

Li W J, Li B, Hu F X, *et al.* Seasonal variation in fish trophic structure of the Heishui River based on carbon and nitrogen stable isotopes [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2026, 50(4): 042604. [李文静, 李博, 胡凡旭, 等. 基于碳、氮稳定同位素的黑水河鱼类营养结构的季节性变化特征 [J]. 水生生物学报, 2026, 50(4): 042604.]

基于碳、氮稳定同位素的黑水河鱼类营养结构的季节性变化特征

李文静^{1,2} 李博^{1,2} 胡凡旭^{1,2} 姜伟^{1,2}

(1. 中国长江三峡集团有限公司长江经济带生态环境国家工程研究中心, 武汉 430014; 2. 中国长江三峡集团有限公司中华鲟研究所, 三峡工程鱼类资源保护湖北省重点实验室, 宜昌 443100)

摘要: 为探究黑水河流域水生食物网特征及其季节变化, 本研究分别于2024年7月(丰水期)和11月(枯水期)在该流域不同河段采集渔业资源, 根据主要消费者及饵料生物样品的碳、氮稳定同位素值, 采用SIBER模型分析了鱼类营养级及群落营养结构特征的季节差异。结果表明, 丰水期渔业生物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值和 $\delta^{15}\text{N}$ 值分别为 -20.45‰ — -5.27‰ 和 0.88‰ — 14.68‰ , 枯水期的 $\delta^{13}\text{C}$ 值和 $\delta^{15}\text{N}$ 值分别为 -29.40‰ — -1.12‰ 和 0.87‰ — 12.66‰ , 鱼类营养级范围为1.817—3.918, 整体营养级在丰水期与枯水期无显著差异($P>0.05$), 但部分物种存在明显季节差异, 其中, 钝吻棒花鱼和宽鳍鱮丰水期的平均营养级显著高于枯水期($P<0.001$), 而横纹南鳅枯水期营养级显著高于丰水期($P<0.01$), 反映出不同物种对水文季节波动引发的食物资源组成变化的适应策略存在差异。枯水期群落营养结构指标(NR、CR、TA、CD、MNND和SDNND值)均高于丰水期, 表明枯水期鱼类的基础食物来源更多样, 鱼类营养位置差异更显著, 群落多样性水平更高, 种间营养竞争强度更弱, 营养冗余程度更低。本研究结果可为山区河流生态系统食物网研究提供案例参考, 也可为黑水河的生态系统健康状况评估与针对性保护管理提供理论依据。

关键词: 黑水河; 食物网; 稳定同位素; 鱼类; 营养结构; 季节变化

中图分类号: S932.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-3207(2026)04-042604-13

doi: 10.3724/1000-3207.2025.2025.0298 CSTR: 32229.14.SSSWXB.2025.0298



生态系统中的食物网, 是连接生产者、消费者及分解者的关键功能网络, 主要通过物质循环与能量流动来维持生态系统的结构稳定和功能完整^[1,2]。研究食物网的结构特征, 不仅是认识生态系统能量流动规律和生物多样性维持机制的重要基础, 也为评价人类活动对生态系统的影响, 如过度捕捞、水利工程等, 提供了科学依据^[3,4]。

传统的食物网研究, 多采用胃含物分析法等技术手段, 虽能直接鉴别出消费者在短期内的摄食组成, 但其局限性显著: 该方法不仅高度依赖研究人员的分类学经验且工作繁重, 且难以量化已消化的微量食物, 更无法反映消费者在长时间尺度下的综

合摄食信息^[5]。与之相比, 稳定同位素技术(Stable isotope analysis)通过分析生物体内碳($\delta^{13}\text{C}$)、氮($\delta^{15}\text{N}$)等同位素的自然丰度, 为解析营养关系提供了有力补充。其中, $\delta^{13}\text{C}$ 在食物链传递过程中分馏程度较小^[6], 可用于追溯消费者最初的能量来源; 而 $\delta^{15}\text{N}$ 可以通过营养级富集效应, 准确地反映出生物所处的营养级位置, 进而揭示食物网络的营养结构^[6,1]。二者结合可更全面地解析复杂营养关系^[7]。稳定同位素技术的优势体现在以下几个方面: 首先, 它能反映捕食关系的长期整合结果, 而非偶发事件^[8-10]; 其次, 该技术能连续测定食物网中动物的营养级位置, 更真实地体现物种在群落中的生态作

收稿日期: 2025-09-03; 修订日期: 2026-01-12

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFC3204200); 中国长江三峡集团有限公司科研项目(NBWL202200489-07和NBZZ20220230)资助 [Supported by the National Key Research & Development Program of China (2022YFC3204200); the Research Project of China Three Gorges Corporation (NBWL202200489-07 and NBZZ20220230)]

作者简介: 李文静, 女, 博士, 高级工程师; 研究方向为鱼类生态学及资源保护。E-mail: 1325280713@qq.com

通信作者: 姜伟, 男, 博士, 正高级工程师; 研究方向为鱼类生态学及资源保护。E-mail: jiang_wei6@ctg.com.cn

用^[11];此外,该技术还能分析大型珍稀动物的摄食习性,既包括已灭绝的大型珍稀动物,也涵盖那些常规方法难以测定其摄食习性的大型珍稀动物^[12]。正因如此,稳定同位素技术已成为水域生态领域动物食物来源解析^[13]、食性研究^[14]、洄游习性^[15,16]、食物网中物质循环探究、营养生态位分析^[17]等的重要工具,有力地推动了该技术的快速应用与发展,也被认为是解决水域生态环境领域相关问题最有效的技术手段之一。

金沙江下游左岸一级支流黑水河,是白鹤滩库区干流鱼类的重要替代生境与优先保护对象^[18]。该流域鱼类生物多样性丰富,是典型的山区河流,其水文情势受降水季节分布不均的影响,呈现显著的季节性变化——夏季降水集中时水位上升,冬季降水减少时则趋于下降。干流原有的三座引水式电站自上而下依次为苏家湾电站、公德房电站和松新电站(其中松新电站已于2025年拆除,苏家湾和公德房电站也即将拆除)。近年来,小电站建设、非法捕捞、道路施工、农业与生活污染等人类活动,易导致黑水河生态环境显著改变,部分物种栖息地出现退化,群落结构随之改变,对食物网稳定性构成潜在威胁。目前,针对黑水河生态系统的研究多集中于鱼类分布、繁殖与行为^[19–25]、小水电对鱼类群落的影响^[26,27]、河流健康状况^[28,29]、鱼类栖息地评估^[30,31]、生态修复效果评价^[32,33]、鱼道设计与效果监测^[34,35]等方面,有关食物网结构、营养关系的基础研究尚未见报道。这使得对黑水河食物网的整体结构及物质与能量流动规律的认识仍处于模糊状态,难以从生态系统整体出发,科学评估其健康状况并制定有效的保护策略。

鉴于此,本研究选取黑水河为研究对象,综合运用碳、氮稳定同位素技术与生物群落调查,旨在:(1)阐明主要生物类群的碳、氮同位素组成特征;(2)解析食物网的营养级结构与营养关系;(3)探究鱼类群落营养结构的时空动态。研究成果不仅能为山区河流生态系统食物网研究提供案例参考,也为黑水河的生态系统健康状况评估与针对性保护管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

黑水河(26°95'N—27°39'N, 102°87'E—102°56'E)发源于凉山彝族自治州昭觉县玛果梁子,自北向南流经昭觉、普格、宁南三县,并在宁南县葫芦口处汇入金沙江。全长192 km,流域面积638 km²,平均比降13.5%,主要由则木河及西洛河两大支流汇

集而成,距金沙江下游白鹤滩工程约30 km^[23]。

为全面了解黑水河流域鱼类的营养状况,本研究分别于2024年丰水期(7月)和枯水期(11月)开展稳定同位素采集工作。采集工作覆盖黑水河干流上游(S1—S3)至中游(S4—S6)的6个采样点(图1)。样点设置旨在体现黑水河小水电的影响:S1位于小水电上游,受干扰较小;S2和S3位于小水电下游,可反映出小水电对营养结构的潜在影响;S4、S5和S6均位于现存(截至采样日)小水电的下游。该区域是当前小水电拆除与生态修复的重点区域,其营养结构特征对全流域具有代表性。同时,采样点均为渔获物调查中鱼类种类较多的区域,确保能采集到足够数量的样本,满足稳定同位素分析的技术需求。

1.2 样品采集与处理

课题组在获得地方科研特许捕捞审批后,于渔政部门全程监督下,采用虾笼和定制刺网等批准范围内网具开展鱼类采集工作。对分类鉴定后的鱼类个体,逐尾测量全长、体长、体重等基础生物学参数,同时记录采集位点、采集时间等相关信息,留存满足同位素分析所需数量的样本后,其余鱼类立即放归原水域。对于留存的鱼类样本,取背部白肌,用去离子水冲洗后放入冷冻离心管带回实验室,采样后的剩余鱼体交由渔政部门进行无害化处理。带回实验室的同位素样品,经60℃烘干48h达到恒重,然后使用研磨式组织研磨器(MiniBead-beater-16)研磨粉碎,干燥保存,用于后续稳定同位素的测量与分析,每种鱼类样本不少于3尾。

在渔获物调查中,对稳定同位素分析的基础食物源进行同步收集。于沿岸带采集上层、中层和下层的混合水样,使用预烧的GF/C滤膜过滤,以获取有机颗粒物(Particulate organic matter, POM)样品。通过1 mol/L盐酸酸化处理以去除碳酸盐的影响,再用蒸馏水冲洗,最后在60℃下烘干48h至恒重后充分研磨。将石头上的附着藻类用硬毛刷刷至装有蒸馏水的白瓷盘中,然后转移至1 L的采样瓶,带回实验室后用经450℃预烧的Whatman GF/C纤维过滤,在60℃下烘干滤膜48h至恒重状态。

