

江湖阻隔背景下东部平原湖泊鱼类功能特征及多样性变化*

郑鹏¹, 蒋小明^{1**}, 曹亮², 王俊¹, 姜卓群³

(1: 西安理工大学西北旱区生态水利国家重点实验室, 西安 710048)

(2: 中国科学院水生生物研究所, 武汉 430072)

(3: 宝鸡市水务工作站, 水旱灾害防治监测中心, 宝鸡 721000)

摘要: 东部平原湖泊区是我国淡水湖泊最集中的地区, 分布着我国的五大淡水湖等诸多湖泊。然而, 江湖阻隔对该区域湖泊的生物多样性造成严重威胁。本文选取东部平原的9个湖泊, 对江湖阻隔前后鱼类功能性状(3组分类性状和6个连续性状)和功能多样性指数的变化规律开展了研究。结果表明, 9个湖泊的鱼类总物种数由江湖阻隔前的140种减少为江湖阻隔后的100种, 平均物种数由79.6种减少到52.1种(减少34.4%)。江湖阻隔后鱼类群落的功能性状和功能多样性指数发生了显著变化, 洄游性鱼类(包括河海洄游和江湖洄游)物种占比(由39.7%降至32.6%)和鱼食性物种占比(由31.1%降至25.2%)显著下降, 而非洄游性物种占比(由60.3%升至67.5%)和浮游生物食性物种占比(由13.5%升至15.5%)显著上升。连续性性状中, 平均营养级(由3.14降至3.10)显著下降, 平均生长速率(由 0.57 a^{-1} 升至 0.65 a^{-1})显著上升。阻隔后的物种数(SR)、功能丰富度指数、功能离散度指数和功能分散指数显著低于阻隔前。本研究表明江湖阻隔后鱼类群落不仅物种丰富度下降, 且功能性状趋向同质化(或单一化)发展, 致使功能多样性下降。研究结果可为东部平原湖泊的渔业资源管理及湖区生态修复和保护提供重要的理论依据。

关键词: 东部平原湖泊; 江湖阻隔; 鱼类群落; 功能性状; 功能多样性指数

Long-term changes in the functional trait composition and diversity of fish assemblages in eastern plain lakes under the regime of river-lake connectivity loss*

Zheng Peng¹, Jiang Xiaoming^{1**}, Cao Liang², Wang Jun¹ & Jiang Zhuoqun³

(1: State Key Laboratory of Ecological Water Conservancy, Northwest Arid Region, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, P.R.China)

(2: Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, P.R.China)

(3: Monitoring Center of Flood and Drought Disaster Prevention, Baoji River Affair Station, Baoji 721000, P.R.China)

Abstract: The eastern plain lake area is the most concentrated area of freshwater lakes in China, supporting numerous lakes, including China's five largest freshwater lakes. However, human activities such as disconnecting lakes from the mainstream are seriously threatening the aquatic biodiversity in the region. In this study, 9 lakes in the eastern plain were selected to study the temporal (before and after the river-lake disconnection) changes in functional traits (3 groups of categorical traits and 6 continuous traits) and functional diversity index of fish assemblages. The results showed that the total number of fish species across the 9 lakes decreased from 140 species to 100 species through time, and the average species richness per lake decreased from 79.6 to 52.1 (accounting for 34.4% of historical species). The functional trait composition and diversity indices of fish communities changed significantly before and after the river-lake disconnection. The percentages of migratory (from 39.7% to 32.6%) and piscivorous species (from 31.1% to 25.2%) significantly decreased, while the percentages of non-migratory (from 60.3% to 67.5%) and planktivorous species (from 13.5% to 15.5%) significantly increased. For the continuous traits, the average trophic level (from 3.14 to 3.10) significantly decreased but the average growth rate (from 0.57 a^{-1} to 0.65 a^{-1}) significantly increased. Species richness, *FRic*, *FDiv* and *FDis* all significantly decreased. These results indicated that, after river-lake disconnection, fish assemblages experienced not only a decrease

* 2021-05-06 收稿; 2021-06-21 收修改稿。

国家自然科学基金项目(51709225)和陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2018JQ5121)联合资助。

** 通信作者; E-mail: jiangxm@xaut.edu.cn.

in species richness but also homogenization (or simplification) trend of functional trait composition and decline in functional diversity. Our study provided scientific background for the ecological protection and restoration of eastern plain lakes in China.

Keywords: Eastern plain lakes; river-lake disconnection; fish communities; functional traits; functional diversity index

东部平原湖泊区是我国五大湖泊区之一,也是我国淡水湖泊最集中的地区,主要指分布在长江、淮河中下游、黄河与海河下游及大运河沿岸的湖泊。区域内面积 1 km² 以上的湖泊有 696 个,中国五大淡水湖(鄱阳湖、洞庭湖、太湖、巢湖和洪泽湖)均位于本区^[1]。区域内大大小小的湖泊孕育着丰富的水生生物资源,被国际保护组织列为“全球 200 个最具生物保护价值的生态区”^[2]。然而,从 1950s 以来,该地区湖泊受到日益加剧的人类活动(如闸坝建设、围湖造田、水体污染和过度捕捞等)的干扰,致使鱼类资源锐减,多样性显著下降^[3-5]。由水利工程建设和水位调蓄导致的江湖阻隔是造成水生生物多样性下降的主要原因之一^[6]。江湖连通的丧失会显著改变湖泊水环境因子(如水流、水深、溶解氧、光线、温度等),导致浅滩等一些异质生境消失以及阻隔鱼类洄游通道,进而对鱼类产生直接或间接影响^[7-8]。关于人类干扰对鱼类物种多样性的影响在国内外已开展了大量的研究^[9-11],但鱼类功能多样性的相关研究起步较晚^[12],目前针对鱼类功能多样性对人类干扰的响应研究相对较少。因此,很有必要开展鱼类的功能特征和多样性对江湖阻隔的响应研究,为今后泛滥平原生态系统的鱼类资源保护提供科学依据。

传统的群落生态学和生物多样性研究多从物种多样性角度出发,在研究中主要关注群落的物种组成和丰度的时空格局^[13-14]。物种多样性将物种视为完全相同的群落构件或单元^[15],忽略了物种间生理、生态、形态特征、功能、进化关系等方面巨大的差异^[16-17],近年来,生态学家逐渐认识到传统物种多样性研究的不足^[18-19]。伴随着功能生态学的兴起,从功能性状和功能多样性的角度去分析生物群落受外界干扰后的聚合机制和响应过程成为当前生态学的研究热点^[20]。相比传统的基于物种水平的方法,基于功能性状的研究有其明显的优势。因为功能性状与环境因子的关系更为紧密,可以直接反映生物在自然选择压力或胁迫因子长期作用下,适应选择压力后表现出的生存策略。功能性状组成的变化可以对特定环境下群落的结构和功能做出合理的预测,对自然变化和人类干扰的生态响应更为稳定^[21]。此外,功能性状还具有更广泛的区域适用性(可认为地球上绝大多数物种共用一套性状)、群落的功能多样性能反映生态系统功能等一系列优点^[22-23]。因此,基于功能性状的研究可以揭示群落构建与环境变异之间的机理性关联,从而更好地指示外界干扰和环境压力,量化并预测人为干扰对生物群落及生态系统的影响,从而有助于制定有效的生物保护和资源可持续利用策略^[24-26]。

本研究选取了东部平原湖泊区的 9 个阻隔湖泊和 2 个连通湖泊(作为对照),在区域内众多湖泊都面临江湖阻隔干扰的背景下,开展阻隔前后湖泊鱼类功能特征和多样性的变化研究。目前仅个别研究在空间尺度上比较了连通湖泊和阻隔湖泊鱼类功能多样性格局的差异^[27],而尚无在时间尺度上比较同一组湖泊的鱼类群落在江湖阻隔前后的功能特征和多样性变化的研究。本文通过比较 9 个湖泊在阻隔前后的鱼类群落功能性状和多样性的变化(同时以 2 个连通湖泊的变化情况作为对照),来分析江湖阻隔背景下东部平原湖泊鱼类多样性对人类干扰的响应,以期为今后该地区泛滥平原湖泊渔业资源管理及湖区生态修复和保护提供重要的理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况及鱼类调查

本研究选取了东部平原湖泊区中 11 个代表性湖泊,即鄱阳湖、洞庭湖、太湖、巢湖、洪泽湖、梁子湖、菜子湖、东湖、涨渡湖、洪湖和五里湖。在这 11 个湖泊中,目前只有鄱阳湖和洞庭湖(以下称连通湖泊)保持与长江干流的自然连通,而由于 1950s 以来先后由于兴建水利、围垦造田等原因,其余 9 个湖泊与干流的自然连通受到闸坝的阻隔(以下称阻隔湖泊)。在这些湖泊中,五里湖是太湖伸入无锡的内湖,但由于东部平原湖泊历史上的调查数据较为缺乏,而本研究主要关注的是这些湖泊在阻隔前后功能特征和功能多样性的变化,并未涉及到不同湖泊间的比较,所以本研究参考 Liu 和 Wang^[4, 26] 将五里湖和太湖作为两个湖泊来进行鱼类多样性分析的思路,在文中保留了五里湖这一湖泊。为了更好地体现江湖阻隔背景下鱼类群落的变化

规律,本研究中将鱼类数据划分为两个时期:阻隔前和阻隔后(详见附表 I),研究 9 个阻隔湖泊在阻隔前后鱼类功能性状组成和功能多样性的变化,同时将 2 个连通湖泊的变化情况作为对照. 11 个湖泊的鱼类数据来自科学报告、书籍、网上数据、出版文献和调查报告等(详见附表 II).

