析等优点, 应用范围越来越广, 并成为了一种利用底栖动物进行污染监测的常规方法^[29]。但在实际应用中也会受到环境条件、大个体物种、非多毛类小个体物种等对评估监测局限性的影响^[30]。本研究中, 大鲵栖息地水环境相对较好, 大型无脊椎动物敏感种类较多, 大型物种主要有蜻蜓目、广翅目和软体动物, 小型物种以蜉蝣目、摇蚊幼虫和毛翅目等耐污值较低种类为主, 可能对使用 ABC 曲线法对大鲵栖息地环境受干扰状况进行监测有影响, 但与生物多样性指数法的分析结果总体是一致的。

NMDS 分析表明, 湖南张家界大鲵栖息地河段大型无脊椎动物群落有明显的时空差异性, 第一轴和第二轴上的得分与环境因子的 Spearman 相关性分析表明, 海拔、 COD_{Mn} 、 BOD_5 、河宽和铵态氮等环境因子对湖南张家界大鲵栖息地河段大型无脊椎动物群落的空间分布有显著影响。其中, 海拔与大型无脊椎动物群落分布呈显著正相关, COD_{Mn} 、 BOD_5 、河宽和铵态氮则呈负相关。海拔是最重要的影响因素, 是因为海拔较高的河段人为干扰较少, 森林覆盖率高, 水质状况优良; 而随着海拔降低, 土地利用增加, 人口愈加集中, 对河流生态的影响愈加严重,

并影响了底质特征、河岸形态和水质状况,最终影响到大型无脊椎动物的多样性^[30-33]。

基于 Sorensen 群落相似性系数法^[34],对 2013 和 2014 年湖南张家界大鲵栖息地水域 5 个采样点大型无脊椎动物群落相似性进行分析研究,七眼泉大型无脊椎动物群落相似度最高(0.559),上洞街采样点群落相似性最低(0.367),表明七眼泉大型无脊椎动物群落受干扰程度最低,而上洞街受干扰最严重。2014 年上洞街大型无脊椎动物物种数较 2013 年减少了 18 种,蜉蝣属(*Ephemera* sp.)、扁蜉属(*Heptagenia* sp.)、等翅蜉属(*Isonychia* sp.)、黑石蝇属(*Capnia* sp.)、纹石蛾属(*Hydropsyche* sp.) 等耐污值低的物种均消失,取而代之的是耐污值较高的摇蚊属(*Chironomus* sp.)、直突摇蚊属(*Orthocladius* sp.) 等。通过对比大鲵栖息地河段 2013 和 2014 年大型无脊椎动物群落组成和差异可以看出,该区域河流生境属较脆弱类型,易受到各因素的影响。

本文利用大型无脊椎动物群落特征对湖南张家界大鲵栖息地河段的健康状况进行了评价。湖南张家界大鲵栖息地河段生境总体较好,但部分河段生境受到了干扰。因此,为了更加全面地对湖南张家界大鲵国家级自然保护区生态环境进行监测和制定有效的保护对策,建议将大型无脊椎动物监测和评价纳入到今后的管理和保护工作中。

致谢 感谢中国科学院水生生物研究所蒋小明博士、张家界市永定区畜牧水产局杨晨生先生及桑植县畜牧水产局胡维军先生等对本工作的帮助和支持。

参考文献

- [1] Zhao E-M (赵尔宓). China Red Data Book of Endangered Animals: Amphibian and Reptile. Beijing: Science Press, 1998 (in Chinese)
- [2] Fei L (费梁), Hu S-Q (胡淑琴), Ye C-Y (叶昌媛), et al. China Animal Annals Amphibious. Beijing: Science Press, 2006 (in Chinese)
- [3] The Endangered Species Import & Export Management Office of China (中华人民共和国濒危物种进出口管理办公室), The Endangered Species Scientific Commission of China (中华人民共和国濒危物种科学委员会). Convention on International Trade in Endangered Species of Wild Fauna and Flora (Appendices I). Beijing: The Endangered Species Import & Export Management Office of China, The Endangered Species Scientific Commission of China, 2013 (in Chinese)
- [4] Zhang K-J (章克家), Wang X-M (王小明), Wu W (吴魏), et al. Advances in conservation biology of Chinese giant salamander. *Biodiversity Science* (生物多样性), 2002, 10(3): 291-297 (in Chinese)
- [5] Luo Q-H (罗庆华). Habitat characteristic of *Andrias davidianus* in Zhangjiajie of China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2009, 20(7): 1723-1730 (in Chinese)
- [6] Wallace JB, Webster JR. The role of macroinvertebrate in stream ecosystem function. *Annual Review of Entomology*, 1996, 41: 115-139
- [7] Bae YJ, Kil HK, Bae KS. Benthic macroinvertebrates for uses in stream biomonitoring and restoration. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2005, 9: 55-63
- [8] Bonada N, Prat N, Resh VH, et al. Developments in aquatic insect biomonitoring: A comparative analysis of recent approaches. *Annual Review of Entomology*, 2006, 51: 495-523
- [9] Morse JC, Yang LF, Tian LX. Aquatic Insects of China Useful for Monitoring Water Quality. Nanjing: Hohai University Press, 1994
- [10] Gao X (高欣), Niu C-J (牛翠娟), Hu Z-J (胡忠军). Macrobenthos community structure and its relations with environmental factors in Taihu River basin. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2011, 22(12): 3329-3336 (in Chinese)
- [11] Yin X-W (殷旭旺), Xu Z-X (徐宗学), Gao X (高欣), et al. Macrobenthos community structure and its relationships with environmental factors in Weihe River basin, Northwest China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2013, 24(1): 218-226 (in Chinese)
- [12] Zhang Y-W (张跃伟), Yuan X-Z (袁兴中), Liu H (刘红), et al. Distribution and species composition of hyporheic macroinvertebrates in a mountain stream. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2015, 26(9): 2835-2842 (in Chinese)
- [13] Chen C-D (陈昌笃), Li D-H (李迪华). On the biodiversity and the ecological integrity of Wulingyuan District, Hunan Province. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2003, 23(11): 2414-2423 (in Chinese)
- [14] Luo Q-H (罗庆华), Liu Q-B (刘清波), Liu Y (刘英), et al. Preliminary study on ecological conditions in breeding den of Chinese Giant Salamander. *Chinese Journal of Zoology* (动物学杂志), 2007, 42(3): 114-119 (in Chinese)
- [15] Tao F-Y (陶峰勇), Wang X-M (王小明), Zhang K-J (章克家). Preliminary study on characters of habitat dens and river types of Chinese giant salamander. *Sichuan Journal of Zoology* (四川动物), 2004, 23(2): 83-87 (in Chinese)
- [16] Jonnalagadda SB, Mhere G. Water quality of the Odzi River in the eastern highlands of Zimbabwe. *Water Research*, 2001, 35: 2371-2376
- [17] Duan X-H (段学花), Wang Z-Y (王兆印), Xu M-Z (徐梦珍). Benthic Macroinvertebrate and Application in the Assessment of Stream Ecology. Beijing: Tsinghua University Press, 2010 (in Chinese)
- [18] Epler JH. Identification Manual for the Larval Chironomidae (Diptera) of North and South Carolina. Raleigh, NC: North Carolina Department of Environment and