常见的陆生植物在采样时从距离采样点10 m内的岸边区域收集。对于大型植物,仅采集其叶片,而小型植物则整株采集。采集后的样本用塑料自封袋保存,带回实验室经种类鉴定后用蒸馏水冲洗干净,60℃下烘干至恒重,存放于干燥容器中。底栖动物采用彼得采泥器采集,经种类鉴定后,将其置于充分曝气的蒸馏水中过夜,排空肠道,螺类去壳后仅取其足部肌肉,均需经60℃烘干至恒重后研磨,烘干保存。沉积物样品采用彼得采泥器采集后,

需经1 mol/L盐酸酸化以去除碳酸盐影响。浮游生物通过13#和25#浮游生物网进行采集, 浮游动物需要用少量蒸馏水反复清洗以去除杂质, 放入洁净培养皿进行挑选。然后将样品置于充分曝气的蒸馏水中过夜, 排空肠道后将其整体作为分析样品, 在60℃下烘干至恒重。

1.3 数据分析

(1) 生物样品的稳定同位素分析

采用中国科学院水生生物研究所的Flash EA-1112HT元素分析仪和Delta VTM Advantage同位素比质谱仪(Thermo Fisher Scientific, Inc., 美国)联合分析样品稳定同位素比值。分析碳($\delta^{13}\text{C}$)和氮($\delta^{15}\text{N}$)同位素的参照物质分别是VPDB (Vienna Pee Dee Belemnite)和空气中的氮气(Air-N_2)^[36]。标准物质分别为国际上通用的IAEA-USGS24和IAEA-USGS25。为确保数据的精准性和可重复性, 每5个

待测样品后加一个标准样品。分析结果分别用 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 表示:

$$\delta X (\text{‰}) = [(R_{\text{sample}} - R_{\text{standard}}) / R_{\text{standard}}] \times 10^3, \quad (1)$$

式中, X 指的是 ^{13}C 或 ^{15}N , R_{sample} 则表示被测样本的同位素比值($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 或 $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$), R_{standard} 表示标准物质的同位素比值, 而 δ 值表示样本中重同位素与轻同位素的含量比例。

(2) 营养级计算

鱼类营养级(Trophic level, TL)计算公式:

$$\text{TL} = (\delta^{15}\text{N}_{\text{sample}} - \delta^{15}\text{N}_{\text{baseline}}) / \Delta\delta^{15}\text{N} + \lambda, \quad (2)$$

式中, $\delta^{15}\text{N}_{\text{sample}}$ 是所测样品的 $\delta^{15}\text{N}$ 平均值, $\delta^{15}\text{N}_{\text{baseline}}$ 是基线生物的 $\delta^{15}\text{N}$ 平均值, $\Delta\delta^{15}\text{N}$ 为相邻营养级之间氮稳定同位素的富集度(Trophic enrichment factor, TEF; 此研究取3.4‰^[3]), λ 为基线生物的营养等级。

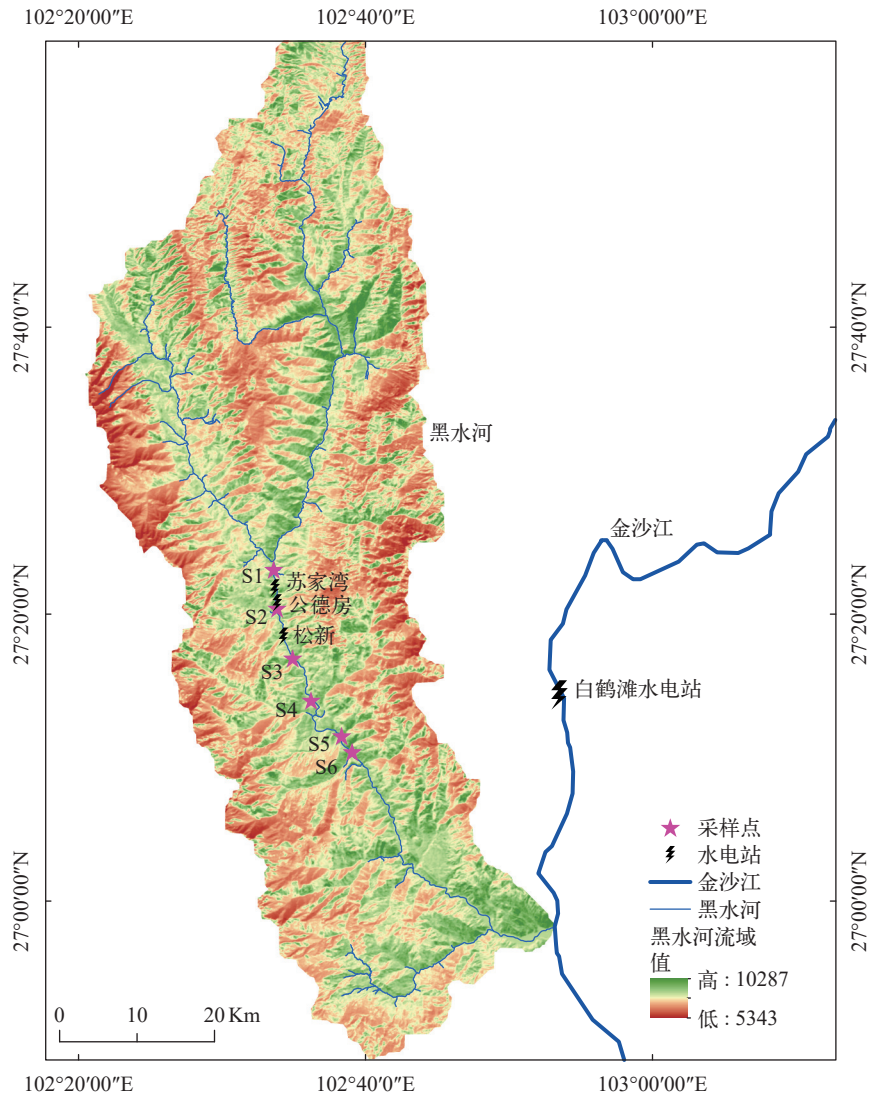


图1 黑水河水生生物同位素调查采样图

Fig. 1 Sampling map for isotope investigation of aquatic organisms in Heishui River

相对于初级生产者, 初级消费者不容易受到时空变化带来的影响^[36], 因此本研究中的基线生物选取寿命较长、代谢较慢、氮稳定同位素值相对较低的耳萝卜螺^[37], λ 取值为2。

(3) 群落营养结构分析

参考Layman等^[6]提出的6个群落营养结构指标, 对鱼类的营养结构进行量化分析: (1) 碳值变幅(Carbon range, CR): 群体内 $\delta^{13}\text{C}$ 值的极差值, 用于衡量群体内碳源利用的多样性; (2) 氮值变幅(Nitrogen range, NR): 群体内 $\delta^{15}\text{N}$ 值的极差值, 体现了营养级别在群体中的跨度; (3) 凸多边形总面积(Total area, TA): 在 $\delta^{13}\text{C}$ — $\delta^{15}\text{N}$ 同位素混合空间中, 所有物种环绕形成的凸多边形面积; (4) 平均离心距离(Mean distance to centroid, CD): 每个个体到质心的平均欧氏距离, 用于衡量群体在生态位空间中的相对位置和分布; (5) 平均最邻近距离(Mean nearest neighbor distance, MNND): 群体内个体之间的平均最近邻距离, 反映了个体间的生态位重叠度和资源竞争情况; (6) 平均最邻近距离标准差(Standard deviation of nearest neighbor distance, SDNND): 描述群体内生态位分布范围水平。

运用R软件中的SIBER (Stable Isotope Bayesian

Ellipses in R)包^[38]计算群落营养结构指标。在对 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 值进行正态性和方差齐性检验的基础上, 采用单因素方差分析或非参数检验研究鱼类的 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 值和营养级位置的差异显著性, 其显著性水平为0.05。本研究所涉及的统计分析均采用IBM SPSS Statistics 20.0软件进行, 采用R 4.4.3、Excel 2019、Origin 2021软件作图。

2 结果

2.1 稳定同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 值特征

研究期间, 6个研究位点共测定稳定同位素样品290份(表1)。其中, 丰水期共收集生物样品18种, 其 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 -20.45‰ (湿生植物)— -5.27‰ (沉积物), 平均值为 $(-21.45 \pm 4.51)\text{‰}$; $\delta^{15}\text{N}$ 值为 0.88‰ (POM)— 14.68‰ (麦穗鱼*Pseudorasbora parva*), 平均值为 $(9.08 \pm 3.64)\text{‰}$ (图2和表1)。丰水期共收集鱼类同位素样品141份(表1), 11种。鱼类样品的 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 -25.62‰ [云南盘鮈(*Discogobio yunnanensis*)]— -15.62‰ [宽鳍鱲(*Zacco platypus*)], 差值为 10‰ , $\delta^{15}\text{N}$ 值为 7.75‰ [短须裂腹鱼(*Schizothorax wangchiachii*)]— 14.68‰ [麦穗鱼(*Pseudorasbora parva*)], 差值为 6.93‰ 。

表1 黑水河水生态系统稳定同位素值

Tab. 1 The value of stable isotopes of Heishui River ecosystem (mean $\pm$ SD)

