J. Lake Sci.(湖泊科学), 2026, 38(3):000-000
DOI 10.18307/2026.0336

江湖阻隔对长江中下游湖泊软体动物群落分类多样性的影响*

马强强[1]，郑 鹏[1]，张 昆[2]，张 飞[1]，蒋小明[1**]
（1：西安理工大学旱区水工程生态环境全国重点实验室，西安 710048）
（2：云南大学生态环境学院，昆明 650091）

摘 要：长江中下游湖泊区是我国淡水湖群分布集中的地区之一，其生物多样性因长期江湖阻隔而面临严峻挑战。尽管已有很多研究分析了江湖阻隔对水生生物多样性的影响，但在长时间尺度上分析其对软体动物群落分类多样性的研究仍然缺乏。本研究选取长江中下游地区的 7 个典型湖泊（5 个阻隔湖泊与 2 个连通湖泊），通过历史时期与现在时期的对比，探究软体动物群落的分类多样性指数的变化。结果表明，7 个湖泊的软体动物物种数由江湖阻隔前的 152 种减少为江湖阻隔后的 83 种，平均物种数由 57.7 种减少到 30.1 种（减少 47.8%）。从历史时期到现在时期，基于所有软体动物、腹足纲和双壳纲的平均分类差异指数 Δ^+和分类差异变异指数 Λ^+基本均无显著变化，仅腹足纲的 Δ^+指数显著增高。相比两个保持连通的湖泊，5 个阻隔湖泊的 Δ^+指数和 Λ^+指数发生了更明显的变化：所有软体动物的 Δ^+指数随着时间的推移显著增高（$t=-3.551$，$p=0.024$），Λ^+指数近显著降低（$t=2.297$，$p=0.083$）；腹足纲的 Δ^+指数也显著增高（$t=-2.774$，$p=0.050$）。此外，基于 Δ^+和 Λ^+指数的漏斗图分析中，阻隔湖泊多在 95%置信区间之内，而连通湖泊在 95%置信区间之外。阻隔湖泊中软体动物群落 Δ^+指数的增高和 Λ^+指数的下降，均主要是由于同属且特有的物种（如石田螺属 *Sinotaia*、田螺属 *Cipangopaludina*、丽蚌属 *Lamprotula*、尖丽蚌属 *Aculamprotula* 等）的大量消失所导致。这些同属特有物种的消失，应被视为江湖阻隔引起软体动物多样性显著下降的警示信号。本研究可为江湖阻隔背景下软体动物资源和多样性的管理、保护以及长江中下游湖泊生态系统的生态修复提供科学依据。
关键词：长江中下游湖泊；江湖阻隔；分类多样性；软体动物群落；时间变化

Impact of river-lake disconnection on the taxonomic diversity of molluscan communities in lakes of the middle and lower reaches of the Yangtze River

Ma Qiangqiang[1]，Zheng Peng[1]，Zhang Kun[2]，Zhang Fei[1]，Jiang Xiaoming[1*]
（1：*State Key Laboratory of Water Engineering Ecology and Environment in Arid Area，Xi'an University of Technology，Xian* 710048，*P.R.China*）
（2：*School of Ecology and Environmental Science，Yunnan University，Kunming* 650091，*P.R.China*）

Abstract: The middle and lower reaches of the Yangtze River host a significant concentration of freshwater lakes in China, where biodiversity faces serious threats from long-term river-lake disconnection. Although previous studies have explored the effects of disconnection on aquatic biodiversity, few have focused on long-term changes in the taxonomic distinctness of mollusk communities. To address this gap, this study investigated seven representative lakes (five disconnected and two connected) in the region, comparing historical and contemporary data to evaluate changes in taxonomic distinctness indices of mollusks. Results showed a marked decline in total

* 2025-04-26 收稿；2025-07-11 收修改稿。
国家自然科学基金项目(32371744)资助。
** 通信作者；E-mail：jiangxm@xaut.edu.cn

species richness, from 152 to 83 species, with average richness per lake decreasing from 57.7 to 30.1 (a 47.8% reduction). From historical to contemporary periods, the average taxonomic distinctness (Δ^+) and variation in taxonomic distinctness (Λ^+) remained relatively stable for overall mollusks, gastropods, and bivalves, except for a significant increase in gastropod Δ^+. Compared to connected lakes, disconnected lakes exhibited more pronounced changes in Δ^+ and Λ^+: Δ^+ increased significantly for overall mollusks ($t = -3.551$, $p = 0.024$) and gastropods ($t = -2.774$, $p = 0.050$), while Λ^+ decreased significantly for overall mollusks ($t = 2.297$, $p = 0.083$). In funnel plots based on Δ^+ and Λ^+, disconnected lakes mostly fell within the 95% confidence interval, whereas connected lakes lay outside it. The observed increase in Δ^+ and decrease in Λ^+ in disconnected lakes were primarily driven by the loss of congeneric and endemic species—particularly within genera such as *Sinotaia, Cipangopaludina, Lamprotula*, and *Aculamprotula*. The decline of these endemic taxa from families *Viviparidae* and *Unionidae* should be considered a critical warning of biodiversity loss due to river-lake disconnection. These findings offer a scientific basis for mollusk resource management, biodiversity conservation, and ecological restoration of lakes in the middle and lower Yangtze River under sustained disconnection conditions.
Keywords: The Yangtze River; River-lake disconnection; Taxonomic distinctness diversity; Molluscan community; Temporal dynamic

长江中下游冲积-湖积平原作为我国淡水湖泊核心分布区，具有独特的湿地生态系统特征。该区域不仅集中了我国四大淡水湖（鄱阳湖、洞庭湖、太湖、巢湖），更以高密度的湖泊群承载着关键生态功能[1]。然而，日益加剧的人类活动，如闸坝建设、栖息地破碎化、水体污染、生物入侵及过度捕捞等已引发诸多生态问题，具体表现为：水文情势紊乱、湖面萎缩、水质恶化及生物多样性层级衰减（软体动物、鱼类以及其他水生生物类群的多样性和资源量下降）[1, 2]。研究表明，江湖水文连通对维持长江中下游湖泊浮游生物、大型水生植物、鱼类以及软体动物有重要作用[3]，而连通性中断将扰乱自然水流体制，改变水深、溶解氧、光照等关键生境要素，进而直接或间接导致物种多样性下降，改变生物群落结构[4]。

