

Wang K H, Jia J, Wu W J, *et al.* Ecological stoichiometry characteristics of three dominant fish species in typical plain lakes in Hubei Province, China [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2025, 49(10): 102503. [王克焕, 贾佳, 吴卫菊, 等. 湖北省典型平原湖泊中三种优势鱼类的生态化学计量特征 [J]. *水生生物学报*, 2025, 49(10): 102503.]

湖北省典型平原湖泊中三种优势鱼类的生态化学计量特征

王克焕^{1,2} 贾佳¹ 吴卫菊³ 卢胜红³ 熊雄¹ 陈晓飞³ 吴辰熙¹

(1. 中国科学院水生生物研究所, 武汉 430072; 2. 中国科学院大学, 北京 101408; 3. 湖北省生态环境科学研究院, 武汉 430072)

摘要: 为探究湖北省典型平原湖泊中三种优势鱼类的生态化学计量特征, 研究系统采集了湖北省内8个典型平原湖泊中三种优势鱼类(鲫、似鲮和鲮)样品, 并分析了其碳(C)、氮(N)、磷(P)组成特征及与环境因子之间的关系。结果表明, 三种鱼类C、N、P元素含量分别为29.2%—50.8%、6.91%—13.7%和1.75%—6.79%, C:N、C:P、N:P分别为11.38—66.35、3.64—5.91和2.27—16.96, 其中P含量的变异系数最大。三种鱼类C、N、P含量及比值具有显著种间差异($P<0.05$), 且P含量上差异最为明显。非参数检验结果表明, 三种鱼类部分元素含量及其比值在不同营养水平湖泊间具有显著差异($P<0.05$), 且与湖泊营养状态指数显著相关($P<0.05$), 并且随着湖泊营养程度增加, 鲫、似鲮和鲮更倾向于脂肪富集。总之, 在不同生存环境条件下, 三种鱼类的生态化学计量特征并未维持严格的稳态机制, 而是受到湖泊营养状态的影响。

关键词: 生态化学计量学; 鱼类; 种间差异; 浅水湖泊; 营养状态

中图分类号: Q178.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3207(2025)10-102503-10

doi: 10.3724/1000-3207.2025.2025.0073 **CSTR:** 32229.14.SSSWXB.2025.0073



生态化学计量学(Ecological stoichiometry)是结合生态学和化学计量学的基本原理, 研究生态过程中生物体内能量和多重化学元素(主要是碳、氮和磷)平衡关系及其随生物和非生物环境因子变化规律的一门科学^[1-3]。目前, 生态化学计量学理论已广泛应用于各种生态系统中消费者驱动的养分循环、生物体内稳性及限制性元素判断等研究^[4]。相较于陆地生态系统, 水域生态系统有着不同的物理和化学特性^[5]。现阶段, 国内在水生态系统生态化学计量学研究中的对象多为浮游生物^[6, 7]、底栖动物^[8, 9]和沉水植物^[10, 11], 而对鱼类的研究报道则较少。

鱼类是水生态系统重要组成部分, 在水生态系统中处于不同消费者层次和生态位^[12]。作为水生态系统中主要消费者, 鱼类在水生态系统的物质循环和能量流动中起着重要的作用^[13]。目前, 鱼类生态化学计量研究主要是基于动态平衡原理(Homeo-

stasis)和生长速率理论(Growth rate hypothesis)。动态平衡原理指的是有机体的元素组成与它们周围环境养分元素供应保持相对稳定的状态^[1], 它是生态化学计量学存在的理论依据, 是生物体适应环境变化的结果^[14]; 生长速率理论是指与C:N:P、RNA分配和有机体生活史相关的机制^[1, 15], 它认为生物体必须改变自身C:N:P来适应生长速率的改变, 其中有机体C:N:P变化主要是由P含量变化决定的^[16]。国内外对鱼类生态化学计量特征研究主要集中在单一湖泊或者小范围海域、河口内的种间差异和种内变异^[17-20], 针对在气候和地理环境相似的湖泊间差异性研究较少。此外, 虽然已有研究表明水体富营养化可导致蓝鳃太阳鱼、铜绿棱螺和日本沼虾等生态化学计量特征发生显著变化^[21-23], 但这些研究都是在人为控制营养下进行, 对自然状态下鱼类应对环境改变的研究缺乏。