物种 Species	丰水期 Wet season			枯水期 Dry season			栖息水层及食性 Microhabitat and feeding guild
	样本量 <i>n</i>	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	$\delta^{15}\text{N}$ (‰)	样本量 <i>n</i>	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	$\delta^{15}\text{N}$ (‰)	
颗粒有机物POM	18	-18.06 ± 3.68	4.06 ± 1.16	18	-20.09 ± 2.52	5.13 ± 1.69	
沉积物Sediment	18	-10.29 ± 4.31	4.51 ± 1.30	18	-5.56 ± 3.65	5.82 ± 2.39	
浮游植物Phytoplankton	18	-17.12 ± 5.43	4.45 ± 0.96	18	-18.32 ± 5.18	5.77 ± 1.49	
浮游动物Zooplankton	18	-22.57 ± 2.33	4.93 ± 1.26	18	-19.76 ± 4.79	7.28 ± 1.64	
附着藻Attached Algae	18	-18.99 ± 2.76	7.01 ± 1.83	18	-19.49 ± 4.78	6.39 ± 2.00	
湿生植物Hygrophyte	18	-29.29 ± 2.30	5.89 ± 0.80	18	-20.44 ± 5.66	3.68 ± 0.57	
底栖动物Zoobenthos	18	-21.84 ± 1.80	8.37 ± 1.91	18	-22.43 ± 0.73	6.14 ± 1.05	
短须裂腹鱼 <i>Schizothorax wangchiachii</i>	22	-21.81 ± 0.92	11.62 ± 1.40	21	-22.03 ± 1.16	9.85 ± 1.07	底栖、植食性
宽鳍鱲 <i>Zacco platypus</i>	15	-20.34 ± 1.41	11.88 ± 0.85	10	-20.78 ± 0.66	8.09 ± 0.93	中上层、杂食性
横纹南鳅 <i>Schistura fasciolatus</i>	24	-21.52 ± 0.71	12.15 ± 0.74	30	-21.86 ± 0.65	10.41 ± 1.39	底栖、杂食性
云南盘鮈 <i>Discogobio yunnanensis</i>	9	-22.09 ± 1.65	12.19 ± 0.67	10	-22.74 ± 0.85	10.31 ± 0.63	底栖、杂食性
白缘鲈 <i>Liobagrus marginatus</i>	5	-21.15 ± 0.82	12.60 ± 0.23	5	-21.81 ± 0.43	10.12 ± 0.26	底栖、肉食性
红尾副鲈 <i>Paracribitius variegatus</i>	20	-20.87 ± 0.39	12.66 ± 0.84	21	-21.11 ± 0.55	10.94 ± 0.99	底栖、杂食性
钝吻棒花鱼 <i>Abbottina obtusirostris</i>	15	-19.72 ± 1.01	12.75 ± 0.75	17	-19.87 ± 1.00	9.27 ± 0.89	底栖、肉食性
中华纹胸鮡 <i>Glyptothorax sinensis</i>	13	-22.19 ± 0.88	12.45 ± 0.39	9	-22.94 ± 0.49	10.56 ± 0.74	底栖、杂食性
前鳍高原鳅 <i>Triplophysa anterodorsalis</i>	8	-20.92 ± 1.21	12.16 ± 1.00				底栖、杂食性
麦穗鱼 <i>Pseudorasbora parva</i>	6	-19.49 ± 0.80	12.59 ± 1.05				中上层、杂食性
鲫 <i>Carassius auratus</i>	4	-20.17 ± 0.57	10.18 ± 0.14				底栖、杂食性
大桥高原鳅 <i>Triplophysa daqiaoensis</i>				21	-20.40 ± 5.01	10.69 ± 2.73	底栖、杂食性
泥鳅 <i>Misgurnus anguillicaudatus</i>				5	-22.3 ± 0.85	9.83 ± 1.29	底栖、杂食性

枯水期共收集生物样品17种, 其 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 -29.40‰ (湿生植物)— -1.12‰ (沉积物), 平均值为 $(-19.85 \pm 4.89)\text{‰}$; $\delta^{15}\text{N}$ 值为 0.87‰ (沉积物)— 12.66‰ (红尾副鳅 *Paracobitis variegatus*), 平均值为 $(8.12 \pm 2.70)\text{‰}$ (图2和表2)。枯水期共收集鱼类同位素样品149份, 10种, $\delta^{13}\text{C}$ 值为 -25.53‰ [短须裂腹鱼 (*Schizothorax wangchiachii*)]— -18.47‰ [棒花鱼 (*Abbottina obtusirostris*)], 差值为 7.04‰ ; $\delta^{15}\text{N}$ 值为 4.60‰ [横纹南鳅 (*Schistura fasciolatus*)]— 12.66‰ [红尾副鳅 (*Paracobitis variegatus*)], 差值为 8.06‰ 。

单因素方差分析结果表明, 黑水河鱼类整体的 $\delta^{13}\text{C}$ 值表现出一定的季节差异 ($P < 0.05$)。进一步对丰水期和枯水期共有的鱼种白缘鳅 (*Liobagrus marginatus*)、短须裂腹鱼 (*Schizothorax wangchiachii*)、钝吻棒花鱼 (*Abbottina obtusirostris*)、横纹南鳅 (*Schistura fasciolatus*)、红尾副鳅 (*Paracobitis variegatus*)、宽鳍鱮 (*Zacco platypus*)、云南盘鮈 (*Discogobio yunnanensis*)、中华纹胸鮡 (*Glyptothorax sinensis*) 的季节性差异进行研究发现, 仅中华纹胸鮡的 $\delta^{13}\text{C}$ 值在丰水期和枯水期存在显著差异 ($P < 0.05$), 且丰水期 $\delta^{13}\text{C}$ 值高于枯水期。同时, 黑水河鱼类整体的 $\delta^{15}\text{N}$ 值也表现出一定的季节差异 ($P < 0.05$), 且8种共有物种的 $\delta^{15}\text{N}$ 值也均存在显著性差异 ($P < 0.05$), 即丰水期 $\delta^{15}\text{N}$ 值显著高于枯水期。

非参数检验结果表明, 丰水期6个采样点间鱼类的 $\delta^{13}\text{C}$ 值无显著差异 ($\chi^2 = 1.401$, $P > 0.05$); 多重比较表明, 仅S1的 $\delta^{13}\text{C}$ 值显著低于S3、S4、S6 ($P < 0.05$), 其他采样点间无显著差异。枯水期6个采样

点间鱼类的 $\delta^{13}\text{C}$ 值则存在极显著空间异质性 ($\chi^2 = 5.946$, $P < 0.001$), 进一步多重比较发现, S1的 $\delta^{13}\text{C}$ 值显著高于S3、S4、S6 ($P < 0.05$); S2显著高于S3 ($P < 0.05$); S3显著低于S4、S5 ($P < 0.05$); S5显著高于S6 ($P < 0.05$)。

鱼类的 $\delta^{15}\text{N}$ 值在丰水期和枯水期的6个采样点间均存在显著空间差异 (丰水期: $\chi^2 = 29.397$, $P < 0.05$; 枯水期: $\chi^2 = 36.663$, $P < 0.05$)。其中, 丰水期多重比较结果显示, S1的 $\delta^{15}\text{N}$ 值显著低于S2、S3、S4、S5 ($P < 0.05$), S2显著高于S3、S6 ($P < 0.05$), 其他采样点间无显著差异。枯水期多重比较表明, S1的 $\delta^{15}\text{N}$ 值显著低于S2、S3、S4 ($P < 0.05$), S2显著低于S3且显著大于S6 ($P < 0.05$), S3、S4均显著高于S5、S6 ($P < 0.05$)。

2.2 营养级

黑水河鱼类营养级为1.82 (短须裂腹鱼)—3.92 (红尾副鳅), 平均值为 3.15 ± 0.32 。其中, 丰水期营养级为1.82 (短须裂腹鱼)—3.86 (麦穗鱼), 平均值为 3.12 ± 0.29 ; 枯水期营养级为2.09 (宽鳍鱮)—3.92 (红尾副鳅), 平均值为 3.19 ± 0.34 (图3和图4)。单因素方差分析结果表明, 黑水河鱼类丰水期和枯水期鱼类营养级无显著差异 ($P > 0.05$)。

对两个季节均采集到的8种鱼类而言, 钝吻棒花鱼 ($TL_{\text{丰水期}} = 3.29 \pm 0.22$, $TL_{\text{枯水期}} = 2.92 \pm 0.26$) 和宽鳍鱮 ($TL_{\text{丰水期}} = 3.03 \pm 0.25$, $TL_{\text{枯水期}} = 2.57 \pm 0.27$) 丰水期的平均营养级显著大于枯水期 ($P < 0.001$), 横纹南鳅 ($TL_{\text{丰水期}} = 3.11 \pm 0.22$, $TL_{\text{枯水期}} = 3.31 \pm 0.25$) 的枯水期营养级显著大于丰水期 ($P < 0.01$), 而短须裂腹鱼

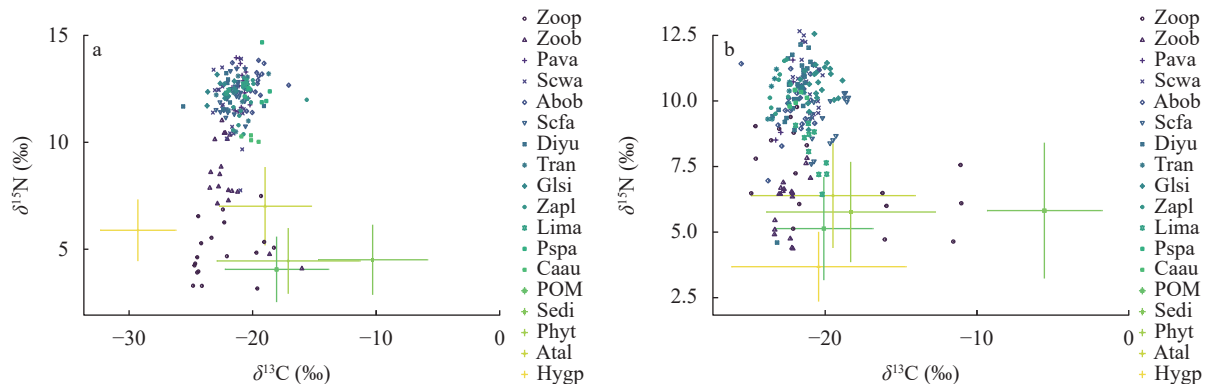


图2 黑水河丰水期(a)、枯水期(b)水生态系统稳定同位素混合空间

Fig. 2 $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ of Heishui River Ecosystem during the wet (a) and dry (b) season