自 20 世纪 50 年代以来，长江中下游区域开展了大规模水利工程建设和水文调控活动，中断了江湖生态系统连通性，导致湖泊-河流复合生态系统的结构与功能发生显著退化。这种生境破碎化过程不仅造成水生生物多样性持续衰减，更使本已脆弱的软体动物群落在近二十年间面临更为严峻的生存危机，由此很有必要开展软体动物多样性对江湖阻隔的响应研究[5, 6]。作为动物界物种数量仅次于节肢动物的第二大门类，软体动物既是水生生态系统健康状况的敏感指示类群，也是生物多样性构成中极具研究价值的代表性类群[7]。在淡水生态系统中，由腹足纲（Gastropoda）和双壳纲（Bivalvia）构成的淡水软体动物已记录物种逾 6000 种。软体动物在水质净化、物质循环及能量传递等方面都扮演着重要的角色，从而能有效地改善水质、促进营养物质循环及为鱼类提供食物资源，在维持淡水生态系统稳定性方面发挥着不可替代的作用[8, 9]。尽管研究人员已对淡水软体动物开展了大量生物学与生态学研究，但其生物多样性特征及其维持机制的相关研究仍显不足[10, 11]。

当前生物多样性评估体系主要依托物种多样性指数，如物种数（species richness）、均匀度（evenness）等传统生物指数构建[12]。尽管这些多样性指数应用广泛，但在实际应用中，它们对所有物种都是同等对待，未考虑物种间的分类关系[13, 14]。除此之外，采样强度、方法标准及生境异质性等外部因素对指数计算结果产生显著干扰，导致难以开展跨区域、跨时序的生物多样性数据的比较[15]。这些缺陷严重影响了对江湖阻隔背景下软体动物多样性变化规律的分析。

在此背景下，Warwick 和 Clarke[16, 17]提出的分类学差异性指数（Taxonomic distinctness indices，TD 指数）为解决上述问题提供了方案。其中，平均分类差异性指数（Average taxonomic distinctness index，Δ^+）与分类学差异性变异指数（Variation in taxonomic distinctness index，Λ^+）应用最为广泛，因为它们的计算仅需有-无（Presence-Absence）类型的数据，这使得它们几乎不受样本大小和采样强度的影响[18]。这种特性使其在处理历史数据、简单有-无数据以及整合不同来源的数据时发挥重要的作用。它们不仅能够反映物种的丰富度，还与系统发育多样性紧密相关[19]。基于此，分类多样性研究及其核心指数 Δ^+和 Λ^+

在生物多样性领域的重要性日益凸显，其应用范围已从基础生态评估延伸至多尺度保护实践领域[20, 21]。该指数体系弥补了传统方法面对的一些问题（如样本大小不一、采样强度不同以及数据类型复杂等）[22]，为生物多样性研究提供了一种潜在的分析工具，其在特定生态系统的多样性评估中展现出较好的有效性。

本研究以长江中下游通江湖泊群为研究区域，选取历史上均与长江干流保持自然连通的 7 个典型湖泊为研究对象。现阶段该区域仅鄱阳湖与洞庭湖维持自然连通状态，其余 5 个湖泊因闸坝阻隔效应已丧失与干流的连通。通过分析这 7 个湖泊在历史时期和现在时期软体动物群落分类多样性指数的差异，探讨江湖阻隔对湖泊软体动物分类多样性的影响，旨在为区域内湖泊水生生物资源管理、受损湖泊生态系统功能修复及江湖复合生态系统保护策略的制定构建科学基础。

1 材料与方法

1.1 研究区域及其软体动物调查

本研究选取了长江中下游地区的 7 个湖泊，即鄱阳湖、洞庭湖、太湖、巢湖、洪湖东湖和花马湖，这些湖泊具有较好的代表性和研究基础。历史上，长江中下游的湖泊都与干流相连，然而，在过去的 50 多年来，由于闸坝建设、围湖造田等原因，区域内的绝大多数湖泊均失去了与干流的自然连通（目前只有鄱阳湖和洞庭湖仍然保持与长江干流的自然连通），而成为了阻隔湖泊。此外，水污染加剧、过渡捕捞等人类干扰也对区域内湖泊生态系统造成了不利影响[4, 23]。在诸多威胁因素中，江湖阻隔被认为是造成区域内湖泊水生生物多样性下降的主要原因之一[24]。本研究涉及的这 7 个湖泊，目前鄱阳湖和洞庭湖仍然为连通湖泊，而其余 5 个湖泊已成为阻隔湖泊。

本研究中，7 个湖泊软体动物数据来源于作者之前发表的论文中软体动物的数据集[25]。该数据集包含了已发表的科学报告、书籍、网上数据、出版文献和调查报告等资料（详见附表 1）。同时，对搜集到的有/无数据中的软体动物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。考虑到阻隔时间的变化差异，将软体动物数据分为两个时期：历史时期（1956-1982 年）和现在时期（2003-2018 年）。对于每个时期，收集所有可用数据以建立详尽的物种列表。两个时期数据都来自采样力度充足的多年度、多季节、全湖尺度的调查。同时，软体动物调查使用的采集工具主要是抄网、蚌耙、彼得森采泥器再结合手拣，并且每个湖泊在两个时期的采样力度足够，保证了软体动物有/无数据的可比性。

1.2 分类学差异性指数计算

物种多样性用物种数（species richness）来反映；分类学差异性指数（Taxonomic distinctness index）中的平均分类差异性（Δ^+）和分类学差异性变异（Λ^+）两个指数分析湖泊软体动物群落分类多样性变动。Δ^+是依据物种不同的分类阶元，根据物种有无数据对群落物种多样性进行评估，Δ^+值越小就表明群落中物种间的分类学关系越近[17]。Λ^+表示生物群落在等级分类学树中“均匀程度”，即群落物种间路径长度的方差，Λ^+值增大表明分类进化树变得不均匀，物种集中分布在少数分类单元，物种间亲缘关系较近[26, 27]。

$$\Delta^+ = \frac{2[\sum\sum_{i<j}\omega_{ij}]}{S(S-1)}$$

$$\Lambda^+ = \frac{2[\sum\sum_{i<j}(\omega_{ij}-\Delta^+)^2]}{S(S-1)}$$

式中，S为软体动物物种数，ω_{ij}为第 i 种和第 j 中软体动物在分类系统树中的路径长度。

根据 Clarke and Warwick 的方法，本研究中将分类树中最大的距离的权重 ω 设置为 100，每个分类等级的枝长享有同样的权重，一共采用了 6 个分类等级（即种、属、科、超科、目和纲）来进行 Δ^+和 Λ^+指数的计算。分别基于所有软体动物、腹足纲和双壳纲的数据计算了 Δ^+和 Λ^+指数。软体动物的分类等级信息参照 Bouchet et al（2017）[28]和 He&Zhuang（2013）[29]以及软体动物数据库（2021）。

1.3 数据分析

为了检验 Δ^+和 Λ^+的统计学意义，本研究采用零假设模型在区域的物种库中利用 10000 个随机抽样（在 PRIMER 6 软件中运行）统计 Δ^+和 Λ^+预测值及它们从物种库得出的期望值之间的差别，为所有软