- Natural Resources Division of Water Quality ,2001
- [19] Zhou C-F (周长发), Gui H (归鸿), Zhou K-Y (周开亚). Larval key to families of Ephemeroptera from China (Insecta). *Journal of Nanjing Normal University (Natural Science)* (南京师范大学学报:自然科学版), 2003, **26**(2): 65-68 (in Chinese)
- [20] Tian L-X (田立新), Yang L-F (杨莲芳), Li Y-W (李佑文). Economic Insect Fauna of China: Trichoptera (1). Beijing: Science Press, 1996 (in Chinese)
- [21] Zhou C-F (周长发). A Taxonomic Study on Mayflies from Mainland China. PhD Thesis. Tianjin: Nankai University, 2002 (in Chinese)
- [22] Wang Z-J (王志杰). Contribution to the Taxonomy of Nemouridae from China (Placoptera: Nemourodea). Master Thesis. Yangzhou: Yangzhou University, 2007 (in Chinese)
- [23] State Environmental Protection Administration (国家环保总局). Determination Methods for Examination of Water and Wastewater. 4th Ed. Beijing: Chinese Environmental Science Press, 2002 (in Chinese)
- [24] State Environmental Protection Administration (国家环保总局), General Administration of Quality Supervision Inspection and Quarantine (国家质量监督检验检疫总局). Environmental Quality Standards for Surface Water (GB 3838-2002). Beijing: China Standards Press, 2002 (in Chinese)
- [25] Connell JH. Diversity in tropical rain forests and coral reefs. *Science*, 1978, **199**: 1302-1310
- [26] Huston M. A general hypothesis of species diversity. *American Naturalist*, 1979, **113**: 81-101
- [27] Warwick RM. A new method for detecting pollution effects on marine macrobenthic communities. *Marine Biology*, 1986, **92**: 557-562
- [28] Adams SM. Biological indicators of aquatic ecosystem stress. *Aquaculture International*, 2003, **11**: 318-319
- [29] Tian S-Y (田胜艳), Yu Z-S (于子山), Liu X-S (刘晓收), et al. Abundance/biomass curves for detecting pollution effects on marine macrobenthic communities. *Marine Science Bulletin (海洋通报)*, 2006, **25**(1): 92-96 (in Chinese)
- [30] Warwick RM, Clarke KR. A comparison of some methods for analyzing changes in benthic community structure. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 1991, **71**: 225-244
- [31] Qu F-Y (曲方圆), Yu Z-S (于子山), Sui J-X (隋吉星), et al. The limitations of abundance biomass comparison method. *Marine Science (海洋科学)*, 2009, **33**(6): 118-121 (in Chinese)
- [32] Lenat DR, Penrose DL. History of the EPT taxa richness metric. *Bulletin of the North American Benthological Society*, 1996, **13**: 305-306
- [33] Jiang X-M (蒋小明). Biodiversity Patterns of Macroinvertebrates in Several River Ecosystems across the Midwest of China and Their Applications in Environmental Assessment. PhD Thesis. Wuhan: Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, 2012 (in Chinese)
- [34] Zhang J-L (张建利), Shen R (沈蕊), Shi W (施雯), et al. The structure and similarity characteristic of the grassland community in hot-dry valley upper middle and lower of Jinsha River. *Ecology and Environmental Sciences (生态环境学报)*, 2009, **19**(6): 1272-1277 (in Chinese)

作者简介 王崇瑞,男,1984年生,助理研究员.主要从事淡水生态学和渔业资源研究. E-mail: kevingking99@163.com
责任编辑 肖红

王崇瑞,梁志强,索纹纹,等. 湖南张家界大鲵栖息地大型无脊椎动物组成及其与环境因子的关系. 应用生态学报, 2017, **28**(9): 3032-3040

Wang C-R, Liang Z-Q, Suo W-W, et al. Relationship between macroinvertebrate composition and environmental factors in habitats of Chinese giant salamander in Zhangjiajie, Hunan Province, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, **28**(9): 3032-3040 (in Chinese)