Zoop. 浮游动物; Zoob. 底栖动物; Pava. 红尾副鳅; Scwa. 短须裂腹鱼; Abob. 钝吻棒花鱼; Scfa. 横纹南鳅; Diyu. 云南盘鮈; Tran. 前鳍高原鳅; Glis. 中华纹胸鮡; Zapl. 宽鳍鱮; Lima. 白缘鳅; Pspa. 麦穗鱼; Caau. 鲫; Mian. 泥鳅; Trip. 大桥高原鳅; POM. 颗粒有机物; Sedi. 沉积物; Phyt. 浮游植物; Atal. 附着藻; Hygp. 湿生植物

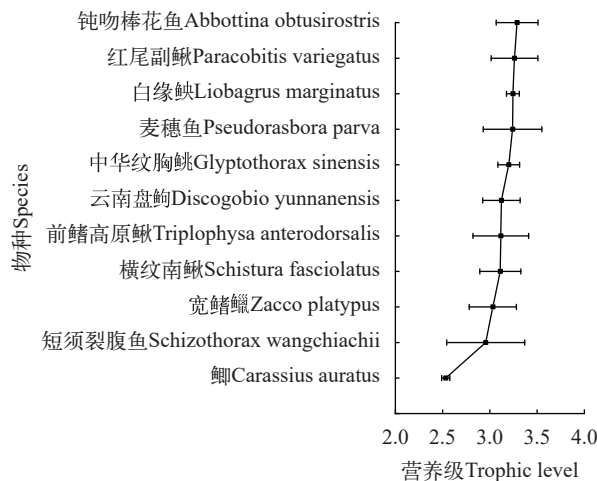
Zoop. Zooplankton; Zoob. Zoobenthos; Pava. *Paracobitis variegatus*; Scwa. *Schizothorax wangchiachii*; Abob. *Abbottina obtusirostris*; Scfa. *Schistura fasciolatus*; Diyu. *Discogobio yunnanensis*; Tran. *Triplophysa anterodorsalis*; Glis. *Glyptothorax sinensis*; Zapl. *Zacco platypus*; Lima. *Liobagrus marginatus*; Pspa. *Pseudorasbora parva*; Caau. *Carassius auratus*; Mian. *Misgurnus anguillicaudatus*; Trip. *Triplophysa daqiaoensis*; POM. Particulate Organic Matter; Sedi. Sediment; Phyt. Phytoplankton; Atal. Attached Algae; Hygp. Hygrophysa

($TL_{\text{丰水期}}=2.96\pm0.41$, $TL_{\text{枯水期}}=3.09\pm0.31$)、红尾副鳅($TL_{\text{丰水期}}=3.26\pm0.25$, $TL_{\text{枯水期}}=3.41\pm0.29$)、云南盘鮈($TL_{\text{丰水期}}=3.12\pm0.20$, $TL_{\text{枯水期}}=3.23\pm0.19$)、中华纹胸鮡($TL_{\text{丰水期}}=3.20\pm0.12$, $TL_{\text{枯水期}}=3.30\pm0.22$)、白缘鮡($TL_{\text{丰水期}}=3.24\pm0.07$, $TL_{\text{枯水期}}=3.17\pm0.08$) 5种鱼的营养级在不同季节无显著性差异($P>0.05$)。

表 2 不同采样点不同季节的稳定同位素值

Tab. 2 Stable isotope values across sampling sites and seasons

位点 Site	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)		$\delta^{15}\text{N}$ (‰)	
	丰水期 Wet season	枯水期 Dry season	丰水期 Wet season	枯水期 Dry season
S1	-21.58±0.80	-20.66±1.32	11.44±0.86	9.43±1.17
S2	-21.29±0.69	-21.35±1.02	12.79±0.60	10.29±1.11
S3	-20.85±1.72	-22.15±1.03	12.30±1.06	11.05±0.94
S4	-21.12±1.03	-21.29±0.58	12.44±0.81	10.92±1.09
S5	-20.75±1.58	-20.69±1.17	12.43±1.05	9.99±0.64
S6	-20.87±0.96	-21.72±1.08	11.84±1.00	9.83±0.96



2.3 群落营养结构

根据稳定同位素值计算生物群落营养结构指标,共采用NR、CR、TA、CD、MNND、SDNND等6个指标来反映群落营养结构。经计算对比,枯水期的氮值变幅(NR)值、碳值变幅(CR)值、凸多边形总面积(TA)值、平均离心距离(CD)值、平均最邻近距离(MNND)值和平均最邻近距离标准差(SDNND)值均大于丰水期(表3)。

3 讨论

3.1 黑水河流域水生生物 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 稳定同位素值及其季节差异特征

碳、氮稳定同位素具备稳定的物理化学特性,在食物网中富集程度较低,能够反映生物长期生命活动所形成的结果,因此常被用于食物来源的示踪和区分^[39]。其中,在食性相同或相近的物种间, $\delta^{13}\text{C}$ 值差异较小,可用于指示消费者食物的来源;而动

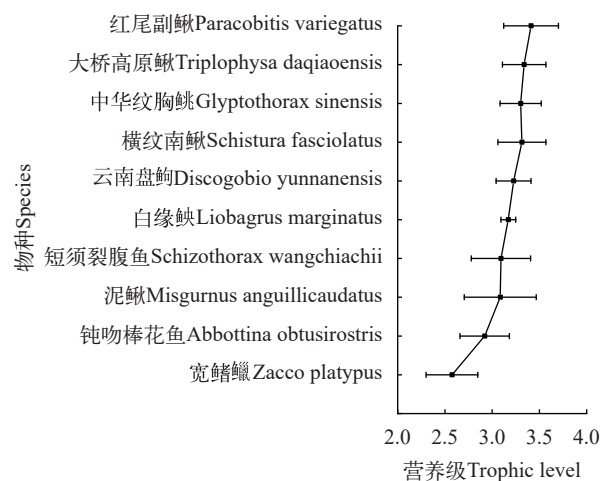


图 3 黑水河鱼类丰水期(a)和枯水期(b)营养级图谱

Fig. 3 Continuous trophic spectrum of catches in the wet (a) and dry (b) seasons in the Heishui River

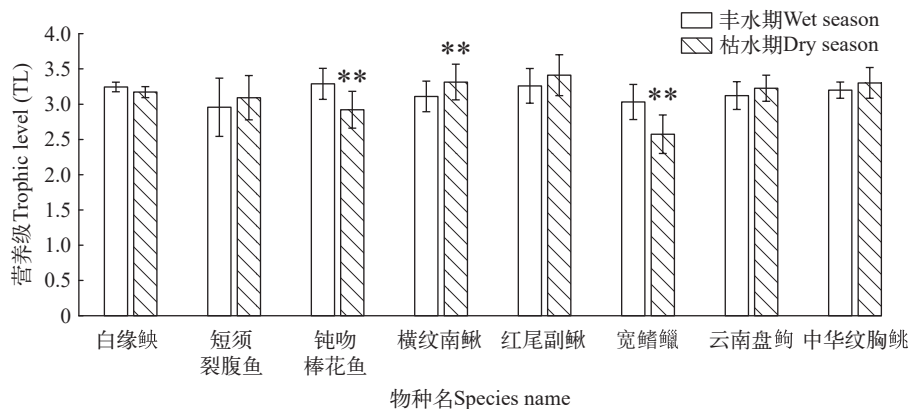


图 4 共有种不同季节营养级比较

Fig. 4 Comparison of trophic levels of common species in different seasons

**表示营养级季节差异极显著, $P<0.01$

**indicates a very significant seasonal difference in trophic level ($P<0.01$)

物中普遍存在 $\delta^{15}\text{N}$ 的富集现象, 通常每增加1个营养级, 其值会相应增加3‰—4‰, 基于这一特性, $\delta^{15}\text{N}$ 可用于确定消费者在食物网中的营养级位置^[40]。

在本研究中, 黑水河流域鱼类 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化范围为-25.62‰—-15.62‰, 差值达10‰; $\delta^{15}\text{N}$ 值的变动范围为4.60‰—14.68‰, 差值为10.08‰。对比来看, 黑水河鱼类 $\delta^{13}\text{C}$ 值的分布范围与大宁河^[41](-29.74‰—-16.61‰)、香溪河^[42](-28.30‰—-13.90‰)、赤水河^[17](-29.36‰—-15.81‰)等江河水域相近, 但高于沱水水库^[43](-28.69‰—-20.22‰)、阳澄湖^[44](-28.98‰—-20.65‰)、长湖^[45](-28.98‰—-24.80‰)、贡湖^[46](-28.10‰—-23.10‰)等湖库水域。这一差异的成因可能在于: 首先, 河流相较于湖库具有更强的水动力条件, 水流交换活跃且外源有机物输入更为丰富, 栖息地异质性更高, 可为鱼类提供更加广泛的食物来源^[20], 使其 $\delta^{13}\text{C}$ 值的范围更大; 其次, 黑水河等河流生态系统, 初级生产者主要为 $\delta^{13}\text{C}$ 值较高的着生藻类等, 能量通过食物链传递, 导致鱼类的 $\delta^{13}\text{C}$ 值较高。同时, 黑水河鱼类的 $\delta^{15}\text{N}$ 值为4.60‰—14.68‰, 与香溪河^[42](4.80‰—14.40‰)、大宁河^[41](4.54‰—17.51‰)等江河水域基本一致, 但其变幅要大于沱水水库^[43](6.34‰—12.80‰)、阳澄湖^[44](11.92‰—17.85‰)、长湖^[45](11.40‰—16.60‰)、贡湖^[46](14.50‰—19.10‰)等湖库。这说明河流生境更为复杂, 食物链更长, 能够支撑的营养级更多^[47], 食物网内部的层级差异也更为显著。另外, 与以内源氮循环为主的湖库不同的是, 江河水体的流动性强, 其氮源更多地依赖于流域内的陆源有机氮及点源输入, 这些氮源通过食物链传递至鱼类, 最终使鱼类的 $\delta^{15}\text{N}$ 值维持在较高的水平。