体动物、腹足纲和双壳纲三个数据集构建 Δ^+和 Λ^+的漏斗图。这个区域的物种库由两个时期的软体动物物种组成。从区域物种库中随机抽取物种计算 Δ^+和 Λ^+，生成预测值 95%的置信区间，并比较观测值在置信区间中的位置。如果观测值在 95%置信区间之外，说明此时的分类差异性指数有显著上升或者降低的变化。使用独立样本 T 检验分析在历史时期和现在时期的 Δ^+和 Λ^+是否存在差异。Δ^+和 Λ^+指数的计算及漏斗图分析在软件 PRIMER 6（采用 DIVERSE >TAXDTEST 命令）中完成，独立样本 T 检验在 SPSS 19.0（Analyze > Compare Means > Paired-Samples T Test）软件中运行。

2 结果

2.1 历史时期与现在时期软体动物群落物种多样性差异

历史时期，湖泊和干流间水文连通丧失前，研究的 7 个湖泊种共有软体动物 152 种，隶属于 48 属、18 科、10 超科、10 目和 2 纲（表 1）。现在时期，有 83 个物种，属于 37 属、15 科、10 超科、8 目和 2 纲。随着时间的推移，发现有 69 个物种、12 属、3 科（椭螺科 Ancylidae、钉螺科 Hydrobiidae、琥珀螺科 Succineidae）、1 超科（琥珀螺超科 Succineoidea）和 1 目（柄眼目 Stylommatophora）的软体动物未出现（表 1）。

表 1 7 个湖泊在历史时期和现在时期软体动物群落包含的目、超科、科、属和种的数目

Tab.1 Number of orders, superfamilies, families, genera, and species in molluscan communities across seven lakes during historical and current periods.

湖泊	纲	历史时期					现在时期				
		目	超科	科	属	种	目	超科	科	属	种
鄱阳湖	总数	8	8	13	40	96	8	8	12	34	64
	腹足纲	4	4	8	18	42	4	4	7	13	21
	双壳纲	4	4	5	22	54	4	4	5	21	43
洞庭湖	总数	9	9	14	40	99	9	10	15	35	67
	腹足纲	4	4	8	18	49	4	5	9	15	29
	双壳纲	5	5	6	22	50	5	5	6	20	38
太湖	总数	9	9	11	29	46	9	9	11	22	28
	腹足纲	4	4	6	11	14	4	4	6	10	11
	双壳纲	5	5	5	18	32	5	5	5	12	17
巢湖	总数	8	8	10	21	32	5	5	5	8	9
	腹足纲	4	4	6	8	16	3	3	3	3	4
	双壳纲	4	4	4	13	16	2	2	2	5	5
洪湖	总数	8	8	11	25	43	7	7	10	14	18
	腹足纲	4	4	7	14	28	4	4	7	9	12
	双壳纲	4	4	4	11	15	3	3	3	5	6
东湖	总数	8	8	13	23	41	5	5	7	10	12
	腹足纲	5	5	10	17	35	3	3	5	7	9
	双壳纲	3	3	3	6	6	2	2	2	3	3
花马湖	总数	8	8	12	25	47	7	7	7	11	13
	腹足纲	4	4	8	14	35	4	4	4	5	7
	双壳纲	4	4	4	11	12	3	3	3	6	6

2.2 两个时期湖泊软体动物分类学差异性指数的变化

配对样本 t 检验显示，这 7 个湖泊所有软体动物（从 57.7 降为 30.1；$t = 12.581$，$p < 0.001$）以及腹足纲（从 31.3 降为 13.3；$t = 5.549$，$p = 0.001$）和双壳纲（从 26.4 降为 16.9；$t = 6.340$，$p = < 0.001$）的物种数均随着时间的推移显著降低（图 1a-c）。而对三个类群的 Δ^+和 Λ^+指数而言，除了腹足纲的 Δ^+指数随时间显著上升外（$t = -4.093$，$p = 0.006$），其余指数在两个时间段均无显著变化（$p > 0.20$）（图 1d-i）。当仅考虑五个阻隔湖泊时，所有软体动物的 Δ^+指数显著上升（$t = -3.551$，$p = 0.024$），Λ^+指数近显著水平地降低（$t = 2.297$，$p = 0.083$）（附图 1-d，1-g）。基于腹足纲 Δ^+指数（$t = -2.774$，$p = 0.050$）也随时间显著上升（附图 1-e）。

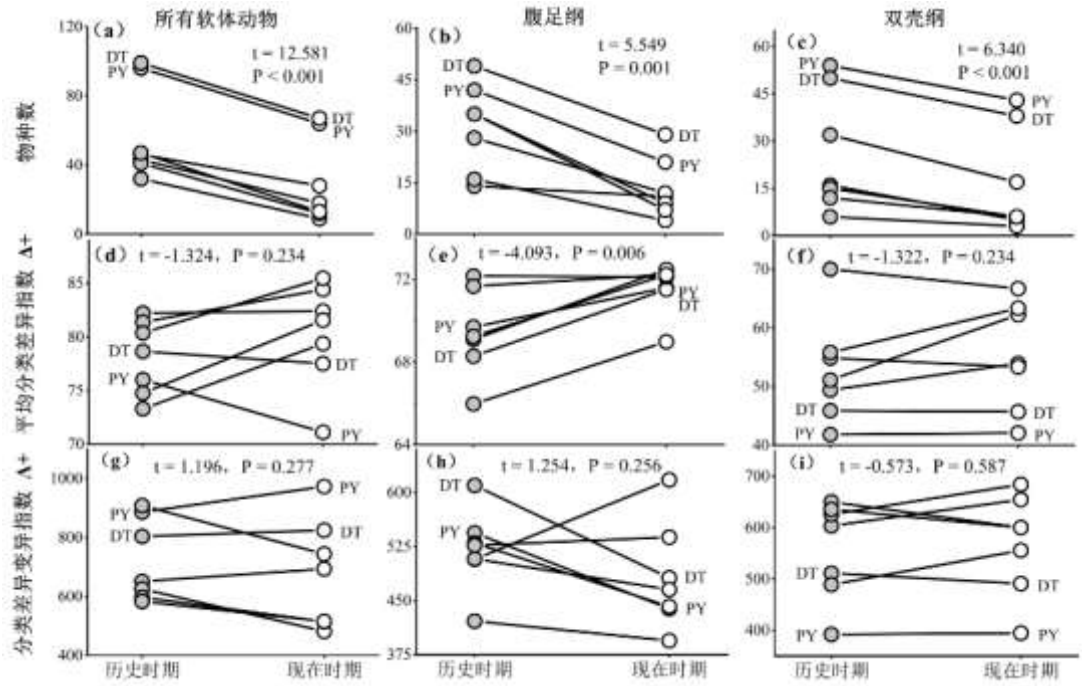


图 1 7 个湖泊在两个时期的物种数、平均分类差异指数 Δ^+和分类差异变异指数 Λ^+

Fig.1 Number of species, average taxonomic distinctness index (Δ^+), and variation in taxonomic distinctness index (Λ^+) in seven lakes during pre- and post- disconnection periods.