1.2 数据处理与分析方法

1.2.1 功能性状的选取 Villéger 等提出鱼类功能性状的选取应包含 5 个维度:食物获取能力、移动能力、抵御捕食能力、营养平衡能力和繁殖能力^[27],本研究以此为基础选取了鱼类功能生态研究中广泛使用的 3 类分类性状(洄游习性:河海洄游性、江湖洄游性和非洄游^[28]);体型:圆柱形(cylindrical)、侧扁形(compressiform)、椭圆形(oval)、似鳗形(eel-like)和梭形(fusiform)^[29];食性:杂食性(omnivorous)、草食性(herbivorous)、浮游生物食性(planktivorous)、无脊椎动物食性(invertivorous)、鱼食性(piscivorous)和腐食性(detritivores)^[29]和 6 个连续功能性状(最大体长、营养级、生长速率、初次性成熟时间、初次性成熟体长和最大寿命)^[27]. 功能性状数据来自文献资料和鱼类数据库 FishBase^[30].

1.2.2 功能多样性指数的计算 为了更好地体现鱼类群落生态的变化,本研究选取 4 个功能多样性指数:功能丰富度指数(functional richness, $FRic$)、功能均匀度指数(functional evenness, $FEve$)、功能离散指数(functional divergence, $FDiv$)和功能分散指数(functional dispersion, $FDis$)来度量江湖阻隔前后湖泊鱼类的功能多样性变化.

$FRic$ 可以衡量一个群落中物种占据功能空间的大小^[31-32],可作为评价群落生产力、对环境波动的缓冲能力或者对生态入侵的承受能力等指标^[33]. 功能丰富度指数较低,就意味着潜在的有效资源未被充分利用,从而拉低了生产力水平^[34]. 计算公式为:

$$FRic = \frac{SFic}{Rc} \quad (1)$$

式中, $FRic$ 表示群落 i 中性状 c 的功能丰富度指数, $SFic$ 表示群落中物种占据的生态位空间, Rc 表示所有群落中性状 c 占据的生态位空间.

功能均匀度指数($FEve$)可以解释物种功能性状分布的均匀性^[21],反映物种整体资源利用的状况^[33]. 计算公式为:

$$FEve = \frac{\sum_{l=1}^{s-1} \min\left(PEW_L, \frac{1}{S-1}\right) - \frac{1}{S-1}}{1 - \frac{1}{S-1}} \quad (2)$$

$$PEW_L = \frac{EW_L}{\sum_{l=1}^{s-1} EW_L} \quad (3)$$

$$EW_L = \frac{dist(i, j)}{w_i + w_j} \quad (4)$$

式中, S 表示物种数, EW_L 为均匀度权重, $dist(i, j)$ 为物种 i 和 j 的欧式距离, w_i 为物种 i 的相对丰富度; L 为分支长, PEW_L 为分支长权重.

功能离散指数($FDiv$)可以解释物种丰度在功能性状空间的散布情况,度量每个物种与功能上趋异化物种质心的平均距离^[21]. 功能离散度指数用于测量资源分异度,例如 $FDiv$ 指数越低,意味着物种生态位越饱和,竞争越激烈^[33]. 计算公式为:

$$g_k = \frac{1}{S} \sum_{i=1}^s x_{ik} \quad (5)$$

$$dG_i = \sqrt{\sum_{k=1}^r (x_{ik} - g_k)^2} \quad (6)$$

$$\overline{dG} = \frac{1}{S} \sum_{i=1}^s dG_i \quad (7)$$

$$\Delta d = \sum_{i=1}^s W_i \cdot (dG_i - \overline{dG}) \quad (8)$$

$$\Delta |d| = \sum_{i=1}^S W_i \cdot |dG_i - \overline{dG}| \tag{9}$$

$$FDiv = \frac{\Delta d + \overline{dG}}{\Delta |d| + \overline{dG}} \tag{10}$$

式中, x_{ik} 表示物种 i 性状 k 的值, g_k 为性状 k 的重心, S 为物种数, T 为性状数, dG_i 表示每一个 S 种到重心的欧式距离, \overline{dG} 为物种 i 与重心的平均距离, d 表示以多度为权重的离散度, $\Delta |d|$ 为物种 i 与重心的平均距离, W 是物种 i 的多度.

功能分散指数 ($FDIs$) 通过计算一个群落中物种构建的性状空间上以物种相对丰富度作为权重算出的物种散布中心, 用每个物种与这个中心的平均距离来解释物种在性状空间上的散布情况^[35]. 计算公式为:

$$c = \frac{\sum w_j \cdot x_{jk}}{\sum w_j} \tag{11}$$

$$FDIs = \frac{\sum w_j \cdot z_j}{\sum w_j} \tag{12}$$

式中, c 表示加权重心, w_j 表示物种 j 的相对多度, x_{jk} 为物种 i 性状 k 的值, z_j 为物种 j 到重心 c 的加权距离.

1.2.3 统计分析 鱼类群落功能多样性指数采用是 R 语言中的 FD 程序包^[36-37] 运行计算得出. 采用配对样本 t 检验比较阻隔前后的鱼类功能性状组成和功能多样性指数是否存在显著差异. 配对样本 t 检验在 SPSS 19.0 软件中运行. 最后, 在 Origin 2018 软件中绘制分类性状的柱形图、连续性状的散点图和功能多样性指数箱线图.

表 1 11 个湖泊在两个时期鱼类群落包含的科、属和种的数目

Tab.1 List of number of families, genera and species in 11 lakes among two periods

	时期	科	属	种
鄱阳湖	历史	22	62	116
	现在	17	55	99
洞庭湖	历史	20	65	111
	现在	14	48	89
巢湖	阻隔前	18	52	84
	阻隔后	11	36	56
洪泽湖	阻隔前	12	49	89
	阻隔后	9	37	59
太湖	阻隔前	21	62	106
	阻隔后	10	38	59
洪湖	阻隔前	12	43	72
	阻隔后	7	28	42
涨渡湖	阻隔前	15	46	80
	阻隔后	9	32	50
东湖	阻隔前	14	43	66
	阻隔后	6	27	39
梁子湖	阻隔前	17	50	78
	阻隔后	11	37	58
菜子湖	阻隔前	18	48	79
	阻隔后	16	44	68
五里湖	阻隔前	13	41	62
	阻隔后	6	26	38

2 结果与分析

2.1 物种组成

阻隔前 9 个湖泊共记录鱼类 140 种(隶属 13 目 29 科 82 属), 而阻隔后只记录了 100 种(隶属 9 目 19 科 68 属). 与阻隔前比较, 这 9 个湖泊的鱼类减少了 40 种(减少 28.6%)、14 属、10 科(鲟科 Acipenseridae、匙吻鲟科 Polyodontidae、平鳍鳅科 Catostomidae、花鲈科 Lateolabracidae、塘鳢科 Eleotridae、鲯科 Callionymidae、鲃科 Tetraodontidae、舌鳎科 Cynoglossidae、鲱科 Clupeidae 和杜父鱼科 Cottidae) 和 4 目(鲟形目 Acipenseriformes、鲃形目 Tetraodontiformes、鲈形目 Pleuronectiformes 和鲉形目 Scorpaeniformes)(表 1). 鄱阳湖和洞庭湖历史时期共记录 137 种(隶属 9 目 25 科 73 属), 现在时期 118 种(隶属 8 目 19 科 63 属), 较历史时期减少了 19 种(减少 13.9%)(表 1).

2.2 生态类型

对 9 个湖泊江湖阻隔前后的鱼类功能性状参数进行比较发现, 洄游习性、体型和食性 3 大类中 11 个性状所包含的物种数在江湖阻隔后均显著下降 ($P < 0.05$), 仅椭圆形、似鳗形和食草性鱼类物种数未发生显著变化(图 1). 另外从 14 个分类性状所占总物种数的比例来看, 非洄游 ($t = -4.145, P = 0.003$, 由 60.3% 增加到 67.5%)、浮游生物食性 ($t = -2.586, P = 0.032$, 由 13.7% 增加到 15.9%) 鱼类的比例显著增加, 而河海洄游 ($t = 6.510, P < 0.001$, 由 7.9% 减少到 4.5%)、河湖洄游 ($t = 2.372, P = 0.045$, 由 31.8% 减少到 28.1%) 和鱼食性 ($t = 3.247, P = 0.012$, 由 31.1% 减少到

25.2%)比例显著减少,其他9个性状的物种数占比在阻隔前后变化不大(图1). 相比9个阻隔湖泊,在2个连通湖泊中这5个功能性状的物种数占比变化幅度相对较小(非洄游:由65.2%增加到69.1%;浮游生物食性:由9.70%增加到11.2%;河海洄游:由6.58%减少到3.71%;河湖洄游:由28.2%减少到27.2%;鱼食性:由32.6%减少到31.3%)(详见附表Ⅲ).