收稿日期: 2025-03-06; **修订日期:** 2025-05-15

基金项目: 国家自然科学基金(52070190); 湖北省生态环境厅环保科研项目(HBXLD-202408-FW048)资助 [Supported by the National Natural Science Foundation of China (52070190); the Environmental Protection Research Project of Hubei Provincial Department of Ecology and Environment (HBXLD-202408-FW048)]

作者简介: 王克焕(1998—), 男, 博士; 研究方向为水生态修复和营养循环。E-mail: wangkehuan@ihb.ac.cn

通信作者: 吴辰熙(1981—), 男, 博士, 研究员; 研究方向为污染物生态学。E-mail: chenxi.wu@ihb.ac.cn

湖北省位于长江中下游流域, 是我国淡水湖泊分布最为集中的区域之一, 有着千湖之省的美誉^[24], 湖泊水面面积在100 km²以上的湖泊有长湖、梁子湖、洪湖等^[25], 这些湖泊具有丰富的生态和生物多样性。因此, 本研究以湖北省典型平原湖泊为研究区域, 通过对比分析不同营养状态浅水湖泊中优势鱼类生态化学计量特征及其环境响应机制, 揭示鱼类通过调节体内元素平衡来实现对不同营养状态湖泊的生存适应, 为阐明水生生物元素调控机制与水生态系统营养动态关联提供了关键理论依据。

1 材料与方法

1.1 采样点设置和采样时间

2023年5—10月, 分别对梁子湖、长湖、黄盖湖、龙感湖、斧头湖、南湖、后官湖和涨渡湖8个平原湖泊进行渔获物和水样的调查采样(图1), 每个湖泊仅进行1次采样, 且至少布设3个采样点, 鱼样品采集的同时采集水样。这些湖泊具有水文连通多样性(涵盖了通江型、半封闭型和封闭型湖泊)、具有代表性的营养状态梯度(从中营养至中度富营养)和受人类干扰程度(典型城市湖泊至自然湖泊)等特点, 有利于分析鱼类生态化学计量特征对不同环境背景下的响应。

1.2 样品采集与元素测定

现场测定水体的温度(WT)、电导率(EC)、溶解氧(DO)、透明度(SD)和pH, 并将采集的水样带回实验室测定常规水质指标。总氮(TN)、总磷(TP)、总有机碳(TOC)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})和叶绿素 a (Chl. a) 分别采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法、钼酸

铵分光光度法、燃烧氧化-非分散红外吸收法、高锰酸钾氧化法和丙酮提取分光光度法测定, 具体方法参考《水和废水监测分析方法》(第四版)^[26]。

鱼样通过复合刺网(高2.0 m, 长36.0 m, 网目分别为1.0、1.6、2.0、2.5、3.1、4.0、4.8、6.0、7.5、8.5、11.0和12.5 cm)和地笼(长14 m, 宽0.4 m, 高0.4 m, 网目为1.5 cm)采集。每个采样点布设1条浮网、1条沉网和1个地笼, 定置时间为12h (18:00至次日6:00)。选取鲫(*Carassius auratus*)、似鲮(*Toxabramis swinhonis*)和鳊(*Hemiculter leucisculus*)3个优势种为研究对象, 这3种鱼类具有典型生态功能分化: 鲫为底层杂食性鱼类, 摄食底栖生物、藻类和有机碎屑; 似鲮和鳊属中上层浮游生物食性鱼类。此外, 3种鱼类具有广布性、强适应性及不同营养级代表特征, 其生态化学计量特征差异能够体现浅水湖泊优势鱼类元素内稳态调节机制对水体富营养化的响应。