观察 Δ^+和 Λ^+对应物种数的 95%置信区间漏斗图，所有软体动物、腹足纲和双壳纲三组数据的结果较为类似。首先，基于所有软体动物数据构建的 Δ^+漏斗图中，历史时期的四个湖泊（鄱阳湖、洞庭湖、太湖和东湖）和现在时期的两个连通湖泊（鄱阳湖、洞庭湖）都位于置信区间下方，表明这些湖泊中软体动物的指数值低于预期值（图 2-a）。基于所有软体动物 Λ^+的漏斗图中，历史时期的鄱阳湖、洞庭湖、太湖和现在时期的鄱阳湖、洞庭湖却位于置信区间上方（图 2-d）表明这些湖泊中，Λ^+高于预期值。此外，基于腹足纲和双壳纲两组数据构建的漏斗图中，发现历史时期的洞庭湖和东湖均位于 Δ^+置信区间下方（图 2-b，2-c），而两组数据的 Λ^+指数的置信区间上方有一个连通湖泊（腹足纲：洞庭湖，双壳纲：鄱阳湖）（图 2-e，2-f）。

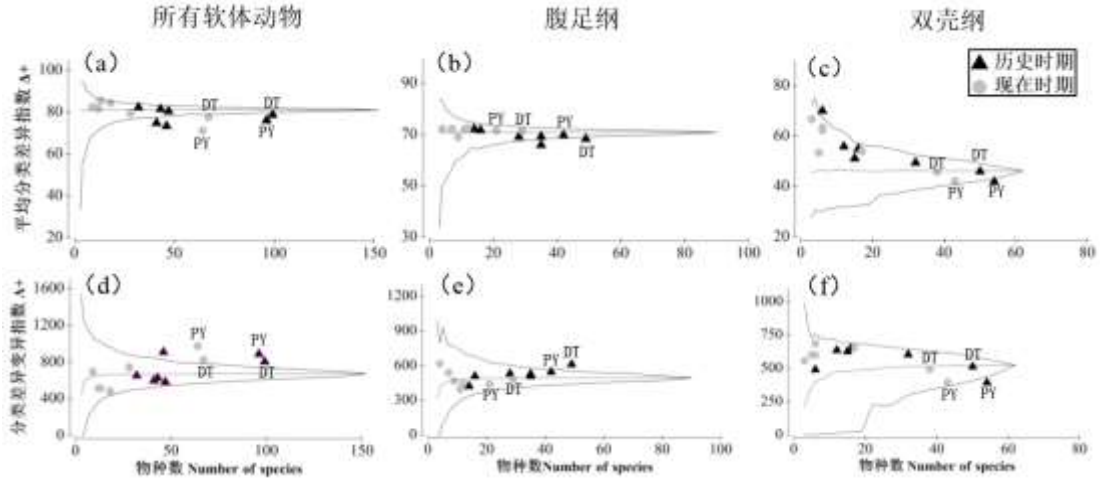


图 2 7 个湖泊平均分类差异指数 Δ^+和分类差异变异指数 Λ^+对应物种数的 95%置信区间漏斗图

Fig.2 Funnel plots of the 95% confidence intervals for the average taxonomic distinctness index (Δ^+) and variation in taxonomic distinctness index (Λ^+) versus the number of species in seven lakes.

3 讨论

本研究聚焦的长江中下游泛滥湖泊区（如鄱阳湖、洞庭湖）是古云梦泽、彭蠡泽等大型湖泊的残留水体，长期处于江湖自然连通状态，是中国淡水软体动物多样性热点区域，孕育了丰富且独特的软体动物多样性[30]。然而，该区域的软体动物资源和多样性目前遭受到严重的威胁（江湖阻隔、水污染、栖息地破坏等），在诸多影响因素中，江湖阻隔被认为是导致该区域生态系统生物多样性下降的主要威胁因素。同时，该区域的自然地理特征和动态水文环境为软体动物提供了异质性生境和扩散通道，使其在分化和演变过程中形成大量同属物种并且在多个湖泊中广泛存在[10]。同属物种与该区域的生态系统特征密切相关，不同物种（例如丽蚌属 *Lamprotula*）可能在相似环境中通过微生境偏好实现共存[31]。软体动物同属物种的多样性高与特有种多主要是历史时期的泛滥平原的水文连通性、适应性辐射[32]以及繁殖策略等适宜软体动物生存的条件的综合作用[33]。

对 7 个湖泊的分析发现，从历史时期到现在时期，软体动物物种数显著降低（$p < 0.001$），在 5 个阻隔湖泊的物种数平均下降超 60%，2 个连通湖泊平均下降 33%。其中蚌科 Unionidae（由 52 种减少到 41 种）和田螺科 Viviparidae（由 28 种减少到 11 种）是软体动物种类数最丰富的两个科，分别占全部种类数的 34.2%和 18.4%，这两个科的物种数在现在时期下降最为明显。阻隔湖泊的物种丧失比连通湖泊更为严重，这是因为江湖阻隔阻断了湖泊与干流间的水体流通[34]，改变了原有湖泊系统的流水生境（适应其的软体动物难以在阻隔湖泊中生存）和水文情势，以及围湖造田、水污染加剧等人为干扰，这与之前的研究结果一致[31]。同时，阻隔湖泊生境异质性下降，水生植被类型简单化，并且更容易发生水质恶化（如武汉东湖因水污染贝类物种大幅减少）[11]，进一步限制了软体动物的栖息地和食物来源[35]。此外，2 个连通湖泊也出现了约 1/3 的物种损失，这表明连通湖泊同样受到人类活动的影响，如挖沙、过渡捕捞、湖泊萎缩等危害[36]。

与物种数的变化趋势类似，软体动物的 Δ^+和 Λ^+指数也同样在 5 个阻隔湖泊中变化更为显著。基于所有软体动物的 Δ^+和 Λ^+指数在阻隔湖泊中发生了显著升高（$p = 0.024$）和近显著降低（$p = 0.083$），基于腹足纲的 Δ^+指数在阻隔湖泊中发生了显著升高（$p = 0.050$）（附图 1-d，e，g）。Δ^+指数的上升似乎意味着即使在江湖阻隔导致物种大量减少的情况下，软体动物群落的谱系多样性却反而增加了。之前的研究显示，Δ^+的增加通常被视为生物多样性变化的积极信号[17]，但在本研究中，Δ^+的增加是由湖泊阻隔后软体动物同属种大量减少引起的。历史时期，这些湖泊中分布着大量且丰富的同属软体动物：例如，石