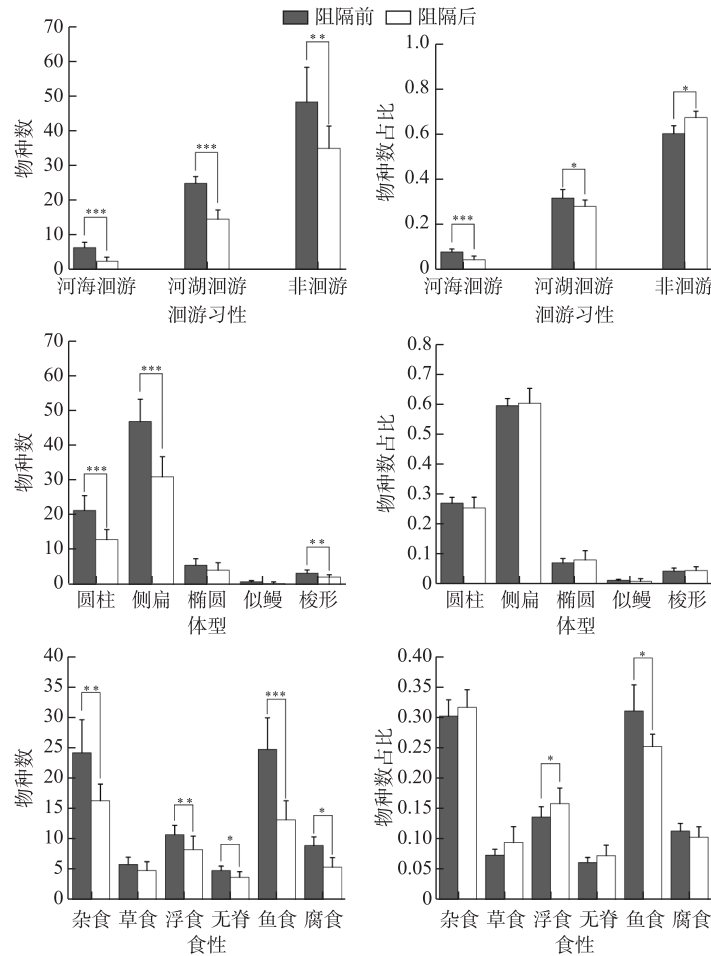


图1 江湖阻隔前后鱼类各分类功能特征的物种数和其占总物种数的比例(Mean±SD) (*, $P < 0.05$; **, $P < 0.01$; ***, $P < 0.001$. “浮食”代表浮游生物食性;“无脊”代表无脊椎动物食性)

Fig.1 Species richness and proportion of species number of each functional trait of fish before and after the river-lake disconnection (*, $P < 0.05$; **, $P < 0.01$; ***, $P < 0.001$)

9个阻隔湖泊鱼类群落的连续性状变化如下:营养级在阻隔前平均值为3.14,阻隔后为3.10,营养级显著减小($t = -4.053, P = 0.044$). 生长速率从阻隔前(0.57 a^{-1})到阻隔后(0.65 a^{-1})呈现增长趋势,且两个时期生长速度变化显著($t = 3.749, P = 0.006$). 其他4个连续性状变化不显著,其中最大体长(由41.32 cm到44.95 cm)、初次性成熟体长(由22.54 cm到23.86 cm)和最大寿命(由13.19 a到13.58 a)有所增加,而初次性成熟时间(由3.23 a到3.22 a)有所减少(图2). 相比9个阻隔湖泊,2个连通湖泊中营养级和生长速率变化幅度更小(营养级:由3.19减少到3.17;生长速率:由 0.53 a^{-1} 增加到 0.58 a^{-1})(详见附表Ⅲ).

2.3 物种数和功能多样性指数变化

9个阻隔湖泊的鱼类平均物种数显著降低($t = -8.560, P < 0.001$),由阻隔前的79.6种减少为阻隔后的

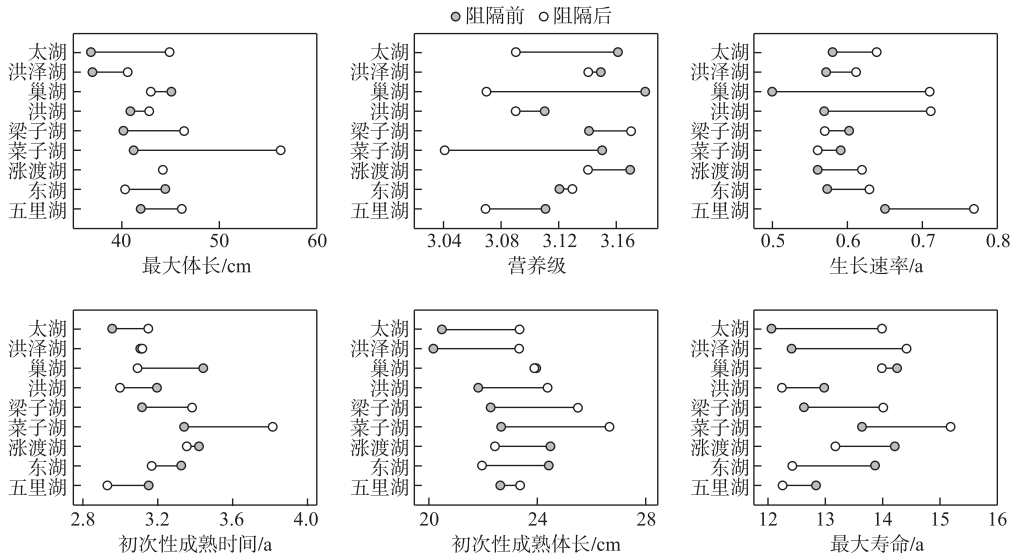


图2 江湖阻隔前后鱼类物种连续型功能特征的变化

Fig.2 Temporal changes in average value of continuous functional traits of fish before and after the river-lake disconnection

52.1 种 (减少比例为 34.4%)。 $FRic$ ($t=-6.848, P<0.001$), $FDiv$ ($t=-2.897, P=0.020$) 和 $FDis$ ($t=-2.646, P=0.029$) 也均显著降低, 而 $FEve$ 不显著地增加 ($t=1.735, P=0.121$) (图 3)。与阻隔前比较, $FRic$ 、 $FDiv$ 和 $FDis$ 减少的比例分别为 32.5%、1.83% 和 2.43%。分析 2 个连通湖泊多样性指数的变化状况, 发现其物种数 (减少 17.2%) 和功能多样性指数的变化幅度 ($FRic$: 减少 29.9%; $FDiv$: 减少 1.5%; $FDis$: 减少 2.2%) 均小于 9 个阻隔湖泊 (详见附表 III)。

3 讨论

历史上, 东部平原区的湖泊均与干流自然连通形成典型的江湖复合生态系统, 支持着较高的物种多样性^[26, 28]。近几十年来, 大规模围垦、修堤和建坝等人类活动的干扰, 极大地破坏了江湖复合生态系统, 导致大部分湖泊与长江水文联系的丧失, 湖泊鱼类资源面临着急剧下降等问题^[6, 38]。研究表明, 泛滥平原湖泊在江湖阻隔后, 鱼类物种多样性显著下降^[9, 26]。本研究得到了类似的结果, 9 个湖泊的鱼类平均物种数由阻隔前的 79.6 种减少到阻隔后的 52.1 种, 下降幅度超过 30%。因此开展江湖阻隔对湖泊鱼类性状特征以及物种和功能多样性指数影响的研究显得十分有必要。

江湖连通丧失会阻隔鱼类洄游通道, 使得湖内的洄游型鱼类不能进入长江繁殖; 此外, 江湖阻隔使得长江干流的幼鱼不能到湖泊中摄食和育肥, 给洄游型鱼类带来了不良影响, 从而显著改变鱼类功能性状组成 (非洄游性鱼类在阻隔湖泊中优势度增加)^[39]。本研究发现洄游鱼类在阻隔后下降比例高于非洄游鱼类 (洄游鱼类下降 43.0%, 非洄游鱼类下降 30.7%)。然而, 阻隔后的湖泊中洄游性鱼类并没有完全消亡, 原因可能是: 1) 不少湖泊存在多条支流汇入, 为江湖洄游鱼类提供了产卵栖息地^[40]; 2) 部分湖泊 (如洪泽湖、太湖、巢湖等) 经常开展增殖放流, 鲢 (*Hypophthalmichthys molitrix*)、鳙 (*Aristichthys nobilis*)、草鱼 (*Ctenopharyngodon idellus*) 等江湖洄游鱼类的种群数量得以补充^[41-43]; 3) 主干流偶发洪水脉冲与阻隔湖泊临时连通, 使得洄游鱼类进入湖泊 (如长江 1998 年的特大洪水)^[40]。

阻隔后的湖泊从原有的开放系统走向封闭系统, 使得湖泊内的流速、总氮和总磷等水文水环境条件发生了改变, 进而对水生生物产生了影响^[7]。有研究表明, 阻隔湖泊的浮游植物物种数低于连通湖泊, 但浮游植物总体密度却高于连通湖泊^[8], 而浮游动物因有了更适宜的环境条件和充足的食物来源, 其密度也会有