本研究在龙感湖、梁子湖、黄盖湖、斧头湖、长湖、涨渡湖及南湖共采集鲫样本185尾; 在龙感湖、梁子湖、黄盖湖、后官湖及南湖共采集似鲮237尾; 同时在梁子湖、南湖和后官湖共采集鳊样本97尾(表1)。同种鱼类取样时尽量选择体长相近的成年个体, 现场测量3种鱼类个体的体长(± 1 mm)及体重(± 0.1 g), 将鱼类样品-20℃冷冻保存带回实验室。为避免鱼类消化道内含物的影响, 本研究中的所有鱼类内脏均被去除^[17]。

处理后的全鱼样品经冷冻干燥直至恒重后研磨混匀过60目筛网, 过筛样品保存于干燥皿内待测。称取10.0—20.0 mg过筛样品, 用锡舟包被后采

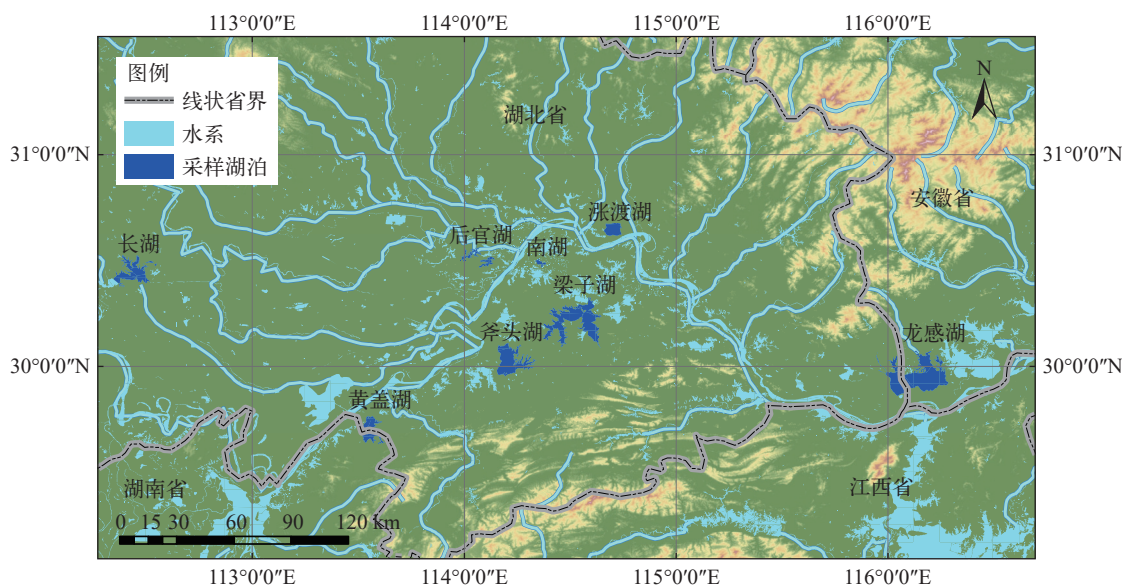


图1 采样湖泊分布图

Fig. 1 Distribution of sampling lakes

用元素分析仪(Elementar Vario Cube)测定C和N含量。称取50.0 mg左右过筛样品于50 mL锥形瓶中,加入1.0 mL蒸馏水湿润样品,再加入5.0 mL的消解液($\text{H}_2\text{SO}_4:\text{H}_2\text{O}_2=5:2$)置于加热板上380℃消解,至液体呈现均匀棕褐色,室温冷却后滴加0.5 mL 40% H_2O_2 于锥形瓶中继续进行消解,重复多次直至溶液清亮,冷却后定容至50 mL,采用钼锑抗比色法测定P含量。C、N、P含量结果以干质量百分比(%)表示,C:N、C:P、N:P为元素的摩尔质量比。

1.3 数据处理与分析

参照《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)对8个湖泊的水环境质量进行评价。进一步通过TN、TP、 COD_{Mn} 、Chl.*a*和SD计算湖泊的综合营