田螺属 *Sinotaia*（12 种），短沟蜷属 *Semisulcospira*（12 种），萝卜螺属 *Radix*（11 种），丽蚌属（9 种），沼螺属 *Parafossarulus*（7 种），田螺属 *Cipangopaludina*（6 种）和尖丽蚌属 *Aculamprotula*（6 种）。然而在现在时期，上述同属物种在 5 个阻隔湖泊中发生了大量消失。阻隔湖泊中大部分特有的和敏感的种类（如巴氏丽蚌 *Lamprotula bazini*、剑状矛蚌 *Lanceolaria gladiola*、圆头楔蚌 *Cuneopsis heudei*、三角华帆蚌 *Sinohyriopsis cumingii*、河圆田螺 *Cipangopaludina fluminalis*）均未出现，只有部分耐受能力较强的种类，如背角华无齿蚌 *Sinanodonta woodiana*、圆顶结节蚌 *Nodularia douglasiae* 和河蚬 *Corbicula fluminea* 等，在阻隔湖泊中得以生存[37, 38]。当这些同属物种大量消失时，意味着一个群落中贡献最短的分类学距离的物种对的消失，从而导致该群落分类树平均路径长度的增加（即 Δ^+增加），分类学进化树的不均匀性会减少（Λ^+减少）[39]。故在本研究中，亲缘关系近的土著种和特有种丧失导致的 Δ^+增长不能被视为是多样性变化的积极信号，反而是对软体动物资源和多样性快速下降的警示信号[10]。之前 Jiang[40]和 Zhang 等[41]在鱼类群落的研究中，这两个指数也是显示同样的变化趋势。

基于所有软体动物、双壳纲和腹足纲数据构建的 TD 指数漏斗图中，整个软体动物和两个子集数据集的漏斗图的区分能力较差表明不能对该区域人类干扰做出有效的评价。漏斗图结果显示，连通湖泊的 Δ^+（Λ^+）指数反而在置信区间下方（上方），这表明预测结果低于（或高于）预期值，导致这种结果的原因是历史时期有很多同属和特有物种在经过江湖阻隔后大量丧失。此外，TD 指数的置信区间漏斗图的一大优点是无需参照点可以对样点状况进行评价，但是得出的结果进一步得出基于 TD 指数的置信区间漏斗图对于评估江湖阻隔对泛滥平原湖泊软体动物的影响可能并不理想。

本研究发现长江中下游的 7 个湖泊软体动物群落分类学多样性指数在两种类型湖泊中发生了明显变化，表明江湖阻隔对软体动物多样性产生了严重威胁。此外，两个连通湖泊（鄱阳湖、洞庭湖）的分类学多样性指数变化幅度低于 5 个阻隔湖泊，这更加表明维持湖泊软体动物多样性的重要条件就是良好的水文连通性。因此，需要重点关注江湖阻隔等人类活动对软体动物的影响，同时要采取更为有效的保护和修复计划。现阶段，在阻隔湖泊中通常采取临时开闸的方式来恢复生境及生物多样性，但其修复效果较为有限[42]，但是想更有效的修复水文连通性丧失造成的不良影响，还需全面恢复水文连通或重新打通与干流的通道。此外，仅剩的少数连通湖泊应该建设成软体动物资源保护区，这是缓解人类干扰最有效的多样性保护措施[8, 31]。尽管本研究为区域生物多样性保护提供了理论依据，但仍然有一些不足之处：1）在本研究，巢湖的调查以底栖动物的调查居多，这可能会造成对巢湖软体动物物种数有所低估；2）仅考虑江湖阻隔这一单一因素，未涉及水污染、湖泊萎缩（减少底质多样性）、水体富营养化（耐污种存活，特有且敏感种消失）[43]以及过度捕捞（改变群落结构）等影响软体动物多样性的因素。同时，近期的一些研究表明，软体动物的功能性状在生态系统功能中发挥着重要作用[9, 44]。例如，淡水双壳类通过滤食水体中藻类、颗粒物，吸收重金属和大有机分子，促进泥水界面的物质交换，在水体自然净化、栖息地构建、生态修复以及生物监测等方面有着积极影响[9, 45]。因此，在未来除了分析多重干扰因素之外，还需要加强对软体动物功能性状组成和功能多样性的研究，为长江中下游泛滥湖群生态保护提供更为准确全面的参考。

4 参考文献

[1] Zhao ST, Zhou R, Yuan SB, *et al*. Aquatic plant conservation and restoration of shallow lake wetlands in middle and lower reaches of Changjiang River. *Yangtze River*, 2025, **56**(1) : 58-66. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2025.01.008. [赵素婷, 周瑞, 袁赛波等. 长江中下游浅水湖泊湿地植物保护与恢复. 人民长江, 2025, **56**(1) : 58-66.]

[2] Zhang YL, Qin BQ, Zhu GW, *et al*. Importance and main ecological and environmental problems of lakes in China. *Chinese Science Bulletin*, 2022, **67**(30) : 3503-3519. DOI: 10.1360/TB-2022-0178. [张运林, 秦伯强, 朱广伟等. 论湖泊重要性及我国湖泊面临的主要生态环境问题. 科学通报, 2022, **67**(30) : 3503-3519.]

[3] 郑鹏. 江湖阻隔对东部平原湖泊鱼类和软体动物多样性的影响研究[学位论文]. 西安理工大学, 2022.

[4] Wang HZ, Liu XQ, Wang HJ. The Yangtze River-floodplain ecosystem: Multiple threats and holistic conservation. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2019, **43**(S1) :157-182. DOI: 10.7541/2019.178. [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.]

[5] Liu XJ, Yang X, Zanatta DT, *et al*. Conservation status assessment and a new method for establishing conservation priorities for freshwater mussels (Bivalvia: Unionida) in the middle and lower reaches of the Yangtze River drainage. *Aquatic Conservation: Marine Freshwater Ecosystems*, 2020, **30**(5) : 1000-1011. DOI: 10.1002/aqc.3298.

[6] Sun TT, Liu XJ, Zhou CH, *et a*l. Microsatellite analysis of genetic diversity and genetic structure of the Chinese freshwater mussel *Solenaia carinata* (Bivalvia: Unionidae). *Aquatic Conservation: Marine Freshwater Ecosystems*, 2018, **28**(1) : 37-44. DOI: 10.1002/aqc.2829.

[7] Bank RA, Bieler R, Bouchet P, *et al*. MolluscaBase–announcing a World Register of all Molluscs. 2014.

[8] Böhm M, Dewhurst-Richman NI, Seddon M, *et al*. The conservation status of the world's freshwater molluscs. *Hydrobiologia*, 2021, **848**(12) : 3231-3254. DOI: 10.1007/s10750-020-04385-w.

[9] Zheng P, Jiang XM, Shu FY, *et al*. Comparative effects of river–lake disconnection on taxonomic and functional composition of molluscan assemblages in floodplain lakes. *Hydrobiologia*, 2024, **852** : 3291-3305. DOI: 10.1007/s10750-024-05677-1.

[10] Shu FY, Wang HJ, Cui YD, *et al*. Diversity and distribution pattern of freshwater molluscs in the Yangthe river basin. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2014, **38**(1) : 19-26. DOI: 10.7541/2014.03. [舒凤月, 王海军, 崔永德等. 长江流域淡水软体动物物种多样性及其分布格局. 水生生物学报, 2014, **38**(1) : 19-26.]