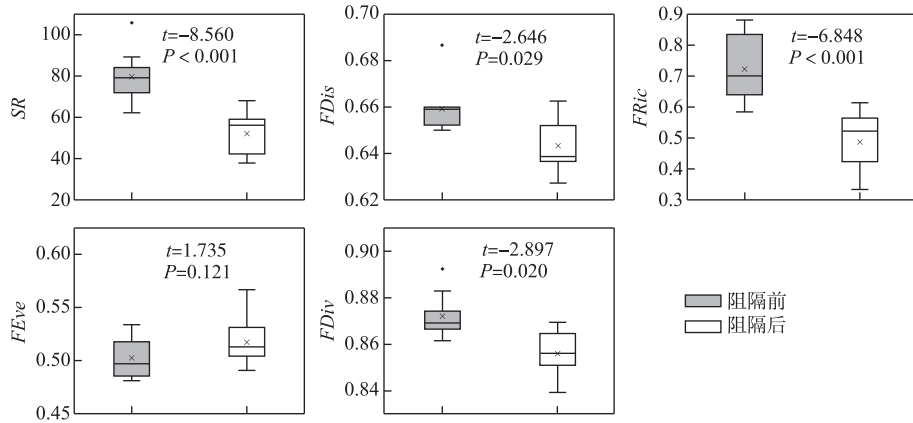


图 3 9 个湖泊鱼类功能多样性指数在江湖阻隔前和阻隔后的箱线图
(箱体表示核心参数值在 25% ~ 75% 的分布范围, 箱体中间的横线为中位数, × 为平均值. 箱体上下两端短横线之间的范围是箱体范围的 1.5 倍, 黑点表示极端值)

Fig.3 Boxplots of taxonomical (SR), functional (FRic, FEve, FDiv and FDis) alpha diversity indices of the 9 studied lakes before and after the river-lake disconnection (The bottom and top of the box represent the 25th and 75th percentiles, the middle line represents the median, the middle × represents average values, the whiskers represents 1.5 inter quartile ranges beyond the boxes, and the black dot represents extreme value)

所上升. 这些因素可能是阻隔湖泊中浮游生物食性鱼类物种占比上升的原因. 鱼食性鱼类物种占比和鱼类营养级的下降原因是鱼食性鱼类处于较高营养级, 这些鱼类因个体大、寿命长、自然死亡率低等原因, 使其成为主要捕捞的对象^[44]; 此外, 长江中下游不少洄游性鱼类多为高营养级鱼类, 如鳊 (*Ochetobius elongates*、*Luciobrama macrocephalus*)、胭脂鱼 (*Myxocyprinus asiaticus*)、中华鲟 (*Acipenser sinensis*)、日本鳗鲡 (*Anguilla japonica*) 等, 它们的消亡使得较低营养级的种类优势度增加^[5, 45]. 有研究也表明了鱼类受人类干扰的影响, 营养级会呈现下降趋势^[46-47].

本研究还发现江湖阻隔后鱼类生长速率要高于阻隔前, 主要是由于阻隔后不少生长速率慢的鱼类 (如胭脂鱼 (*Myxocyprinus asiaticus*)、似刺鳊 (*Paracanthobrama guichenoti*) 和暗色东方鲀 (*Takifugu obscurus*) 等) 的消亡导致的. 在江湖阻隔、围湖造田、围网养殖等多种人类活动的干扰下^[48-50], 生长速率慢、性成熟晚的鱼类 (K 对策者) 受到的负面影响往往更大, 而生长速率快的鱼类 (r 对策者) 反而较快适应这种不利的环境. 除了江湖阻隔外, 东部平原的湖泊还受到高强度捕捞的影响, 有研究表明, 高强度的捕捞会使鱼类生长速率增大^[50-52], 因为在高强度的捕捞下, 网目变小, 个体较大的鱼类受到危害更加严重^[53], 导致这类鱼类种群更加容易消亡, 这可能也是导致鱼类生长速率增大的原因之一. 在这种大背景下, 生长速率较快的鱼类更能适应这种变化, 因此鱼类种群的性状向生长速率快靠近^[54], 才能维持鱼类种群数量.

本研究发现, 阻隔后湖泊鱼类群落的 3 个功能多样性指数 *FRic*、*FDiv* 和 *FDis* 均发生了显著的降低. *FRic* 表示一个群落中的物种在性状空间上的填充情况^[55], *FRic* 的下降, 表明湖泊由阻隔前保持良好连通, 栖息地复杂程度高, 适合鱼类生长繁殖, 鱼类种类组成多样的状态转变为阻隔后栖息地破碎且单一, 鱼类种类较少的状态. 研究表明, 东部平原区的许多湖泊, 在阻隔后均不同程度地出现了沉水植物消亡、透明度降低、富营养化加剧的情况^[8, 56-57], 这些变化均会对鱼类产生不利影响, 从而造成鱼类多样性的下降. 此外, 在江湖阻隔前后多样性指数对比中, 发现鱼类群落的 *FRic* 下降幅度要低于物种丰富度的下降幅度. 物种丰富度高的生物群落往往拥有较高的功能冗余性, 对人类干扰也具更强的抵抗力^[58]. 而本次研究中 9 个湖泊鱼类群落的 *FRic* 相比历史减少 32.5%, 仅略低于物种数降低的幅度 (34.4%), 这表明这些湖泊中鱼类群落的功能冗余度处于较低的水平. *FDiv* 常用来解释物种丰富度与其所形成的功能性状的空间散布情况^[21], *FDiv* 指数越高, 表明种间生态位互补性越强, 竞争作用则较弱, 鱼类群落生态位分化程度较高, 不同的鱼类可以

用不同的方式利用现有的资源^[31]. FDi 用来表示物种在性状空间上的散布情况^[58]. $FDiv$ 和 FDi 通常用来体现群落中物种间的生态位分化程度和资源互补程度^[59]. 本研究显示江湖阻隔后鱼类群落的 $FDiv$ 和 FDi 均显著下降, 表明阻隔湖泊鱼类栖息地空间减少, 相同的属物种聚集, 生态位重叠加剧, 鱼类种间竞争可能变得更为激烈, 资源利用率降低. 与 $FRic$ 、 $FDiv$ 和 FDi 的下降不同, 湖泊鱼类的 $FEve$ 指数在阻隔后呈现出上升的趋势, 这意味着阻隔后湖泊鱼类群落在功能特征组成上变得更相似, 从侧面也说明了其具有性状鱼类的消亡, 湖泊有效资源未被完全利用^[33].

综上所述, 本研究发现东部平原的 9 个湖泊鱼类群落的功能性状组成在阻隔前后发生了显著变化, 其物种和功能多样性指数 (除了 $FEve$) 均显著下降, 表明江湖阻隔对东部平原湖泊的鱼类多样性产生了明显的负面影响. 此外, 保持连通的鄱阳湖和洞庭湖的物种和功能多样性指数变化幅度均低于 9 个阻隔湖泊, 这更加说明江湖连通是维持湖泊鱼类多样性的重要条件, 因此良好的水文连通性对维持鱼类多样性具有重要意义. 本研究虽然分析了江湖阻隔对湖泊鱼类功能组成和多样性的影响, 为泛滥平原鱼类多样性的评估和保护提供了重要的理论依据, 但也存在一些不足之处. 首先, 本文中的数据均来自于文献数据, 在不同湖泊和不同时期中存在采样方法、采样力度和渔具不完全一致之处. 但本文选取数据时考虑到了鱼类历史和现今分布数据可比性的问题: 1) 两个时期数据都来自高强度的多年度 (调查时间 2 a 以上)、多季节、全湖尺度的调查; 2) 两个调查时期使用详尽的捕捞网具 (迷魂阵、刺网和拖网) 等采样力度足以代表区域鱼类分布区系; 3) 本研究的分析均是基于鱼类的有/无数据, 也对鱼类的种类名称进行了核对以甄别物种有效性, 剔除同物异名和无效种. 在这种情况下, 可以认为所获得的鱼类分布数据是详尽且具有可比性的^[4]. 在大空间和长时间尺度的多样性研究中, 采样力度的这种不完全一致往往是无法避免的. 目前, 已有许多大时空尺度的鱼类多样性研究均是基于前人的数据而开展的, 如在中国云贵高原湖群^[60], 北美的五大湖^[61]、欧洲的 137 条河流^[19]以及在全球尺度的河流鱼类研究中^[62-63]. 这些研究中都存在一定程度的采样方法不一致之处 (在采样力度足够的情况下, 可以保证鱼类有/无数据的可比性). 其次, 本研究仅考虑了江湖阻隔这一威胁因素, 而未涉及到其他的威胁因素, 如水体污染、湖泊萎缩、过度捕捞、采石挖砂等. 这些干扰因素都在不同程度上对鱼类多样性带来了负面的影响^[8, 64-65]. 因此, 建议在以后的研究中, 评价分析多重环境干扰对东部平原湖泊区水生生物多样性的影响, 从而为该地区的湖泊生态系统保护方案的制定和实施提供更为准确全面的参考.

4 附录

附表 I ~ III 见电子版 (DOI: 10.18307/2022.0114).

5 参考文献

- [1] Wang SM, Dou HS eds. Lakes of China. Beijing: Science Press, 1998. [王苏民, 窦鸿身. 中国湖泊志. 北京: 科学出版社, 1998.]
- [2] Olson DM, Dinerstein E. The global 200: A representation approach to conserving the earth's most biologically valuable ecoregions. *Conservation Biology*, 1998, **12**(3): 502-515. DOI: 10.1046/j.1523-1739.1998.012003502.x.
- [3] Fang JY, Wang ZH, Zhao SQ et al. Biodiversity changes in the lakes of the Central Yangtze. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2006, **4**(7): 369-377. DOI: 10.1890/1540-9295(2006)004[0369: bcitlo]2.0.co;2.
- [4] Liu XQ, Wang HZ. Estimation of minimum area requirement of river-connected lakes for fish diversity conservation in the Yangtze River floodplain. *Diversity and Distributions*, 2010, **16**(6): 932-940. DOI: 10.1111/j.1472-4642.2010.00706.x.
- [5] Wang D. Current status and conservation of porpoises in the Yangtze River. *Jiangxi Fishery Sciences And Technology*, 2011, (2): 8-9. [王丁. 长江豚类的现状及其保护. 江西水产科技, 2011, (2): 8-9.]
- [6] Tang SK, Zhang TQ, Lu JM et al. Temporal and spatial variation in fish assemblages in Lake Taihu, China. *Journal of Freshwater Ecology*, 2015, **30**(1): 181-196. DOI: 10.1080/02705060.2015.1007098.
- [7] Wu B, Zhao Q, Ma FK. Study on restoration of the relationship between blocking lakes and Yangtze River. *Environmental Science Survey*, 2019, **38**(5): 10-14. [吴波, 赵强, 马方凯. 长江中下游江湖关系恢复研究. 环境科学导刊, 2019, **38**(5): 10-14.]