在本研究中, 黑水河鱼类的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值存在一定的季节差异($P<0.05$), 整体表现为丰水期鱼类的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值均高于枯水期。黑水河作为金沙江下游典型山区河流, 降水集中于6—10月(丰水期)^[48], 该时期地表径流量增大, 强烈的地表冲刷会向水体中带入大量的陆源有机碳^[47, 49](该碳源 $\delta^{13}\text{C}$ 值通常高于水生浮游植物等内源碳源^[50]), 因此, 当鱼类摄食依赖陆源有机碳的底栖生物或直接利用陆源碎屑时, 其自身的 $\delta^{13}\text{C}$ 值会显著提升; 而枯水

期河流流量相对稳定, 外源输入减少, 鱼类等消费者的能量更加依赖于水体内部源性营养物质^[47, 51]。丰水期6个采样点鱼类的 $\delta^{13}\text{C}$ 值整体无显著空间差异($P>0.05$), 仅S1的 $\delta^{13}\text{C}$ 值显著低于S3、S4和S6, 可能是因为丰水期河流连通性高, 水体混合充分, 不同河段的食物来源分布较为均匀, 导致鱼类摄食的碳源相似; 枯水期采样点间 $\delta^{13}\text{C}$ 值表现出极显著空间异质性($P<0.05$), 差异格局也更复杂: S1的 $\delta^{13}\text{C}$ 值显著高于S3、S4和S6, 这与丰水期格局相反, 可能是因为枯水期苏家湾水电站拦蓄导致坝上形成静稳库区, 为浮游植物生长繁殖提供有利的静水条件, 引起营养物质沉降、富集, 浮游植物种类和生物量大幅上升^[52], 而坝下流量减少、外源碳输入不足, 鱼类依赖 $\delta^{13}\text{C}$ 偏低的底栖生物; S2的 $\delta^{13}\text{C}$ 值显著高于S3, 可能是公德房水电站坝下水文条件稳定, 碳源供给与松新水电站下游的S3位点存在差异。

$\delta^{15}\text{N}$ 值存在季节差异的主要驱动因素在于丰水期氮输入结构的改变。一方面, 黑水河沿岸以农业为主^[53], 径流会携带更多农业面源污染物和生活污水进入水体, 导致水体基础氮源的 $\delta^{15}\text{N}$ 值升高^[54, 55]; 另一方面, 丰水期水温升高会加速生物代谢的速率, 使浮游植物大量增殖, 可能导致食物链长度增加, 鱼类的营养级也随之提高, 因此 $\delta^{15}\text{N}$ 值增加^[56]。此外, 枯水期水体相对封闭, 反硝化作用也更加活跃, 导致剩余氮源的 $\delta^{15}\text{N}$ 值降低; 而丰水期的流量较高, 缩短了水体的滞留时间, 充足的溶解氧使反硝化作用得到抑制^[57], 使得高 $\delta^{15}\text{N}$ 值的氮源更加容易通过食物链传递至鱼类, 进而使丰水期的鱼类 $\delta^{15}\text{N}$ 值升高。在空间上, 丰、枯水期均存在显著的异质性($P<0.05$), 且枯水期的差异更加精细。S1的 $\delta^{15}\text{N}$ 值在丰、枯水期均低于其他位点, 可能是因为S1位点位于水电站上游, 受水电站调控较少, 水体中初级生产者的 $\delta^{15}\text{N}$ 基线相对较低, 鱼类营养级相对较低^[17]; 而同在小水电(截至采样日)下游的4个采样点, 丰、枯水期均表现为S3或S4位点的 $\delta^{15}\text{N}$ 显著高于S5和S6, 这可能是因为S3和S4更靠近水电站, 坝体拦蓄导致水体滞留时间延长、营养盐富集, 使初级生产者和鱼类的 $\delta^{15}\text{N}$ 值升高^[52]。

3.2 鱼类营养级及其季节变化特征

作为生态位分析的核心内容之一, 营养级能

表 3 丰水期和枯水期鱼类群落营养结构指标

Tab. 3 Trophic structure indicators of fish communities during the wet and dry seasons

季节 Season	氮值变幅 NR	碳值变幅 CR	凸多边形总面积 TA	平均离心距离 CD	平均最邻近距离 MNND	平均最邻近距离标准差 SDNND
丰水期Wet	2.57	2.70	3.90	0.98	0.52	0.42
枯水期Dry	2.85	3.07	4.62	1.11	0.65	0.48

够直观反映物种在食物网中的功能定位和生态地位^[58, 1]。本研究中黑水河流域鱼类营养级为1.82—3.92, 该范围小于三峡坝前水域^[42](1.65—4.17)、赤水河^[17](1.21—4.46)、大宁河^[41](1.49—4.01)等长江上游河流, 却大于太湖^[46](3.30—4.40)、阳澄湖^[44](2.05—3.80)等湖泊。与太湖、阳澄湖等湖泊相比, 黑水河、赤水河等自然河流的流程相对较长, 其广阔的流域面积可能提供更加丰富的栖息地和资源, 物种多样性增加, 营养级范围和食物链长度较大^[20]; 而同为长江上游自然河流, 黑水河鱼类的营养级范围小于赤水河和大宁河, 主要与流域环境特征、人类干扰等密切相关。首先, 黑水河地处金沙江干热河谷, 降水少、径流不稳定, 导致水生植物生长受限, 影响草食性鱼类食物来源; 同时, 干热环境亦制约浮游和底栖生物繁殖^[59], 压缩低营养级鱼类食谱, 使其营养级下限(1.82)高于赤水河(1.21)和大宁河(1.49); 其次, 黑水河河谷深、河道比降大, 水流以急流为主且底质多为大粒径砂石, 相较于需静水或浅滩等生境的低营养级生物和杂食性鱼类, 更适合裂腹鱼等少数适应急流和底栖生活的种类; 而赤水河、大宁河存在更多浅滩、深潭、缓流段, 生境多样, 可支撑更多低营养级生物及鱼类资源, 也能为高营养级鱼类提供更完整的食物来源。

黑水河鱼类整体营养级在丰水期和枯水期无显著差异($P>0.05$), 但部分物种存在显著的季节分化, 反映出不同物种对水文季节波动引发的食物资源组成变化的适应策略存在差异^[60, 61]。其中, 钝吻棒花鱼和宽鳍鱲在丰水期的平均营养级显著高于枯水期($P<0.001$), 这与流域水文节律、食物资源可获得性及鱼类生态适应策略等密切相关^[62, 63]。丰水期径流大、水位高、河流连通性增强, 外源性有机物输入使碳源更加丰富^[47]。此时, 漫滩淹没形成浅滩、静水区等多样化的临时生境, 促进了大型底栖动物和浮游生物的增殖。而枯水期水文连通性降低, 水域面积收缩, 食物网能量主要依赖于内源性初级生产者^[47]。这种基底碳源的季节性转换可能通过食物链传递影响鱼类的营养级结构。钝吻棒花鱼作为典型的生态机会主义者, 丰水期可能会增加高营养级的浮游动物、底栖昆虫摄食占比; 宽鳍鱲作为中上层鱼类, 其活动范围更广, 丰水期可获取更多冲刷入河的陆生昆虫或小型无脊椎动物, 高营养级食源的增加提升了其营养级。与之相反, 横纹南鳅枯水期营养级显著高于丰水期($P<0.01$), 可能与其在枯水期资源受限条件下摄食策略转变有关。丰水期食物丰富, 杂食性的横纹南鳅可能更

多地摄食藻类、有机碎屑等低营养级食物, 而在枯水期生境收缩、资源竞争加剧, 横纹南鳅可能被迫捕食更高营养级的底栖动物、水生昆虫等, 导致其营养级较高。短须裂腹鱼、红尾副鳅等5种鱼类营养级无显著性季节差异($P>0.05$), 表明这些物种食性保守性强, 或能通过调整摄食组成以维持营养级稳定。除此之外, 基线生物的选择、样本数量与代表性等因素对营养级计算造成的影响也不容忽视^[3, 64, 65]。虽然本研究在分析时不同季节选用了同种基线生物, 但基线生物的 $\delta^{15}\text{N}$ 值并非恒定不变, 其时空变化会直接影响营养级计算的准确性^[3]; 其次, 部分物种(如云南盘鮈、白缘鳅)的样本量较少, 较小的样本量会降低统计检验的效力, 增加Ⅱ类错误的风险^[65]。因此, 在估算不同季节鱼类营养状况时, 还要注意尽量扩大样本量、增加基线生物种类、结合胃含物分析等。

3.3 鱼类群落营养结构季节变化特征

研究鱼类群落营养结构, 不仅可以阐明能量流动中各物种相对稳定的摄食关系与营养关联^[66], 而且可以用来评估生态系统的健康状态, 为渔业资源的可持续利用与科学管理提供理论依据^[67, 45]。为探究鱼类群落结构的动态变化规律, Layman等^[6]提出了鱼类群落同位素量化指标, 其中CR、NR、TA和CD表示群落营养结构的多样性, MNND、SDNND则用于反映群落冗余度的大小^[43]。季节变化是影响生态系统能量流动和物质循环的关键因素之一, 开展水生生物营养结构季节性变化研究具有重要的生态意义^[68]。