[11] Shu FY, Wang HJ, Pan BZ, Assessm ent of species status of mollusca in the mid-lower Yangtze lakes. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2009, **33**(6) : 1051-1058. DOI: 10·3724/SP·J·0000·2009·61051. [舒凤月, 王海军, 潘保柱等. 长江中下游湖泊贝类物种濒危状况评估. 水生生物学报, 2009, **33**(6) : 1051-1058.]

[12] Gaston KJ. Species richness: measure and measurement. Biodibersity: A Biology of Numbers Difference, 1996, : 77-113.

[13] Magurran AE. Measuring biological diversity. *Current Biology*, 2021, **31**(19) : R1174-R1177. DOI: 10.1016/j.cub.2021.07.049.

[14] Xiong F, Zhang W, Cui DD. Changes of species, taxonomic and functional diversity of fish assemblages in the Xiangjiaba Reservoir of the lower Jinsha River after impoundment. *Journal of Lake Sciences*, 2024, **36**(1) : 200-212.DOI:10. 18307/2024. 0132.[熊飞, 张伟, 翟东东. 蓄水后向家坝库区鱼类物种, 分类和功能多样性变化.湖泊科学, 2024, **36**(1) : 200-212.]

[15] Kazila E, Ntislidou C, Voreadou C. Comparison of quantitative and semi-quantitative sampling methodologies for biomonitoring of Mediterranean streams using benthic macroinvertebrates: a case study from Greece. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2023, **195**(1) : 53. DOI: 10.1007/s10661-022-10620-9.

[16] Warwick R, Clarke KR. Taxonomic distinctness and environmental assessment. *Journal of Applied ecology*, 1998, **35**(4) : 532-543. DOI: 10.1046/j.1365-2664.1998.3540532.

[17] Clarke K, Warwick R. A further biodiversity index applicable to species lists: variation in taxonomic distinctness. *Marine ecology Progress series*, 2001, **216** : 265-278. DOI: 10.3354/meps216265.

[18] Legendre P, De Cáceres M. Beta diversity as the variance of community data: dissimilarity coefficients and partitioning. *Ecology letters*, 2013, **16**(8) : 951-963. DOI: 10.1111/ele.12141.

[19] Warwick RM, Clarke KR. New 'biodiversity' measures reveal a decrease in taxonomic distinctness with increasing stress. *Marine Ecology Progress Series*, 1995, **129** : 301-305. DOI: 10.3354/meps129301.

[20] García-Girón J, Fernández-Aláez M, Fernández-Aláez C. Redundant or complementary? Evaluation of different metrics as surrogates of macrophyte biodiversity patterns in Mediterranean ponds. *Ecological Indicators*, 2019, **101**: 614-622. DOI: 10.1016/j.ecolind.2019.01.062.

[21] Koperski P. Hydrological instability of ponds reduces functional diversity of freshwater molluscs in protected wetlands. *Wetlands*, 2022, **42**(5) : 42. DOI: 10.1007/s13157-022-01552-8.

[22] Stenger-Kovács C, Hajnal É, Lengyel E, *et al*. A test of traditional diversity measures and taxonomic distinctness indices on benthic diatoms of soda pans in the Carpathian basin. *Ecological indicators*, 2016, **64** : 1-8. DOI: 10.1016/j.ecolind.2015.12.018.

[23] Wang HZ, Liu X, Wang H. The Yangtze River floodplain: threats and rehabilitation; proceedings of the American Fisheries Society Symposium, F, 2016. *American Fisheries Society Bethesda*, MD, USA.

[24] Zheng P, Jiang XM, Cao L, *et al*. Long-term changes in the functional trait composition diversity of fish assemblages in eastern plain lakes under the regime of river-lake connectivity loss. *Journal of Lake Sciences*, 2022, **34**(01) : 151-168. DOI: 10.18307/2022.0114. [郑鹏, 蒋小明, 曹亮等. 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. 湖泊科学, 2022, **34**(01) : 151-168.]

[25] Zhang K, Jiang XM, Zheng P. Revealing a conservation challenge towards floodplain disconnection: decreasing turnover and increasing nestedness of mollusc metacommunities. *Biodiversity and Conservation*, 2023, **32**(8) : 2893-2908. DOI: 10.1007/s10531-023-02634-7.

[26] Gibson R, Barnes M, Atkinson R. Practical measures of marine biodiversity based on relatedness of species. *Oceanography and Marine Biology*, 2001, **39** : 207-231.

[27] Graham NA, McClanahan TR, Letourneur Y, *et al*. Anthropogenic stressors, inter-specific competition and ENSO effects on a Mauritian coral reef. *Environmental Biology of Fishes*, 2007, **78** : 57-69. DOI: 10.1007/s10641-006-9077-5.

[28] Bouchet P, Rocroi J-P, Hausdorf B, *et al*. Revised classification, nomenclator and typification of gastropod and monoplacophoran families. *Malacologia*, 2017, **61**(1-2) : 1-526. DOI: 10.4002/040.061.0201.

[29] He J, Zhuang Z. The Freshwater Bivalves of China. ConchBooks, Harxheim2013.

[30] 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.

[31] Zieritz A, Bogan AE, Froufe E, *et al*. Diversity, biogeography and conservation of freshwater mussels (Bivalvia: Unionida) in East and Southeast Asia. *Hydrobiologia*, 2018, **810** : 29-44. DOI: 10.1007/s10750-017-3104-8.

[32] Chen Z, Baeza JA, Chen C, *et al*. A genome-based phylogeny for Mollusca is concordant with fossils and morphology. *Science*, 2025, **387**(6737): 1001-7. DOI: 10.1126/science.ads0215.

[33] Liu X, Sousa R, Guo S, *et al*. Lateral connectivity maintains higher freshwater mussel biodiversity. *Freshwater Biology*, 2024, **69**(9) : 1175-1191. DOI: 10.1111/fwb.14296.

[34] Rolls RJ, Heino J, Ryder DS, *et al*. Scaling biodiversity responses to hydrological regimes. *Biological Reviews*, 2018, **93**(2) : 971-995. DOI: 10.1111/brv.12381.

[35] Pan BZ, Wang HJ, Liang XM. Macrozoobenthos in Yangtze oxbows: community characteristics and causes of resources decline. *Journal of Lake Sciences*, 2008, (6): 806-813. [潘保柱, 王海军, 梁小民等. 长江故道底栖动物群落特征及资源衰退原因分析. 湖泊科学, 2008, (6): 806-813.]

[36] Dong R, Wang YY, Lv S, *et al*. Effects of hydrological connectivity on the community structure of macrobenthos in West Dongting Lake. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, **40**(22): 8336-8346. DOI: 10.5846/stxb201911262565. [董芮, 王玉玉, 吕偲等. 水文连通性对西洞庭湖大型底栖动物群落结构的影响. 生态学报, 2020, **40**(22) : 8336-8346.]