- [8] Wang HZ, Liu XQ, Wang HJ. The Yangtze River-floodplain ecosystem: Multiple threats and holistic conservation. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2019, **43**(S1): 157-182. [王洪铸, 刘学勤, 王海军. 长江河流-泛滥平原生态系统面临的威胁与整体保护对策. 水生生物学报, 2019, **43**(S1): 157-182.]
- [9] Wang LM, Hu HJ, Wang D. Ecological impacts of disconnection from the Yangtze on fish resources in Zhangdu Lake. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2005, **14**(3): 287-292. [王利民, 胡慧建, 王丁. 江湖阻隔对涨渡湖区鱼类资源的生态影响. 长江流域资源与环境, 2005, **14**(3): 287-292.]
- [10] Sun JY, Dai XJ, Zhu JF *et al.* Analysis of the fish species diversity in Dianshan Lake. *Journal of Shanghai Fisheries University*, 2007, **16**(5): 454-459. [孙菁煜, 戴小杰, 朱江峰等. 淀山湖鱼类多样性分析. 上海水产大学学报, 2007, **16**(5): 454-459.]
- [11] Zhao YH, Xing YQ, Lu BB *et al.* Species diversity and conservation of freshwater fishes in the Yellow River basin. *Biodiversity Science*, 2020, **28**(12): 1496-1510. DOI: 10.17520/biods.2020191. [赵亚辉, 邢迎春, 吕彬彬等. 黄河流域淡水鱼类多样性和保护. 生物多样性, 2020, **28**(12): 1496-1510.]
- [12] Cadotte MW, Carscadden K, Mirotchnick N. Beyond species: Functional diversity and the maintenance of ecological processes and services. *Journal of Applied Ecology*, 2011, **48**(5): 1079-1087. DOI: 10.1111/j.1365-2664.2011.02048.x.
- [13] Gaston KJ. Global patterns in biodiversity. *Nature*, 2000, **405**(6783): 220-227. DOI: 10.1038/35012228.
- [14] Hillebrand H. On the generality of the latitudinal diversity gradient. *The American Naturalist*, 2004, **163**(2): 192-211. DOI: 10.1086/381004.
- [15] Díaz S, Cabido M. Vive la différence: Plant functional diversity matters to ecosystem processes. *Trends in Ecology & Evolution*, 2001, **16**(11): 646-655. DOI: 10.1016/s0169-5347(01)02283-2.
- [16] Lepš J, Brown VK, Diaz Len TA *et al.* Separating the chance effect from other diversity effects in the functioning of plant communities. *Oikos*, 2001, **92**(1): 123-134. DOI: 10.1034/j.1600-0706.2001.920115.x.
- [17] Jiang XL, Zhang WG. Functional diversity and its research method. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, **30**(10): 2766-2773. [江小雷, 张卫国. 功能多样性及其研究方法. 生态学报, 2010, **30**(10): 2766-2773.]
- [18] McCarthy BC, Magurran AE. Measuring biological diversity. *Journal of the Torrey Botanical Society*, 2004, **131**(3): 277. DOI: 10.2307/4126959.
- [19] Villéger S, Grenouillet G, Brosse S. Functional homogenization exceeds taxonomic homogenization among European fish assemblages. *Global Ecology and Biogeography*, 2014, **23**(12): 1450-1460. DOI: 10.1111/geb.12226.
- [20] Stuart-Smith RD, Bates AE, Lefcheck JS *et al.* Integrating abundance and functional traits reveals new global hotspots of fish diversity. *Nature*, 2013, **501**(7468): 539-542. DOI: 10.1038/nature12529.
- [21] Villéger S, Mason NWH, Mouillot D. New multidimensional functional diversity indices for a multifaceted framework in functional ecology. *Ecology*, 2008, **89**(8): 2290-2301. DOI: 10.1890/07-1206.1.
- [22] Menezes S, Baird DJ, Soares AMVM. Beyond taxonomy: A review of macroinvertebrate trait-based community descriptors as tools for freshwater biomonitoring. *Journal of Applied Ecology*, 2010, **47**(4): 711-719. DOI: 10.1111/j.1365-2664.2010.01819.x.
- [23] Heino J. A macroecological perspective of diversity patterns in the freshwater realm. *Freshwater Biology*, 2011, **56**(9): 1703-1722. DOI: 10.1111/j.1365-2427.2011.02610.x.
- [24] Dolédec S, Tilbian J, Bonada N. Temporal variability in taxonomic and trait compositions of invertebrate assemblages in two climatic regions with contrasting flow regimes. *Science of the Total Environment*, 2017, **599/600**: 1912-1921. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.05.057.
- [25] Alahuhta J, Erős T, Kärnä OM *et al.* Understanding environmental change through the lens of trait-based, functional, and phylogenetic biodiversity in freshwater ecosystems. *Environmental Reviews*, 2019, **27**(2): 263-273. DOI: 10.1139/er-2018-0071.
- [26] Liu XQ, Wang HZ. Effects of loss of lateral hydrological connectivity on fish functional diversity. *Conservation Biology*, 2018, **32**(6): 1336-1345. DOI: 10.1111/cobi.13142.
- [27] Villéger S, Brosse S, Mouchet M *et al.* Functional ecology of fish: Current approaches and future challenges. *Aquatic Sciences*, 2017, **79**(4): 783-801. DOI: 10.1007/s00027-017-0546-z.
- [28] Jiang ZG, Dai BG, Wang C *et al.* Multifaceted biodiversity measurements reveal incongruent conservation priorities for rivers in the upper reach and lakes in the middle-lower reach of the largest river-floodplain ecosystem in China. *Science of the*

- Total Environment*, 2020, **739**: 140380. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.140380.
- [29] Winemiller KO, Fitzgerald DB, Bower LM *et al.* Functional traits, convergent evolution, and periodic tables of niches. *Ecology Letters*, 2015, **18**(8): 737-751. DOI: 10.1111/ele.12462.
- [30] Froese R, Pauly D. FishBase. World wide Web Electronic Publication, 2016. <http://www.fishbase.org>.
- [31] Mason NWH, Mouillot D, Lee WG *et al.* Functional richness, functional evenness and functional divergence: The primary components of functional diversity. *Oikos*, 2005, **111**(1): 112-118. DOI: 10.1111/j.0030-1299.2005.13886.x.
- [32] Schleuter D, Daufresne M, Massol F *et al.* A user's guide to functional diversity indices. *Ecological Monographs*, 2010, **80**(3): 469-484. DOI: 10.1890/08-2225.1.
- [33] Shuai FM, Li XH, Chen FC *et al.* Functional diversity of freshwater fishes and methods of measurement. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37**(15): 5228-5237. DOI: 10.5846/stxb201605030836. [帅方敏, 李新辉, 陈方灿等. 淡水鱼类功能多样性及其研究方法. 生态学报, 2017, **37**(15): 5228-5237.]
- [34] Petchey OL. Integrating methods that investigate how complementarity influences ecosystem functioning. *Oikos*, 2003, **101**(2): 323-330. DOI: 10.1034/j.1600-0706.2003.11828.x.
- [35] Laliberté E, Legendre P. A distance-based framework for measuring functional diversity from multiple traits. *Ecology*, 2010, **91**(1): 299-305. DOI: 10.1890/08-2244.1.
- [36] RDevelopment Core Team. R: A language and environment for statistical computing. Foundation for statistical computing, Vienna, Austria, 2020. <http://www.R-project.org>.
- [37] Laliberté E, Legendre P, Shipley B. FD: Measuring functional diversity from multiple traits, and other tools for functional ecology. 2014.
- [38] Ren P, He H, Song YQ *et al.* The spatial pattern of larval fish assemblages in the lower reach of the Yangtze River: Potential influences of river-lake connectivity and tidal intrusion. *Hydrobiologia*, 2016, **766**(1): 365-379. DOI: 10.1007/s10750-015-2471-2.
- [39] Zhu SQ, Liu ZW, Gu XH. Changes of the fish fauna and fish yield analysis in Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2007, **19**(6): 664-669. DOI: 10.18307/2007.0607. [朱松泉, 刘正文, 谷孝鸿. 太湖鱼类区系变化和渔获物分析. 湖泊科学, 2007, **19**(6): 664-669.]
- [40] Fu CZ. Patial pattern and resource analysis of fish diversity in the Yangtze River Basin [Dissertation]. Shanghai: Fudan University 2003. [傅萃长. 长江流域鱼类多样性空间格局与资源分析[学位论文]. 上海: 复旦大学, 2003.]
- [41] Wang ML, Zhang TL, Ye SW *et al.* Status of fish resources historical variation and fisheries management strategies in Hongze lake. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2013, **37**(6): 1118-1127. DOI: 10.7541/2013.152. [林明利, 张堂林, 叶少文等. 洪泽湖鱼类资源现状、历史变动和渔业管理策略. 水生生物学报, 2013, **37**(6): 1118-1127.]
- [42] He J, Gu XH, Wang XL *et al.* Fish stocking quantities and structures of the fishery resources enhancement in Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2012, **24**(1): 104-110. DOI: 10.18307/2012.0114. [何俊, 谷孝鸿, 王小林等. 太湖鱼类放流增殖的有效数量和合理结构. 湖泊科学, 2012, **24**(1): 104-110.]
- [43] Lai NY, Hu WM, Fang K. Research of Chaohu fishery resources conservation and utilization from the perspective of ecological civilization. *Chinese Fisheries Economics*, 2016, **34**(3): 68-73. [赖年悦, 胡万明, 方凯. 生态文明视角下巢湖渔业资源养护与利用研究. 2016, **34**(3): 68-73.]
- [44] Shen C, Li J, Kang B. Trophic structure of fish community in the Minjiang River estuary. *Journal of Jimei University: Natural Science*, 2020, **25**(1): 8-15. DOI: 10.19715/j.jmuzr.2020.01.02. [沈忱, 李军, 康斌. 闽江口鱼类群落营养结构的探究. 集美大学学报: 自然科学版, 2020, **25**(1): 8-15.]
- [45] Wang CX, Wang ZS, Xu LJ *et al.* Dynamics of fish community structure in Lake Caizi and its driving factors. *Journal of Capital Normal University: Natural Science Edition*, 2012, **33**(4): 32-37. DOI: 10.19789/j.1004-9398.2012.04.008. [王晨旭, 王忠锁, 许隆君等. 菜子湖鱼类区系变动及其驱动力分析. 首都师范大学学报: 自然科学版, 2012, **33**(4): 32-37.]
- [46] Pauly DV, Christensen J, Dalsgaard R *et al.* Fishing down marine food webs. *Science*, 1998, **279**(5352): 860-863. DOI: 10.1126/science.279.5352.860.
- [47] Zhang B, Tang QS. Study on trophic level of important resources species at high trophic levels in the Bohai sea, Yellow Sea and East China sea. *Advances in Marine Science*, 2004, **22**(4): 393-404. [张波, 唐启升. 渤、黄、东海高营养层次重要生物资源种类的营养级研究. 海洋科学进展, 2004, **22**(4): 393-404.]