表1 八个湖泊三种鱼类基本信息

Tab. 1 Basic information of three fish samples collected from the eight lakes

物种Species	采样湖泊 Sampling lake	样本数 <i>n</i>	体长Body length (mm)	湿重Wet weight (g)
鲫 <i>Carassius auratus</i>	龙感湖	30	163.1±15.0	124.1±35.2
	梁子湖	16	172.7±18.3	162.3±47.1
	黄盖湖	10	243.7±38.0	345.6±98.4
	斧头湖	44	155.8±20.5	112.5±55.7
	长湖	23	171.0±19.1	172.7±77.5
	涨渡湖	30	147.7±9.2	97.7±22.5
似鲮 <i>Toxabramis swinhonis</i>	南湖	32	128.0±27.9	71.9±48.8
	龙感湖	30	114.9±5.8	17.1±3.2
	梁子湖	72	108.9±7.4	13.6±2.7
	黄盖湖	25	106.6±6.0	13.1±2.4
	后官湖	44	99.2±4.8	8.0±1.2
鳊 <i>Hemiculter leuciscus</i>	南湖	66	98.5±9.1	10.1±3.4
	梁子湖	16	11.2±0.8	17.4±3.6
	南湖	55	11.7±1.3	19.4±6.3
	后官湖	16	10.6±1.5	11.1±5.2

表2 调查期间8个湖泊水体理化指标

Tab. 2 Physical and chemical parameters of the eight lakes during survey

指标 Index	龙感湖 Longgan Lake	梁子湖 Liangzi Lake	黄盖湖 Huanggai Lake	斧头湖 Futou Lake	长湖 Changhu Lake	涨渡湖 Zhangdu Lake	南湖 Nanhu Lake	后官湖 Houguan Lake
WT (°C)	22.2±0.2	30.8±1.4	25.2±0.3	27.2±0.8	15.4±0.9	25.3±0.4	22.0±0.7	21.3±0.2
DO (mg/L)	6.12±0.4	10.0±1.7	7.44±0.75	9.84±1.36	6.28±0.77	10.1±0.6	9.83±1.29	7.86±0.94
SD (m)	0.11±0.04	0.51±0.11	0.17±0.04	0.43±0.23	0.23±0.20	0.20±0.02	0.35±0.08	0.26±0.01
pH	8.44±0.20	8.85±0.24	8.71±0.10	8.44±0.07	8.48±0.07	8.01±0.93	8.57±0.26	8.51±0.43
EC (μs/cm)	297±20	370±34	176±37	275±11	390±46	314±4	314±17	274±9
TN (mg/L)	1.17±0.33	0.630±0.224	1.81±0.83	0.638±0.164	2.34±1.33	0.863±0.170	1.34±0.25	0.983±0.526
TP (mg/L)	0.111±0.047	0.052±0.03	0.133±0.073	0.046±0.02	0.164±0.072	0.147±0.005	0.174±0.016	0.120±0.013
COD_{Mn} (mg/L)	3.91±1.26	3.77±0.43	3.43±1.18	3.31±0.59	6.59±1.21	2.21±0.38	5.52±0.42	2.04±0.63
Chl. <i>a</i> (μg/L)	17.8±14.1	36.2±15.0	59.5±51.7	21.0±12.4	9.63±6.48	13.3±9.15	46.3±16.2	31.7±8.07
TOC (mg/L)	7.76±1.02	10.5±0.9	7.58±1.11	7.61±0.49	3.79±0.37	7.74±1.12	12.0±2.6	9.05±1.12
TLI	59.1±4.9	51.7±4.3	62.2±5.8	49.8±5.6	60.8±5.4	54.0±3.0	62.4±1.3	55.0±4.0

养状态指数TLI并进行分级^[27]。TLI≤30为贫营养, 30<TLI≤50为中营养, 50<TLI≤60为轻度富营养, 60<TLI≤70为中度富营养, TLI>70为重度富营养。