[37] Zou LW, Zou W, Zhang QJ, *et al*. Characteristics and driving factors of spatiotemporal succession of macrozoobenthos in Poyang Lake. *China Environmental Science* ,2021, **41**(06) : 2881-2892. [邹亮华, 邹伟, 张庆吉等. 鄱阳湖大型底栖动物时空演变特征及驱动因素. 中国环境科学, 2021, **41**(06) : 2881-2892.

[38] 辽宁省环境监测实验中心. 辽河流域底栖动物监测图鉴. 辽河流域底栖动物监测图鉴, 2014.

[39] Jiang XM, Ding CZ, Brosse S, *et al*. Local rise of phylogenetic diversity due to invasions and extirpations leads to a regional phylogenetic homogenization of fish fauna from Chinese isolated plateau lakes. *Ecological Indicators*, 2019, **101** : 388-398. DOI: 10.1016/j.ecolind.2019.01.041.

[40] Jiang XM, Pan BZ, Sun ZW, *et al.* Application of taxonomic distinctness indices of fish assemblages for assessing effects of river-lake disconnection and eutrophication in floodplain lakes. *Ecological Indicators*, 2020, **110** : 105955. DOI: 10.1016/j.ecolind.2019.105955.

[41] Zhang C, Ding L, Ding C, *et al*. Responses of species and phylogenetic diversity of fish communities in the Lancang River to hydropower development and exotic invasions. *Ecological Indicators*, 2018, **90** : 261-279. DOI: 10.1016/j.ecolind.2018.03.004.

[42] 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.

[43] Jiang XM, Li ZF, Shu FY, *et a*l. Effects of river-lake disconnection and eutrophication on freshwater mollusc assemblages in floodplain lakes: Loss of congeneric species leads to changes in both assemblage composition and taxonomic relatedness. *Environmental Pollution*, 2022, **292** : 118330. DOI: 10.1016/j.envpol.2021.118330.

[44] Zheng P, Jiang XM Shu FY *et al*. Loss of lateral hydrological connectivity impacts multiple facets of molluscan biodiversity in floodplain lakes. Journal of Environmental Management, 2022, **320** : 885. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.115885.

[45] Yu QQ, Sun QY. The species diversity and distribution of freshwater bivalves in the Anhui section of the Yangtze River Basin. *Journal of Lake Sciences*, 2021, **33**(5) : 1500-1509. [余青青, 孙庆业. 长江流域（安徽区域）淡水双壳类物种多样性及分布. 湖泊科学, 2021, **33**(5) : 1500-1509.]

附表 1 长江泛滥平原研究湖泊的背景信息

Table S1 The background information of the studied lakes in the Yangtze Floodplain.

（注：太湖历史时期仅有湖区的软体动物数据录入到软体动物物种名录中；洪湖历史时期的调查数据是 1959-1960 年和 1981-1982 年两次调查的整合；）

湖泊	经度 (E)	纬度 (N)	时期		阻隔时间	面积 (km^2) 历史/现在	参考文献	
			历史	现在			历史时期	现在时期
鄱阳湖	115°49′-116°46′	28°24′-29°46′	1960-1963	2003-2005; 2013		3350.0/2933	5;12;16	13; 19
洞庭湖	111°53′-113°05′	28°44′-29°35′	1956-1963	2003-2005; 2013-2018		2625.0/2432.5	8;17	13;10
太湖	119°52′-120°36′	30°55′-31°32′	1966-1973	2006-2007; 2016-2017	1958-1985 年	2505.2/2336.0	11;14	2;15
巢湖	117°16′-117°51′	31°25′-31°42′	1960-1962	2009	1956-1969 年	769.5/769.5	1;7	6;18
洪湖	113°13′-113°33′	29°42′-29°62′	1959-1960 1981-1982	2003-2005	1958-1970 年	348.2/348.2	9	13
东湖	114°21′-114°28′	30°31′-30°36′	1963	2003-2005	1960 年	33.7/27.7	3	13
花马湖	114°58′-115°1′	30°15′-30°18′	1959-1960	2003-2005	1956 年	27.5/10.3	4	13

附表参考文献

[1] Anhui Academy of Fishery Sciences, Nanjing Institute of Geography and Limnology Chinese Academy of Sciences. Survey reports on the Fishery resource in Lake Chaohu, 1963, 16-20. [安徽省渔业科学院、中国科学院南京地理与湖泊研究所. 巢湖渔业资源调查报告, 1963, 16-20.]

[2] Cai YJ, Gong ZJ, Qin BQ. Standing crop and spatial distributional pattern of Mollusca in Lake Taihu, 2006-2007. *ournal of Lake Sciences*, 2009 ,**21**(5) : 713-719. [蔡永久, 龚志军, 秦伯强. 太湖软体动物现存量及空间分布格局(2006-2007 年). 湖泊科学, 2009, **1**(5) : 713-719.]

[3] Chen QY, Liang YL, Song GB *et a1*. On ecological distributions and population densities of Mollusca in Lake Tung-Hu, Wuchang. *Acta Hydrobiologica Sinica* , 1975, **5**(3) : 371-379. [陈其羽, 梁彦龄, 宋贵保等. 武昌东湖软体动物的生态分布及种群密度. 水生生物学报, 1975, **5**(3) : 371-379.]

[4] Chen QY. A report on Mollusca in Lake Huama, Hubei Province. *Oceanologia & Limnologia Sinica*, 1979, **10**(1) : 46-62. [陈其羽.湖北省花马湖软体动物的调查报告. 海洋与湖沼学报, 1979, **10**(1) : 46-62.]

[5] Chen YG. The freshwater snails of Poyang Lake and its surrounding waters. *Sinozoologia*, 1988,**6** : 69-75. [陈晔光. 鄱阳湖及其周围水域的淡水螺类, 动物学集刊, 1988, **6** : 69-75.]

[6] Gao F, Yin HB, Hu WP *et al*. Ecological characteristics of macrobenthos communities in Chaohu Basin in spring and their relationships with environmental factors. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, **21**(8) : 2132-2139. [高芬, 殷寒冰, 胡维平等. 巢湖流域春季大型底栖动物群落生态特征及与环境因子的关系. 应用生态学报, 2010, **21** (8): 2132-2139.]

[7] Hu JY, Yao WQ. Investigation of the benthic macroinvertebrates in Lake Chaohu. *Journal of Anhui University (Natural Science)* , 1981, 2 : 161-175. [胡积玉, 姚文全. 巢湖底栖大型无脊椎动物调查. 安徽大学学报（自然科学版）, 1981, **2** : 161-175.]

[8] Hu ZQ. Snails of Dong-Ting Lake and its surrounding main waters. *Journal of Natural Science of Hunan Normal University*, 1993, **16**(1) : 80-86. [胡自强. 洞庭湖及其周围主要水域的螺类. 湖南师范大学自然科学学报, 1993, **16**(1) : 80-86.]