- [48] Wu XB. Change of Hongze Lake over 60 years. *China Water Resources*, 2009, (14): 21-23. [吴晓兵. 洪泽湖 60 年的变迁. 中国水利, 2009, (14): 21-23.]
- [49] Liu WL, Deng W, Wang GX *et al.* Aquatic macrophyte status and variation characteristics in the past 50 years in Hongzehu Lake. *Journal of Hydroecology*, 2009, **30**(6): 1-8. DOI: 10.15928/j.1674-3075.2009.06.001. [刘伟龙, 邓伟, 王根绪等. 洪泽湖水生植被现状及过去 50 多年的变化特征研究. 水生态学杂志, 2009, **30**(6): 1-8.]
- [50] Spangler GR, Payne NR, Thorpe JE *et al.* Responses of percids to exploitation. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, 1977, **34**(10): 1983-1988. DOI: 10.1139/177-265.
- [51] van Walraven L, Mollet FM, van Damme CJG *et al.* Fisheries-induced evolution in growth, maturation and reproductive investment of the sexually dimorphic North Sea plaice (*Pleuronectes platessa* L.). *Journal of Sea Research*, 2010, **64**(1/2): 85-93. DOI: 10.1016/j.seares.2009.07.003.
- [52] Shan XJ, Hu ZJ, Shao CW *et al.* Progress in the study of fishing-induced evolution of fish biological characteristics. *Progress in Fishery Sciences*, 2020, **41**(3): 165-175. [单秀娟, 胡芷君, 邵长伟等. 捕捞诱导鱼类生物学特征进化研究进展. 渔业科学进展, 2020, **41**(3): 165-175.]
- [53] Jiang GF, He XF. Status of fish resources in the lower reaches of the Jialing River. *Freshwater Fisheries*, 2008, **38**(2): 3-7. [蒋国福, 何学福. 嘉陵江下游鱼类资源现状调查. 淡水渔业, 2008, **38**(2): 3-7.]
- [54] Zhu XG, Fang YY, Yan LJ *et al.* The ecological strategy evolution of marine fishes under high intensity fishing environment. *Bulletin of Science and Technology*, 2009, **25**(1): 51-55. [朱晓光, 房元勇, 严力蛟等. 高捕捞强度环境下海洋鱼类生态对策的演变. 科技通报, 2009, **25**(1): 51-55.]
- [55] Brandl SJ, Emslie MJ, Ceccarelli DM *et al.* Habitat degradation increases functional originality in highly diverse coral reef fish assemblages. *Ecosphere*, 2016, **7**(11): 1-19. DOI: 10.1002/ecs2.1557.
- [56] Wang QS. Study on the fish fauna of Chaohu Lake. *Journal of Anhui University: Natural Science*, 1987, (2): 70-78. [王岐山. 巢湖鱼类区系研究. 安徽大学学报: 自然科学版, 1987, (2): 70-78.]
- [57] Song TX, Zhang GH, Chang JB *et al.* Fish diversity in Honghu Lake. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1999, **10**(1): 86-90. [宋天祥, 张国华, 常剑波等. 洪湖鱼类多样性研究. 应用生态学报, 1999, **10**(1): 86-90.]
- [58] Mouillot D, Graham NAJ, Villéger S *et al.* A functional approach reveals community responses to disturbances. *Trends in Ecology & Evolution*, 2013, **28**(3): 167-177. DOI: 10.1016/j.tree.2012.10.004.
- [59] Fischer J, Lindenmayer DB. Landscape modification and habitat fragmentation; A synthesis. *Global Ecology and Biogeography*, 2007, **16**(3): 265-280. DOI: 10.1111/j.1466-8238.2007.00287.x.
- [60] Ding CZ, Jiang XM, Xie ZC *et al.* Seventy-five years of biodiversity decline of fish assemblages in Chinese isolated plateau lakes; Widespread introductions and extirpations of narrow endemics lead to regional loss of dissimilarity. *Diversity and Distributions*, 2017, **23**(2): 171-184. DOI: 10.1111/ddi.12507.
- [61] Campbell SE, Mandrak NE. Temporal dynamics of taxonomic homogenization in the fish communities of the Laurentian Great Lakes. *Diversity and Distributions*, 2019, **25**(12): 1870-1878. DOI: 10.1111/ddi.12986.
- [62] Toussaint A, Beauchard O, Oberdorff T *et al.* Historical assemblage distinctiveness and the introduction of widespread non-native species explain worldwide changes in freshwater fish taxonomic dissimilarity. *Global Ecology and Biogeography*, 2014, **23**(5): 574-584. DOI: 10.1111/geb.12141.
- [63] Toussaint A, Charpin N, Beauchard O *et al.* Non-native species led to marked shifts in functional diversity of the world freshwater fish faunas. *Ecology Letters*, 2018, **21**(11): 1649-1659. DOI: 10.1111/ele.13141.
- [64] Ministry of Water Resources of China ed. China water resources bulletin (2003-2012). Beijing: China Water and Power Press, 2004-2013. [中华人民共和国水利部. 中国水资源公报(2003-2012). 北京: 水利水电出版社, 2004-2013.]
- [65] Cao WX. Current status and protection countermeasures of fish resources in the Yangtze River. *Jiangxi Fishery Sciences and Technology*, 2011, (2): 1-4. [曹文宣. 长江鱼类资源的现状与保护对策. 江西水产科技, 2011, (2): 1-4.]

附表 I 东部泛滥平原 11 个湖泊历史(1950—1981 年)和当前(1992—2018 年)
湖泊基本信息和鱼类数据来源

Attached Tab. I Background information and fish data sources in historical (1950–1981) and
current (1992–2018) periods in the 11 studied in eastern plain lakes

湖泊名称	经度	纬度	面积/km ²		参考文献		阻隔时间
			历史	现在	历史	现在	
鄱阳湖	115°49'~116°46'E	28°24'~29°46'N	4554.7	2933	[22]	[20, 22]	
洞庭湖	111°53'~113°05'E	28°44'~29°35'N	2625	2432.5	[14]	[5, 12]	
太湖	119°52'~120°36'E	30°55'~31°32'N	2505.2	2338	[11]	[9, 24]	1958—1985 年
洪泽湖	118°10'~118°52'E	33°06'~33°40'N	2069	1576.9	[1, 6]	[6, 10]	1953 年—1970s
巢湖	117°16'~117°51'E	31°25'~31°42'N	769.5	769.5	[18]	[3]	1956—1969 年
洪湖	113°13'~113°33'E	29°42'~29°62'N	600	348.2	[13]	[8]	1958 年—1970s
梁子湖	114°21'~114°39'E	30°05'~30°18'N	482.5	285	[7]	[21]	1972—1979 年
菜子湖	117°01'~117°08'E	30°43'~30°57'N	192.1	192.1	[2]	[15-16]	1959 年
涨渡湖	114°33'~114°57'E	30°36'~30°48'N	155	35.2	[17]	[17]	1957 年—1970s
东湖	114°21'~114°28'E	30°31'~30°36'N	21.6	33.7	[4]	[4]	1960s
五里湖	120°15'E	31°31'N	10.2	8	[19]	[23]	1958—1985 年