黑水河枯水期鱼类群落营养结构的CR(食物来源多样性)、NR(食物链长度)、TA(群落生态位宽度)、CD(资源利用分化程度)、MNND(种间竞争压力)及SDNND(生态系统营养冗余)6项指标均高于丰水期。这一现象主要与水文条件变化引发的资源分配和生态策略调整有关^[61, 62]。枯水期水体萎缩导致外部输入减少, 浮游生物、底栖等基础食物资源质量和数量下降, 迫使鱼类拓宽食性^[47], 开发更多样的食物资源, 推动群体食物来源多样性(CR)显著升高, 食物链长度(NR)增加; 在资源竞争压力驱动下, 群落内不同物种为降低生态位重叠度, 通过调整摄食和栖息微生境偏好等方式拓宽自身生态位, 使得群落生态位宽度(TA)增加^[69, 6], 同时, 物种间通过差异化的资源利用策略减少资源争夺, 推动资源利用分化程度(CD)提升^[70], 物种间在更广阔的资源谱中找到了各自的位置, 种间竞争压力(MNND)显著缓解^[49, 71], 营养冗余程度(SDNND)较低^[72]。而在丰水期, 充足的水文补给使水体生境异

质性提升, 浮游生物、有机碎屑等基础食物资源总量充沛且空间分布均匀, 鱼类无需通过拓宽摄食范围或分化资源利用方式即可获取充足能量, 因此群落层面的食物来源多样性、食物网复杂性及生态位宽度等指标均维持在较低水平。

3.4 基于食物网结构的鱼类资源保护建议

根据本文研究结果, 针对黑水河保护和管理提出如下建议: 一是分季节优化水资源调控。枯水期群落营养多样性更高, 需通过生态补水保障基流稳定, 维持浅滩、深潭等关键生境的连通性, 避免栖息地萎缩加剧资源竞争; 丰水期需限制河道采砂与岸线开发, 减少地表冲刷对陆源有机碳输入的过度干扰, 同时加强农业面源污染管控, 保障基础食物资源质量与数量。二是聚焦关键物种保护。重点保护钝吻棒花鱼、宽鳍鱲和横纹南鳅等营养级季节性变化显著的物种的关键摄食场所与季节性食物资源, 以及短须裂腹鱼等食性稳定物种的栖息地与专一性食物资源; 科学开展低资源量物种增殖放流, 评估放流效果并持续优化放流策略。三是推进流域连通性与综合治理。拆除苏家湾、公德房等造成生态阻隔的小水电, 恢复河流纵向连通性, 保障鱼类季节性洄游与食物资源获取; 持续执行禁渔政策, 规范采砂、岸线开发等人类活动, 减少食物网结构破坏。最后, 建立基于食物网动态的长期监测机制。聚焦小水电拆除后的群落营养结构变化, 监测 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值、营养级与群落结构指标的动态响应, 构建“监测-评估-管理-再监测”的适应性管理闭环, 动态优化保护措施, 实现流域生态长效保护与可持续发展。

4 结论

本研究通过碳、氮稳定同位素技术结合SIBER模型, 系统揭示了黑水河鱼类营养结构的季节性变化特征, 主要结论: (1)黑水河鱼类稳定同位素特征表现为丰水期 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 平均值显著高于枯水期($P<0.05$), 且不同采样点间存在差异; 对丰、枯水期共有物种进一步分析发现, 8个物种的 $\delta^{15}\text{N}$ 值在两季均存在显著差异($P<0.05$), 仅中华纹胸鮡的 $\delta^{13}\text{C}$ 值存在显著季节差异($P<0.05$); 丰水期河流连通性高、外源物质输入量大, 水电站对鱼类碳、氮同位素空间差异的影响相对较弱; 枯水期水电站的拦蓄、泄流调控等显著改变坝上、坝下的碳氮源供给与食物网结构, 导致同位素空间差异加剧。(2)鱼类营养级为1.82—3.92, 整体在丰、枯水期无显著差异($P>0.05$), 但物种间存在特异性变化: 钝吻棒花鱼、宽鳍鱲丰水期营养级显著高于枯水期($P<0.001$),

横纹南鳅枯水期营养级显著高于丰水期($P<0.01$), 其余5个共有物种营养级无显著季节差异($P>0.05$)。这一差异特征与流域水文节律、食物资源可获得性及鱼类生态适应策略等密切相关。(3)枯水期鱼类群落营养结构指标(NR、CR、TA、CD、MNND、SDNND)均高于丰水期, 表明枯水期食物来源更丰富、食物链更长、物种营养位置差异更显著、种间竞争更缓和、营养冗余更低。(4)小水电运行、农业面源污染等人类活动, 通过改变水文连通性、碳氮输入及食物资源组成, 间接影响鱼类稳定同位素特征与营养结构。本研究结果为山区河流食物网研究提供了案例参考, 也为黑水河生态系统健康评估与针对性保护管理提供了科学依据。

(作者声明本文符合出版伦理要求)

参考文献:

- [1] Wang S P. Food web structure and functioning: Theoretical advances and outlook [J]. *Biodiversity Science*, 2020, **28**(11): 1391-1404. [王少鹏. 食物网结构与功能: 理论进展与展望 [J]. 生物多样性, 2020, **28**(11): 1391-1404.]
- [2] Post D M. The long and short of food-chain length [J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2002, **17**(6): 269-277.
- [3] Post D M. Using stable isotopes to estimate trophic position: models, methods, and assumptions [J]. *Ecology*, 2002, **83**(3): 703-718.
- [4] Layman C A, Arrington D A, Montaña C G, *et al.* Can stable isotope ratios provide for community-wide measures of trophic structure [J]? *Ecology*, 2007, **88**(1): 42-48.
- [5] Nielsen J M, Clare E L, Hayden B, *et al.* Diet tracing in ecology: Method comparison and selection [J]. *Methods in Ecology and Evolution*, 2018, **9**(2): 278-291.
- [6] Peterson B J, Fry B. Stable isotopes in ecosystem studies [J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1987, **18**(1987): 293-320.
- [7] Fry B. *Stable Isotope Ecology* [M]. New York: Springer New York, 2006: 1-20.
- [8] Layman C A, Quattrochi J P, Peyer C M, *et al.* Niche width collapse in a resilient top predator following ecosystem fragmentation [J]. *Ecology Letters*, 2007, **10**(10): 937-944.
- [9] Newsome S D, Martinez del Rio C, Bearhop S, *et al.* A niche for isotopic ecology [J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2007, **5**(8): 429-436.
- [10] Wang J Z, Huang J H, Wu J G, *et al.* Ecological consequences of the Three Gorges Dam: insularization affects foraging behavior and dynamics of rodent populations [J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2010, **8**(1): 13-19.
- [11] Quevedo M, Svanbäck R, Eklöv P. Intrapopulation niche partitioning in a generalist predator limits food web