[9] Li HD, Lv DJ. Reports on the macrozoobenthos in the Honghu Lake. *Freshwater Fisheries* ,1985, (03) : 25-29. [李恒德, 吕代钧. 洪湖底栖动物调查报告. 淡水渔业, 1985, (03) : 25-29.]

[10] Liu ZY, Meng XL, Li ZF, *et al*. Species Diversity Assessment and Conservation Strategies of Mollusks in the South Lake Dongting Area. *Biodiversity* , 2020, **28**(2) : 155. [刘振元, 孟星亮, 李正飞等. 南洞庭湖区软体动物物种多样性评估及保护对策. 生物多样性, 2020, **28**(02) : 155-165.]

[11] Liu YY, Zhang WZ, Wang YX. Bivalves (Mollusca) of the Taihu Lake and its surrounding waters, Jiangsu Province, *Acta Zoologica Sinica*, 1980, (04) : 365-369. [刘月英, 张文珍, 王跃先. 太湖及其周围水域的双壳类. 动物学报, 1980, (04) : 365-369.]

[12] Lin ZT. Unionidae (Mollusca) of Poyang Lake, Kiangsi Province. *Acta Zoologica Sinica*, 1962, (02): 249-260. [林振涛. 鄱阳湖的蚌类. 动物学报, 1962, (02) : 249-260.]

[13] Shu FY, Wang HJ, Pan BZ, *et al*. Assessment of species status of Mollusca in the mid-lower Yangtze lakes. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2009, **33**(06) : 1051-1058. [舒凤月, 王海军, 潘保柱等. 长江中下游湖泊贝类物种濒危状况评估. 水生生物学报, 2009, **33**(06) : 1051-1058.]

[14] Wu XP, Liang YL, Wang HZ, *et al*, Distribution and Species Diversity of Freshwater Mollusca of Lakes along Mid-lower Reaches of the Yangtze River. *Journal of Lake Sciences*, 2000, (02) : 111-118. [吴小平, 梁彦龄, 王洪铸等. 长江中下游湖泊淡水贝类的分布及物种多样性. 湖泊科学, 2000, (02) : 111-118.]

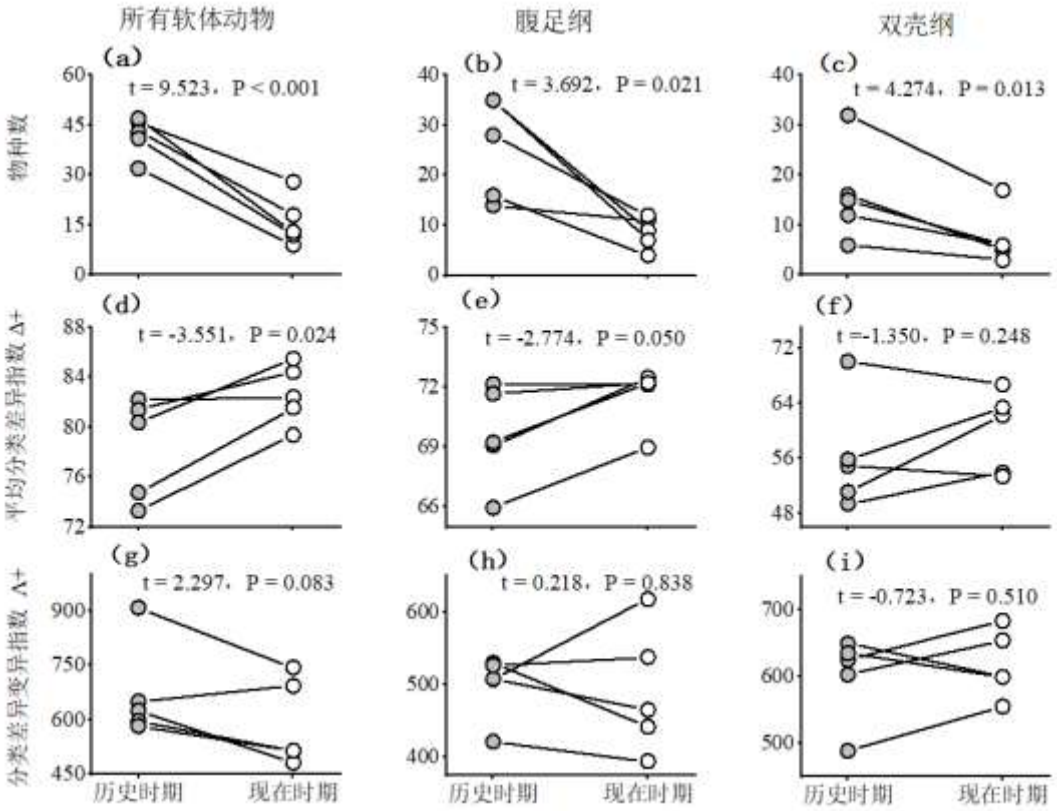
[15] Xue TT, Liu XJ, Wu RW, *et al*. Standing stock and spatial distribution pattern of unionids in Lake Taihu. *Journal of Lake Sciences*, 2019, **31**(01) : 202-210. [薛涛涛, 刘雄军, 武瑞文等. 太湖蚌类现存量及空间分布格局. 湖泊科学, 2019, **31**(01) : 202-210.]

[16] Zhang X, Li SC. Bivalves (Mollusca) of the Poyang Lake and surrounding waters, Kiangsi Province with description of a new species. *Acta Zoologica Sinica*, 1965, (03) : 309-319. [张玺, 李世成. 鄱阳湖及其周围水域的双壳类包括一新种. 动物学报, 1965, (03) : 309-319.]

[17] Zhang X, Li SC, Liu YY. Bivalves (Mollusca) of Tung-Ting Lake and its surrounding waters. *Acta Zoologica Sinica*, 1965, (02) : 197-216. [张玺, 李世成, 刘月英. 洞庭湖及其周围水域的双壳类软体动物. 动物学报, 1965, (02) : 197-216.]

[18] Zhao YJ, Liu XQ. Community structure of macrozoobenthos in the littoral zone of the Chaohu Lake. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2012, **21**(S2) : 39-44. [赵永晶, 刘学勤. 巢湖水向湖滨带底栖动物群落结构研究. 长江流域资源与环境, 2012, **21**(S2) : 39-44.]

[19] Zhang MH, Xu L, Xie GL, *et al*. The biodiversity, distribution and conservation of fresh water shellfish in the Poyang Lake Basin. *Marine Science*, 2013, **37**(08) : 114-124. [张铭华, 徐亮, 谢广龙等. 鄱阳湖流域淡水贝类物种多样性、分布与保护. 海洋科学, 2013, **37**(08) : 114-124.]



附图 1 5 个湖泊在阻隔前后两个时期的物种数、平均分类差异指数 Δ^+和分类差异变异指数 Λ^+

Supplementary Fig.1 Number of species, average taxonomic distinctness index (Δ^+), and variation in taxonomic distinctness index (Λ^+) in five lakes during pre- and post-disconnection periods.