参考文献

- [1] Compile Group of the Fisheries History of the Hongze Lake ed. The fisheries history of the Hongze Lake. Nanjing: Jiangsu Scientific Technology Press, 1990. [《洪泽湖渔业史》编写组. 洪泽湖渔业史. 南京: 江苏科学技术出版社, 1990.]
- [2] Fu CZ. Biodiversity pattern and resources of fish in the Yangtze River basin with discussion on biodiversity and phylogeny of silver fish [Dissertation]. Shanghai: Fudan University, 2003. [傅萃长. 长江流域鱼类多样性空间格局与资源分析——兼论银鱼的生物多样性与系统发育[学位论文]. 上海: 复旦大学, 2003.]
- [3] Guo LG, Xie P, Ni YL *et al.* The status of fishery resources of Lake Chaohu and its response to eutrophication. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2007, **31**(5): 700-705. [过龙根, 谢平, 倪乐意等. 巢湖渔业资源现状及其对水体富营养化的响应研究. 水生生物学报, 2007, **31**(5): 700-705.]
- [4] Huang GT, Xie P. Changes in the structure of fish community with the analysis on the possible reasons in Lake Donghu, Wuhan. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1996, **20**(Suppl): 38-46. [黄根田, 谢平. 武汉东湖鱼类群落结构的变化及其原因的分析. 水生生物学报, 1996, **20**(suppl): 38-46.]
- [5] Jiang ZG, Cao L, Zhang E. Spatio-temporal variations of fish assemblages in the Dongting Lake. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2019, **43**(S1): 42-48. [蒋忠冠, 曹亮, 张鹗. 洞庭湖鱼类的群落结构及其时空动态. 水生生物学报, 2019, **43**(S1): 42-48.]
- [6] Lin ML, Zhang TL, Ye SW *et al.* Status of fish resources, historical variation and fisheries management strategies in Hongze Lake. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2013, **37**(6): 1118-1127. DOI: 10.7541/2013.152. [林明利, 张堂林, 叶少文等. 洪泽湖鱼类资源现状、历史变动和渔业管理策略. 水生生物学报, 2013, **37**(6): 1118-1127.]
- [7] Liu JK. Physical environment of the Liangzi Lake, and its problem of fishery resources. Proceedings of the Second Conference of the Western Pacific Fishing Commission. Beijing: Science Press, 1959: 52-64.
- [8] Lu S, Hu JH, Xiao CY *et al.* Fish species composition in Honghu Lake and estimation of influencing factors. *Chinese Journal of Wildlife*, 2006, **27**(6): 14-17. [卢山, 胡军华, 肖成云等. 洪湖鱼类物种组成及影响因素评价. 野生动物, 2006, **27**(6): 14-17.]
- [9] Mao ZG, Gu XH, Zeng QF *et al.* Community structure and diversity of fish in Lake Taihu. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, **30**(12): 2836-2842. DOI: 10.13292/j.1000-4890.2011.0435. [毛志刚, 谷孝鸿, 曾庆飞等. 太湖鱼类群落结构及多样性. 生态学杂志, 2011, **30**(12): 2836-2842.]
- [10] Mao ZG, Gu XH, Gong ZJ *et al.* The structure of fish community and changes of fishery resources in Lake Hongze. *J Lake Sci*, 2019, **31**(4): 1109-1119. DOI: 10.18307/2019.0401. [毛志刚, 谷孝鸿, 龚志军等. 洪泽湖鱼类群落结构及其

资源变化. 湖泊科学, 2019, **31**(4): 1109-1119.]

- [11] Ni Y, Zhu CD eds. Fishes of the Taihu Lake. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 2005. [倪勇, 朱成德. 太湖鱼类志. 上海: 上海科学技术出版社, 2005.]
- [12] Ru HJ, Liu XQ, Huang XR *et al.* Diversity of fish species and its spatio-temporal variations in Lake Dongting, a large Yangtze-connected lake. *J Lake Sci*, 2008, **20**(1): 93-99. DOI: 10.18307/2008.0114. [茹辉军, 刘学勤, 黄向荣等. 大型通江湖泊洞庭湖的鱼类物种多样性及其时空变化. 湖泊科学, 2008, **20**(1): 93-99.]
- [13] Song TX, Zhang GH, Chang JB *et al.* Fish diversity in Honghu Lake. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1999, **10**(1), 86-90. DOI: <http://ir.ihb.ac.cn/handle/152342/3718>. [宋天祥, 张国华, 常剑波等. 洪湖鱼类多样性研究. 应用生态学报, 1999, **10**(1), 86-90.]
- [14] Tang JH, Qian MQ. Fish fauna of Lake Dongting. *Freshwater Fisheries*, 1979, **10**: 24-32. [唐家汉, 钱名全. 洞庭湖的鱼类区系. 淡水渔业, 1979, **10**: 24-32.]
- [15] Wang C, Zhou LZ, Dai BG *et al.* The impacts of water level fluctuations between wet and dry seasons on taxonomic and functional diversity of fish communities in the ecotone floodplain of Lake Caizi. *J Lake Sci*, 2019, **31**(5): 1403-1414. DOI: 10.18307/2019.0501. [王朝, 周立志, 戴秉国等. 水位洪枯变化对菜子湖江湖过渡带鱼类物种和功能多样性的影响. 湖泊科学, 2019, **31**(5): 1403-1414.]
- [16] Wang CX, Wang ZS, Xu LJ *et al.* Dynamics of fish community structure in Lake Caizi and its driving factors. *Journal of Capital Normal University: Natural Science Edition*, 2012, **33**(4): 32-37. DOI: 10.19789/j.1004-9398.2012.04.008. [王晨旭, 王忠锁, 许隆君等. 菜子湖鱼类区系变动及其驱动力分析. 首都师范大学学报: 自然科学版, 2012, **33**(4): 32-37.]
- [17] Wang LM, Hu HJ, Wang D. Ecological impacts of disconnection from the Yangtze on fish resources in Zhangdu Lake. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2005, **14**(3): 287-292. [王利民, 胡慧建, 王丁. 江湖阻隔对涨渡湖区鱼类资源的生态影响. 长江流域资源与环境, 2005, **14**(3): 287-292.]
- [18] Wang QS. Study on ichthyological fauna of Chao Lake. *Journal of Anhui University: Natural Sciences*, 1987, **11**(2): 70-78. [王岐山. 巢湖鱼类区系研究. 安徽大学学报: 自然科学版, 1987, **11**(2): 70-78.]
- [19] Wu XW. Limnological survey of Lake Wuli in year 1951-Part 5, fish fauna analysis. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1962, **1**: 109-112. [伍献文. 五里湖 1951 年湖泊学调查五、鱼类区系及其分析. 水生生物学报, 1962, **1**: 109-113.]
- [20] Yang SR, Li MZ, Zhu QG *et al.* Spatial and temporal variations of fish assemblages in Poyanghu Lake. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, **24**(1): 54-64. [杨少荣, 黎明政, 朱其广等. 鄱阳湖鱼类群落结构及其时空动态. 长江流域资源与环境, 2015, **24**(1): 54-64.]
- [21] Ye SW. Studies on fish communities and trophic network model of shallow lakes along the middle reach of the Yangtze River [Dissertation]. Wuhan: Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, 2007. [叶少文. 长江中游浅水湖泊鱼类群落和系统营养网络模型的研究[学位论文]. 武汉: 中国科学院水生生物研究所, 2007.]
- [22] Zhang TL, Li ZJ. Fish resources and fishery utilization of Lake Poyang. *J Lake Sci*, 2007, **19**(4): 434-444. DOI: 10.18307/2007.0412. [张堂林, 李钟杰. 鄱阳湖鱼类资源及渔业利用. 湖泊科学, 2007, **19**(4): 434-444.]
- [23] Zhang XZ, Hu HY, Cao XD *et al.* Spatial-temporal analysis of biodiversity and community structure in fishes in Wuli Lake. *Journal of Dalian Ocean University*, 2010, **25**(4): 314-319. [张宪中, 胡海彦, 曹晓东等. 五里湖鱼类资源群落结构及生物多样性的时空分析. 大连海洋大学学报, 2010, **25**(4): 314-319.]
- [24] Zhu SQ, Liu ZW, Gu XH. Changes of the fish fauna and fish yield analysis in Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2007, **19**(6): 664-669. DOI: 10.18307/2007.0607. [朱松泉, 刘正文, 谷孝鸿. 太湖鱼类区系变化和渔获物分析. 湖泊科学, 2007, **19**(6): 664-669.]