- connectivity [J]. *Ecology*, 2009, **90**(8): 2263-2274.
- [12] Fricke H C, Henceroth J, Hoerner M E. Lowland-upland migration of sauropod dinosaurs during the Late Jurassic epoch [J]. *Nature*, 2011, **480**(7378): 513-515.
- [13] Deng H T. Studies on fish food web structures and energy flow of Daning River in the Three Gorges Reservoir areas [D]. Chongqing: Southwest University, 2015: 21-34. [邓华堂. 三峡库区大宁河鱼类食物网的结构及能量流动研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2015: 21-34.]
- [14] Xu J. Ecological studies on the food web structures and trophic relationships of freshwater lakes in China using stable carbon and nitrogen isotopes [D]. Wuhan: Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, 2005: 49-56. [徐军. 应用碳、氮稳定性同位素探讨淡水湖泊的食物网结构和营养级关系 [D]. 武汉: 中国科学院研究生院水生生物研究所, 2005: 49-56.]
- [15] Fry B. Natural stable carbon isotope tag traces Texas shrimp migrations [J]. *Fishery Bulletin*, 1981, **79**(2): 337-345.
- [16] Gong Y, Chen X J, Li Y K, *et al.* A study on feeding ecology and migration patterns of *Dosidicus gigas* off Peru using stable isotope analysis [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, **26**(9): 2874-2880. [贡艺, 陈新军, 李云凯, 等. 秘鲁外海茎柔鱼摄食洄游的稳定同位素研究 [J]. *应用生态学报*, 2015, **26**(9): 2874-2880.]
- [17] Wang Z X, Wang C L, Lü H M, *et al.* The trophic structure of fish assemblages in the Chishui River based on stable isotope analysis [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2025, **49**(8): 1-16. [王梓鑫, 王春伶, 吕海敏, 等. 基于碳氮稳定同位素技术的赤水河鱼类群落营养结构研究 [J]. *水生生物学报*, 2025, **49**(8): 1-16.]
- [18] Zhang X, Liu F, Lin P C, *et al.* Habitat assessment and conservation priority for fishes in the lower Jinsha River [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2014, **23**(4): 496-503. [张雄, 刘飞, 林鹏程, 等. 金沙江下游鱼类栖息地评估和保护优先级研究 [J]. *长江流域资源与环境*, 2014, **23**(4): 496-503.]
- [19] Wang C, Liang Y Q. Age and growth of *Triplophysa anterodorsalis* Zhu & Cao, 1989 in the Heishui River, China [J]. *Journal of Applied Ichthyology*, 2017, **33**(6): 1215-1217.
- [20] Yang Z, Zhu Q G, Xu W, *et al.* Reproductive characteristics of *Triplophysa anterodorsalis* in the lower Heishui River [J]. *Journal of Hydroecology*, 2022, **43**(4): 119-126. [杨志, 朱其广, 徐薇, 等. 黑水河下游前鳍高原鳅的繁殖特征 [J]. *水生生态学杂志*, 2022, **43**(4): 119-126.]
- [21] Li W, Pu Y, Tian H W, *et al.* Spatial and temporal distribution characteristics and optimum habitat conditions of *Paracobitis variegatus* in Heishui River [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2023, **30**(4): 515-524. [李文, 蒲艳, 田辉伍, 等. 黑水河红尾副鳅时空分布特征及其最适生境条件 [J]. *中国水产科学*, 2023, **30**(4): 515-524.]
- [22] Wang Y, Pan X, Tian H, *et al.* The length-weight relationships of twelve fish species from the Heishui River, China [J]. *Journal of Applied Ichthyology*, 2024, **2024**(1): 6667189.
- [23] Shi X T, Gao S H, Ke S F, *et al.* Upstream behavioral patterns of three typical fish species in the Heishui River of the Jinsha River after passing through the fishway and crossing the dam [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2025, **37**(5): 1709-1721. [石小涛, 高生辉, 柯森繁, 等. 金沙江黑水河3种典型鱼类通过鱼道过坝后上溯行为规律 [J]. *湖泊科学*, 2025, **37**(5): 1709-1721.]
- [24] Xu J, Jiao Y, Soomro S-E-H, *et al.* Behavioral responses of migratory fish to environmental cues: evidence from the Heishui River [J]. *Fishes*, 2025, **10**(7): 310.
- [25] Yang J, Xu J, Shi X, *et al.* The role of underwater soundscapes in shaping the distribution of Cobitidae fish: insights from multiple environmental factors [J]. *Ecology of Freshwater Fish*, 2025, **34**(2): e12828.
- [26] He S F, Tang L, Wang J, *et al.* Effects of dam removal on fish community structure and spatial distribution in Heishui River [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, **41**(9): 3525-3534. [何术锋, 唐磊, 王骏, 等. 水坝拆除对黑水河鱼类群落结构和空间分布的影响 [J]. *生态学报*, 2021, **41**(9): 3525-3534.]
- [27] Tan J, Sun J, Wang Y, *et al.* Fish community dynamics following the low-head dam removal and newly installed fish passage in a headstream tributary of Jinsha River, Southwest China [J]. *Science of the Total Environment*, 2024(**954**): 176774.
- [28] Gao X C, Zhang Q, Su W, *et al.* Environmental quality assessment based on fish biotic integrity index and eco-restoration mode discussion for the Heishui River, Jinsha River [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2022, **31**(1): 104-112. [郜星晨, 张琪, 苏巍, 等. 基于鱼类生物完整性的金沙江黑水河健康评估及修复模式探讨 [J]. *长江流域资源与环境*, 2022, **31**(1): 104-112.]
- [29] Huang B, Fu J J, Zhao S, *et al.* Assessment of ecosystem integrity in Heishui River basin [J]. *Jianghuai Water Resources Science and Technology*, 2022(6): 44-48. [黄滨, 傅菁菁, 赵爽, 等. 黑水河流域生态系统完整性评价 [J]. *江淮水利科技*, 2022(6): 44-48.]
- [30] Sun J N, Zhang T Q, DavidZ. Zhu, *et al.* Simulative evaluation of fish habitat of backwater tributary of Baihetan Reservoir [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2013, **44**(10): 17-22. [孙嘉宁, 张士乔, DavidZ. Zhu, 等. 白鹤滩水库回水支流的鱼类栖息地模拟评估 [J]. *水利水电技术*, 2013, **44**(10): 17-22.]
- [31] Xie W, Deng H T, Tian H W, *et al.* Habitat suitability of *Schizothorax wangchiachii* in the Heishui River of the lower Jinsha River tributary, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2024, **35**(11): 3183-3189. [谢伟, 邓华堂, 田辉伍, 等. 金沙江下游支流黑水河短须裂腹鱼栖息地的适宜性 [J]. *应用生态学报*, 2024, **35**(11): 3183-3189.]
- [32] Lü Y N, Xie Y, Wang S M, *et al.* Studies about Heishui River as an alternative habitat for aquatic biodiversity

- protection based on macroinvertebrate community similarity [J]. *China Environmental Science*, 2020, **40**(6): 2647-2657. [吕雅宁, 解莹, 王少明, 等. 基于底栖动物群落相似性的黑水河替代生境的研究 [J]. *中国环境科学*, 2020, **40**(6): 2647-2657.]
- [33] Lu Y, Wu Z H, Liu Q Y, *et al.* Evaluation of habitat restoration effect based on fish spawning requirements [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2023, **13**(2): 733-741. [鲁芸, 吴紫涵, 刘清园, 等. 基于鱼类产卵需求的栖息地修复效果评价 [J]. *环境工程技术学报*, 2023, **13**(2): 733-741.]
- [34] Shi X T, Bai T X, Xu J W, *et al.* Monitoring and evaluation of effectiveness through fishway in Songxin Hydropower Station of Heishui River, lower reaches of Jinsha River [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2023, **35**(3): 972-984. [石小涛, 白天翔, 许家炜, 等. 金沙江下游支流黑水河松新电站鱼道过鱼效果监测与评估 [J]. *湖泊科学*, 2023, **35**(3): 972-984.]
- [35] Ai W, Zhao Y H, Li Z M, *et al.* Research on optimization design of the entrance section of songxin fishway in Heishui River [J]. *Yunnan Water Power*, 2024, **40**(12): 37-40. [艾威, 赵英华, 李志敏, 等. 黑水河松新鱼道进口段优化设计研究 [J]. *云南水力发电*, 2024, **40**(12): 37-40.]
- [36] Vander Zanden M J, Rasmussen J B. Primary consumer $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ and the trophic position of aquatic consumers [J]. *Ecology*, 1999, **80**(4): 1395-1404.
- [37] Post D M, Pace M L, Hairston N G. Ecosystem size determines food-chain length in lakes [J]. *Nature*, 2000, **405**(6790): 1047-1049.
- [38] Jackson A L, Inger R, Parnell A C, *et al.* Comparing isotopic niche widths among and within communities: SIBER—Stable Isotope Bayesian Ellipses in R [J]. *Journal of Animal Ecology*, 2011, **80**(3): 595-602.
- [39] Cabana G, Rasmussen J B. Modelling food chain structure and contaminant bioaccumulation using stable nitrogen isotopes [J]. *Nature*, 1994, **372**(6503): 255-257.
- [40] Vander Zanden M J, Shuter B J, Lester N, *et al.* Patterns of food chain length in lakes: a stable isotope study [J]. *The American Naturalist*, 1999, **154**(4): 406-416.
- [41] Deng H T, Duan X B, Liu S P, *et al.* Temporal and spatial variations in the trophic structure of key species in downstream of the Daning River [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, **34**(23): 7110-7118. [邓华堂, 段辛斌, 刘绍平, 等. 大宁河下游主要鱼类营养结构的时空变化 [J]. *生态学报*, 2014, **34**(23): 7110-7118.]
- [42] Zhou Z, Huang Y B, Wang B L, *et al.* The analysis of food web structure in the area in front of the Three Gorges Dam using the stable isotope technology [J]. *Ecological Science*, 2020, **39**(5): 82-90. [周正, 黄宇波, 王斌梁, 等. 运用稳定同位素技术分析三峡坝前水域的食物网结构 [J]. *生态科学*, 2020, **39**(5): 82-90.]
- [43] Yao H W, Lin Z M, Chen M J, *et al.* Trophic structure of fish communities in Weishui reservoir based on stable isotope techniques [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2024, **48**(1): 120-129. [姚鸿伟, 林子木, 陈敏建, 等. 基于稳定同位素技术的沱水水库鱼类群落营养结构 [J]. *水生生物学报*, 2024, **48**(1): 120-129.]
- [44] Ye X Y, Ren L, Kuang Z, *et al.* Analysis of the trophic structure of fish populations in Yangcheng Lake based on stable isotope technology [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2021, **28**(6): 703-714. [叶学瑶, 任澆, 匡箴, 等. 基于稳定同位素技术的阳澄湖鱼类群落营养结构研究 [J]. *中国水产科学*, 2021, **28**(6): 703-714.]
- [45] Li X M, Zhu T B, Wang X G, *et al.* Study on trophic structure of fish communities in Changhu Lake based on stable carbon and nitrogen isotopes [J]. *Biotic Resources*, 2021, **43**(6): 545-551. [李学梅, 朱挺兵, 王旭歌, 等. 基于稳定同位素技术的长湖鱼类营养结构研究 [J]. *生物资源*, 2021, **43**(6): 545-551.]
- [46] Wen Z R, Xiong Y, Xu J, *et al.* The studies on the structures of the food web and the trophic relationships in the Gonghu Bay of the Taihu Lake [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2016, **40**(1): 131-138. [温周瑞, 熊鹰, 徐军, 等. 太湖贡湖湾食物网特征研究 [J]. *水生生物学报*, 2016, **40**(1): 131-138.]
- [47] Li B, Zheng Y C, Xu D D, *et al.* Seasonal variation in the consumption of food by fish in the Mituo floodplain waters of the Upper Yangtze River and implications for food web dynamics [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, **43**(4): 1664-1675. [李斌, 郑宇辰, 徐丹丹, 等. 长江上游弥陀漫滩水体鱼类食物网动态的季节性变化 [J]. *生态学报*, 2023, **43**(4): 1664-1675.]
- [48] Zhang F W, Li C L, Zi L. Analysis of precipitation characteristics of Jinsha River Basin [J]. *Yangtze River*, 2011, **42**(6): 94-97. [张方伟, 李春龙, 訾丽. 金沙江流域降水特征分析 [J]. *人民长江*, 2011, **42**(6): 94-97.]
- [49] Xiao X W, Wang Y Y, Zhang H, *et al.* Trophic position and its impact on fish in Raohe River during the dry season, Jiangxi Province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35**(18): 6216-6223. [肖协文, 王玉玉, 张欢, 等. 饶河枯水期主要鱼类营养级位置及其影响因素 [J]. *生态学报*, 2015, **35**(18): 6216-6223.]
- [50] Sun X, Fan D, Cheng P, *et al.* Source, transport and fate of terrestrial organic carbon from Yangtze River during a large flood event: Insights from multiple-isotopes ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$, $\Delta^{14}\text{C}$) and geochemical tracers [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2021, **308**: 217-236.
- [51] Xu J, Wen Z, Gong Z, *et al.* Seasonal trophic niche shift and cascading effect of a generalist predator fish [J]. *PLoS One*, 2012, **7**(12): e49691.
- [52] Hong Y X, Shi W Q, Chen Y C, *et al.* Succession of fish community in the mainstream of Lancang River during cascade hydropower development [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, **41**(1): 235-253. [洪迎新, 施文卿, 陈宇琛, 等. 水电梯级开发进程中澜沧江干流鱼类群落演变特征 [J]. *生态学报*, 2021, **41**(1): 235-253.]
- [53] Yan X, Cheng B X, Yang S R. An Ecological-Restoration Case Study of Mountain River: Analysis and Restoration Measures of Eco-environmental Issues of

- Heishui River [C]. Proceedings of the 2021 Science and Technology Annual Conference of the Chinese Society for Environmental Sciences - Session on Environmental Engineering Innovation and Application, **2021**: 105-112. [严鑫, 成必新, 杨少荣. 山区河流生态修复案例: 黑水河生态环境问题诊断及对策 [C]. 中国环境科学学会 2021 年科学技术年会——环境工程技术创新与应用分会场论文集. 天津, **2021**: 105-112.]
- [54] Chen H, Li Y L, Gao Z P, *et al.* Sources of shallow groundwater nitrate in the vegetable planting area of northern Henan and its response to heavy rainfall events [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2024, **40**(7): 943-953. [陈昊, 李艳利, 高振朋, 等. 豫北蔬菜种植区浅层地下水硝酸盐来源及对强降雨事件的响应 [J]. *生态与农村环境学报*, 2024, **40**(7): 943-953.]
- [55] Wadnerkar P D, Andrews L, Wong W W, *et al.* Land use and episodic rainfall as drivers of nitrogen exports in subtropical rivers: Insights from $\delta^{15}\text{N}\text{-NO}_3^-$, $\delta^{18}\text{O}\text{-NO}_3^-$ and ^{222}Rn [J]. *Science of the Total Environment*, 2021(758): 143669.
- [56] Teng H, Tian H W, Liu H W, *et al.* Fish resources status in Heishui River, a tributary of the lower reaches of Jinsha River [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, **40**(5): 1499-1511. [滕航, 田辉伍, 刘寒文, 等. 金沙江下游支流黑水河鱼类资源现状 [J]. *生态学杂志*, 2021, **40**(5): 1499-1511.]
- [57] Wang J, Yuan J, Tan X, *et al.* Stable isotope composition of particulate organic matters and dissolved nitrate in the Jinshui River, Upper Han River Basin [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35**(22): 7338-7346. [王婧, 袁洁, 谭香, 等. 汉江上游金水河悬浮物及水体碳氮稳定同位素组成特征 [J]. *生态学报*, 2015, **35**(22): 7338-7346.]
- [58] Liu S Q, Shen M H, Liu X Q. Trophic niche analysis of fish in Taihu Lake using stable isotopes of carbon and nitrogen [J]. *Journal of Hydroecology*, 2023, **44**(5): 76-83. [刘素群, 申明华, 刘学勤. 基于碳氮稳定同位素的太湖鱼类营养生态位研究 [J]. *水生态学杂志*, 2023, **44**(5): 76-83.]
- [59] He S J, Gou J M, Yin J, *et al.* Community structure of zooplankton and its relationship with water environmental factors in Ningxia section of the main stream of the Yellow River [J]. *Water Resources and Power*, 2022, **40**(10): 66-69. [贺树杰, 苟金明, 尹娟, 等. 黄河干流宁夏段浮游动物群落结构及其与水环境因子的关系 [J]. *水电能源科学*, 2022, **40**(10): 66-69.]
- [60] Correa S B, Winemiller K O. Niche partitioning among frugivorous fishes in response to fluctuating resources in the Amazonian floodplain forest [J]. *Ecology*, 2014, **95**(1): 210-224.
- [61] Flood P J, Loftus W F, Trexler J C. Fishes in a seasonally pulsed wetland show spatiotemporal shifts in diet and trophic niche but not shifts in trophic position [J]. *Food Webs*, 2023, **34**: e00265.
- [62] Cardoso D C, de Hart P, de Carvalho Freitas C E, *et al.* Diet and ecomorphology of predator fish species of the Amazonian floodplain lakes [J]. *Biota Neotropica*, 2019, **19**(3): e20180678.
- [63] McMeans B C, Kadoya T, Pool T K, *et al.* Consumer trophic positions respond variably to seasonally fluctuating environments [J]. *Ecology*, 2019, **100**(2): e02570.
- [64] Lu Y N, Zhang R, Zhang H, *et al.* Seasonal variation in the trophic structure of food webs in coastal waters of Jiangsu Province based on stable isotope techniques [J]. *Haiyang Xuebao*, 2022, **44**(2): 1-10. [陆亚楠, 张瑞, 张虎, 等. 应用稳定同位素技术研究江苏近海食物网营养结构的季节性变化 [J]. *海洋学报*, 2022, **44**(2): 1-10.]
- [65] Jennings S, van der Molen J. Trophic levels of marine consumers from nitrogen stable isotope analysis: estimation and uncertainty [J]. *ICES Journal of Marine Science*, 2015, **72**(8): 2289-2300.
- [66] Del Rio-Salas M, Martínez-Durazo A, Castro-Longoria R, *et al.* Temporal variabilities of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ in an ecosystem from the Central-East Gulf of California: estimating trophic relationships [J]. *Aquatic Ecosystem Health & Management*, 2019, **22**(1): 40-52.
- [67] Zheng Y, Niu J, Zhou Q, *et al.* Effects of resource availability and hydrological regime on autochthonous and allochthonous carbon in the food web of a large cross-border river (China) [J]. *Science of the Total Environment*, 2018(612): 501-512.
- [68] Yuan H R, Chen P M, Qin C X, *et al.* Seasonal variation of fish community structure in Zhelin Bay, the South China Sea [J]. *South China Fisheries Science*, 2017, **13**(2): 26-35. [袁华荣, 陈丕茂, 秦传新, 等. 南海柘林湾鱼类群落结构季节变动的研究 [J]. *南方水产科学*, 2017, **13**(2): 26-35.]
- [69] Bolnick D I. Intraspecific competition favours niche width expansion in *Drosophila melanogaster* [J]. *Nature*, 2001, **410**(6827): 463-466.
- [70] Ji W W, Jiang Y Z, Ruan W, *et al.* Stable isotope analysis on the feeding character of representative fishes during spring in central and northern East China Sea and south Yellow Sea [J]. *Marine Fisheries*, 2013, **35**(4): 415-422. [纪炜炜, 姜亚洲, 阮雯, 等. 基于稳定同位素方法分析东海中北部及黄海南部春季主要鱼类的食性特征 [J]. *海洋渔业*, 2013, **35**(4): 415-422.]
- [71] Cajado R A, de Oliveira L S D, Corrêa, J M S, *et al.* Seasonal hydrology shapes the taxonomic and functional diversity of fish associated with aquatic macrophytes in a neotropical floodplain lake [J]. *Aquatic Sciences*, 2025, **87**(2): 52.
- [72] Lin H J, Qin C X, Li X G, *et al.* Food web analysis in Zhelin Bay marine ranching [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2018, **42**(7): 1026-1039. [林会洁, 秦传新, 黎小国, 等. 柘林湾海洋牧场不同功能区食物网结构 [J]. *水产学报*, 2018, **42**(7): 1026-1039.]

SEASONAL VARIATION IN FISH TROPHIC STRUCTURE OF THE HEISHUI RIVER BASED ON CARBON AND NITROGEN STABLE ISOTOPES

LI Wen-Jing^{1,2}, LI Bo^{1,2}, HU Fan-Xu^{1,2} and JIANG Wei^{1,2}

(1. National Engineering Research Center of Eco-Environment in the Yangtze River Economic Belt, China Three Gorges Corporation, Wuhan 430014, China; 2. Hubei Key Laboratory of Three Gorges Project for Fish Resource Conservation, Chinese Sturgeon Research Institute of China Three Gorges Corporation, Yichang 443100, China)

Abstract: To investigate the characteristics and seasonal variations of the aquatic food web in the Heishui River Basin, fishery resources were collected from different river sections in July (wet season) and November (dry season) of 2024. Based on the carbon and nitrogen stable isotope values of the main consumers and prey organisms, the SIBER model was used to analyze the seasonal differences in fish trophic levels and community trophic structure. The $\delta^{13}\text{C}$ values of organisms ranged from -20.45‰ to -5.27‰ in the wet season and from -29.40‰ to -1.12‰ in the dry season; $\delta^{15}\text{N}$ values ranged from 0.88‰ to 14.68‰ in the wet season and from 0.87‰ to 12.66‰ in the dry season. The trophic level of fish ranged from 1.817 to 3.918, with no significant overall difference between the wet and dry seasons ($P>0.05$). However, significant seasonal variations occurred in certain species: the average trophic level of *Abbottina obtusirostris* and *Zacco platypus* was significantly higher in the wet season ($P<0.001$), whereas that of *Schistura fasciolata* was significantly higher in the dry season ($P<0.01$). These findings reflect species-specific adaptations to seasonal hydrology and food resource changes. Trophic structure indices (NR, CR, TA, CD, MNND, and SDNND) were generally higher in the dry season, indicating a more diverse basal food source, more distinct trophic niche differentiation, higher community diversity, weaker interspecific trophic competition, and lower trophic redundancy during the dry season. These results provide a case reference for food webs research in mountain river ecosystems and offer a theoretical basis for ecosystem health assessment and targeted conservation management of the Heishui River.

Key words: the Heishui River; Food webs; Stable isotopes; Fish; Trophic structure; Seasonal variation