附表 II 11 个湖泊鱼类的种类及分布*

Attached Tab. II Species occurrence of fish in the 11 lakes

物种名	鄱阳湖		洞庭湖		巢湖		洪泽湖		太湖		洪湖		涨渡湖		东湖		梁子湖		菜子湖		五里湖		
	H	C	H	C	H	C	H	C	H	C	H	C	H	C	H	C	H	C	H	C	H	C	
中华鲟 <i>Acipenser sinensis</i>	+		+	+	+				+					+								+	
白鲟 <i>Psephurus gladius</i>	+		+			+								+									
前颌间银鱼 <i>Hemisalax prognathus</i>																+		+					
短吻间银鱼 <i>Hemisalax brachyrostralis</i>	+	+	+			+		+	+	+	+	+		+	+					+		+	
大银鱼 <i>Protosalax hyalocranius</i>			+	+		+	+	+	+	+							+					+	+
太湖新银鱼 <i>Neosalax taihuensis</i>	+	+				+					+	+	+	+						+		+	
陈氏新银鱼 <i>Neosalax tangkahkeii</i>				+	+	+		+	+	+						+						+	
乔氏新银鱼 <i>Neosalax jordani</i>	+						+	+	+	+							+	+					
寡齿新银鱼 <i>Neosalax oligodontis</i>			+	+	+						+						+		+	+	+	+	
日本鳗鲡 <i>Anguilla japonica</i>	+	+	+		+	+	+		+	+	+		+		+	+	+	+	+	+	+	+	+
花鳗鲡 <i>Anguilla marmorata</i>							+																
鲟 <i>Tenualosa reevesii</i>	+	+	+		+				+				+		+		+		+		+		
刀鲚 <i>Coilia nasus</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+		+	+	+	+	+	+
宽鳍鱮 <i>Zacco platypus</i>	+	+	+	+					+												+	+	
马口鱼 <i>Opsariichthys bidens</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+		+				+		+		+		+	+	
中华细鲫 <i>Aphyocypris chinensis</i>									+	+											+	+	
鳊 <i>Elopichthys bambusa</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
赤眼鳟 <i>Squaliobarbus curriculus</i>	+	+	+		+		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
鲟 <i>Luciobrama macrocephalus</i>	+	+	+		+				+	+					+		+		+	+	+	+	
鳊 <i>Ochetobius elongates</i>	+	+	+		+		+		+		+	+	+		+	+	+		+		+	+	
尖头鳊 <i>Phoxinus oxycephalus</i>	+								+														
青鱼 <i>Mylopharyngodon piceus</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
草鱼 <i>Ctenopharyngodon idellus</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
鳊 <i>Parabramis pekinensis</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
团头鲂 <i>Megalobrama amblycephala</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
鲂 <i>Megalobrama skolkovii</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+		+		+	+	+	+	+	+	
伍氏华鳊 <i>Sinibrama wui</i>				+																			
似鱼乔 <i>Toxabramis swinhonis</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
贝氏鲮 <i>Hemiculter bleekeri</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+	+			+	+	+	+	+	+	
鲮 <i>Hemiculter leucisculus</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
红鳍原鲃 <i>Cultrichthys erythropterus</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
拟尖头鲃 <i>Culter oxycephaloides</i>	+	+	+	+	+								+		+		+						
翘嘴鲃 <i>Culter alburnus</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
蒙古鲃 <i>Culter mongolicus</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+			+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
尖头鲃 <i>Culter oxycephalus</i>	+	+			+				+				+			+	+	+					
达氏鲃 <i>Culter dabryi</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
飘鱼 <i>Pseudolaubuca sinensis</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+		+		+		+	+	+	+	+	+	+	+	+
寡鳞飘鱼 <i>Pseudolaubuca engraulis</i>	+	+	+	+	+	+		+				+	+			+							
黄尾鲮 <i>Xenocypris davidi</i>	+	+	+	+	+			+		+	+				+	+	+	+	+	+	+	+	+
银鲮 <i>Xenocypris argentea</i>	+	+	+	+	+		+	+	+		+	+	+	+		+	+	+	+	+	+	+	+
细鳞鲮 <i>Xenocypris microlepis</i>	+	+	+	+	+		+	+	+		+		+		+	+	+	+	+	+	+	+	+
似鲮 <i>Pseudobrama simoni</i>	+	+	+	+	+		+	+	+	+	+				+	+	+	+	+	+	+	+	+
湖北鲮 <i>Xenocypris hupeinensis</i>													+	+			+	+	+	+	+	+	

续附表 II

物种名	鄱阳湖		洞庭湖		巢湖		洪泽湖		太湖		洪湖		涨渡湖		东湖		梁子湖		菜子湖		五里湖	
	H	C	H	C	H	C	H	C	H	C	H	C	H	C	H	C	H	C	H	C	H	C
中华刺鳅 <i>Sinobdella sinensis</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
青鳉 <i>Oryzias latipes</i>	+	+	+	+		+	+		+	+	+	+	+		+		+	+	+	+	+	+
间下鱊 <i>Hyporhamphus intermedius</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+			+	+	+	+	+	+
鲮 <i>Liza haematocheila</i>									+													
鲮 <i>Mugil cephalus</i>						+	+		+													
松江鲈 <i>Trachidermus fasciatus</i>									+													
长体鳊 <i>Siniperca roulei</i>	+	+	+		+				+											+	+	
鳊 <i>Siniperca chuatsi</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
大眼鳊 <i>Siniperca kneri</i>	+	+	+	+	+		+	+	+	+	+	+	+	+			+	+				
斑鳊 <i>Siniperca scherzeri</i>	+	+	+	+					+				+	+	+		+	+				+
波纹鳊 <i>Siniperca undulata</i>	+	+																				
小黄鲷鱼 <i>Micropercops swinhonis</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
中国花鲈 <i>Lateolabrax japonicus</i>									+													
褐塘鳢 <i>Eleotris fusca</i>	+				+													+				
河川沙塘鳢 <i>Odontobutis potamophila</i>				+	+		+	+	+	+								+	+			
沙塘鳢 <i>Odontobutis obscura</i>	+	+				+						+	+	+	+	+				+	+	+
子陵吻虾虎鱼 <i>Rhinogobius giuriuns</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
葛氏鲈塘鳢 <i>Percottus glenii</i>						+																
波氏吻鰕虎 <i>Rhinogobius cliffordpopei</i>			+	+	+		+	+	+				+						+	+		
须鰕鰕虎鱼 <i>Taenioides cirratus</i>							+		+													+
粘皮鰕鰕虎 <i>Mugilogobius myxodermus</i>			+	+																		
拉氏狼牙鰕虎鱼 <i>Odontamblyopus lacepedii</i>							+	+	+	+												
纹縞鰕虎鱼 <i>Tridentiger trignocephalus</i>																						+
乌鳢 <i>Channa argus</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
月鳢 <i>Channa asiatica</i>	+	+							+													
圆尾斗鱼 <i>Macropodus chinensis</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+	+	+		+	+	+	+	+	+
叉尾斗鱼 <i>Macropodus opercularis</i>	+																					
香鳊 <i>Callionymus olidus</i>									+													
窄体舌鳎 <i>Cynoglossus gracilis</i>									+													
三线舌鳎 <i>Cynoglossus trigrammus</i>	+													+								
弓斑东方鲀 <i>Takifugu ocellatus</i>	+			+														+				+
红鳍东方鲀 <i>Takifugu rubripes</i>					+																	
暗色东方鲀 <i>Takifugu obscurus</i>	+	+	+		+		+		+		+		+		+					+		

* H 和 C 分别代表历史时期和现在时期.

附表 III 9 个阻隔湖泊和 2 个连通湖泊性状参数和多样性指数在历史和现在两个时期的变化
 Attached Tab. III Taxonomic and functional diversity indices, traits values in
 2 lakes and 9 lakes for historical period and current

		2 个湖泊		9 个湖泊	
		历史	现在	历史	现在
食性	杂食性	36(31.81%)	28(29.82%)	24.22(30.23%)	16.33(31.67%)
	草食性	10(8.81%)	7.5(8.03%)	5.88(7.41%)	4.89(9.50%)
	浮游生物食性	11(9.70%)	10.5(11.17%)	10.78(13.67%)	8.33(15.87%)
	无脊椎动物食性	7(6.17%)	6.5(6.96%)	4.89(6.20%)	3.78(7.35%)
	鱼食性	37(32.60%)	29.5(31.27%)	24.78(31.10%)	13.22(25.24%)
	腐食性	12.5(11.01%)	12(12.75%)	9(11.30%)	5.44(10.38)
洄游习性	河海洄游	7.5(6.58%)	3.5(3.71%)	6.33(7.91%)	2.44(4.46%)
	河湖洄游	32(28.23%)	25.5(27.18%)	24.89(31.77%)	14.56(28.09%)
	非洄游	74(65.19%)	65(69.12%)	48.33(60.32%)	35(67.45%)
体型	圆柱形	30.5(26.93%)	26.5(28.13%)	21.67(27.15%)	13.22(25.54%)
	侧扁形	67.5(59.43%)	55.5(59.07%)	47.33(59.67%)	31.33(60.48%)
	椭圆形	9.5(8.34%)	8(8.53%)	5.89(7.31%)	4.44(8.23%)
	似鳗形	1(0.88%)	0.5(0.51%)	1.11(1.41%)	0.56(1.03%)
	梭形	5(4.41%)	3.5(3.76%)	3.56(4.47%)	2.44(4.71%)
	最大体长/cm	37.66	35.13	41.32	44.95
	营养级	3.19	3.17	3.14	3.10
	生长速率/a ⁻¹	0.53	0.58	0.57	0.65
	初次性成熟时间/a	3.17	2.98	3.23	3.22
	初次性成熟体长/cm	20.89	19.77	22.54	23.86
	最大寿命/a	12.61	11.85	13.19	13.52
多样性指数	物种丰富度	113.50	94.00	79.56	52.11
	功能丰富度	0.927	0.650	0.725	0.489
	功能均匀度	0.468	0.465	0.502	0.518
	功能离散度	0.874	0.861	0.872	0.856
	功能分散度	0.647	0.633	0.659	0.643

* 表中括号外的数字表示该性状鱼类平均物种数;括号内的百分比表示该性状鱼类占总物种数百分比的均值.