运用Excel2021对数据进行预处理, SPSS27.0进行数据统计分析, Graphad Prism10、Origin2021和R (v4.2.3)进行绘图。通过Kruskal-Wallis检验和Mann-Whitney U检验来分析3种鱼类生态化学计量特征种间差异及不同营养类型湖泊之间鱼类种内差异。采用线性混合效应模型探讨3种鱼类生态化学计量特征与生长参数、水环境因子之间潜在联系,进一步使用R包glmm.hp进行层次分割评估水体营养盐参数和生长参数对3种鱼类生态化学计量特征变化的贡献度。以个体大小为协变量,使用偏相关分析来研究3种鱼类生态化学计量特征与水体综合营养状态指数之间的相关性。

2 结果

2.1 湖泊水环境现状

长湖的TN (2.34±1.33) mg/L和 COD_{Mn} (6.59±1.21) mg/L平均含量最高, Chl.*a* (9.63±6.48) μg/L和TOC (3.79±0.370) mg/L平均含量最低; 梁子湖的TN (0.630±0.224) mg/L和TP (0.0517±0.0298) mg/L平均含量最低; 南湖的TP (0.174±0.015) mg/L和TOC (12.0±2.64) mg/L平均含量最高; 后官湖的 COD_{Mn} (2.04±0.626) mg/L平均含量最低; 黄盖湖的Chl.*a* (59.5±51.7) μg/L平均含量最高(表2)。

8个湖泊的水环境质量评价结果显示梁子湖和斧头湖的 COD_{Mn} 浓度达到Ⅱ类水标准, TN和TP符合Ⅲ类标准; 涨渡湖和后官湖 COD_{Mn} (Ⅱ类)、TN(Ⅲ类)达标, 但TP处于Ⅴ类标准; 龙感湖和南湖TN处于Ⅳ类水标准, TP为Ⅴ类水; 黄盖湖和长湖的TN、TP浓度均处于Ⅴ类, 水质较差。龙感湖、梁

子湖、黄盖湖、斧头湖、长湖、涨渡湖、南湖和后官湖TLI分别为 59.1 ± 4.9 、 51.7 ± 4.3 、 62.2 ± 5.8 、 49.8 ± 5.6 、 60.8 ± 5.4 、 54.0 ± 3.0 、 62.4 ± 1.3 和 55.0 ± 4.0 。按营养状态分类标准划分, 斧头湖为中营养湖泊, 龙感湖、梁子湖、涨渡湖、后官湖为轻度富营养湖泊, 黄盖湖、长湖和南湖为中度富营养湖泊。

2.2 三种鱼类体内元素组成

鲫、似鲮和鲮3种鱼类体内元素组成整体差异较大(图2), C含量为29.2%—47.2%、35.8%—47.5%和36.2%—50.8%, 变异系数(CV)为11.1%、5.01%和5.97%; N含量为6.91%—12.6%、10.1%—13.7%和9.37%—12.8%, CV为15.3%、6.06%和7.48%; P含量为2.20%—6.79%、1.75%—4.44%和1.93%—4.69%, CV为24.4%、16.4%和13.8%; C:N值为3.77—

5.69、3.64—5.00和3.74—5.91, CV为8.06%、8.55%和9.94%; C:P分别为11.38—55.38、21.18—66.35和19.93—63.49, CV为41.2%、20.4%和20.2%; N:P值为2.27—12.64、5.05—16.96和4.66—13.87, CV为45.2%、20.3%和18.4%。三种鱼类体内C、N和P含量变异系数由大到小排列均为 $P > N > C$ 。

2.3 三种鱼类生态化学计量特征种间差异

如图3所示, 鲫比似鲮和鲮两种小型鱼类具有更高P含量和C:N值和更低的C:P值。似鲮和鲮两种小型鱼类之间的C、N、P元素含量和比值的差异则较小。

进一步非参数检验结果表明(图4), 3种鱼类C、N、P元素含量和比值存在显著性差异($P < 0.05$)。其中, 似鲮的N含量、C:P和N:P要显著高于鲫和鲮;

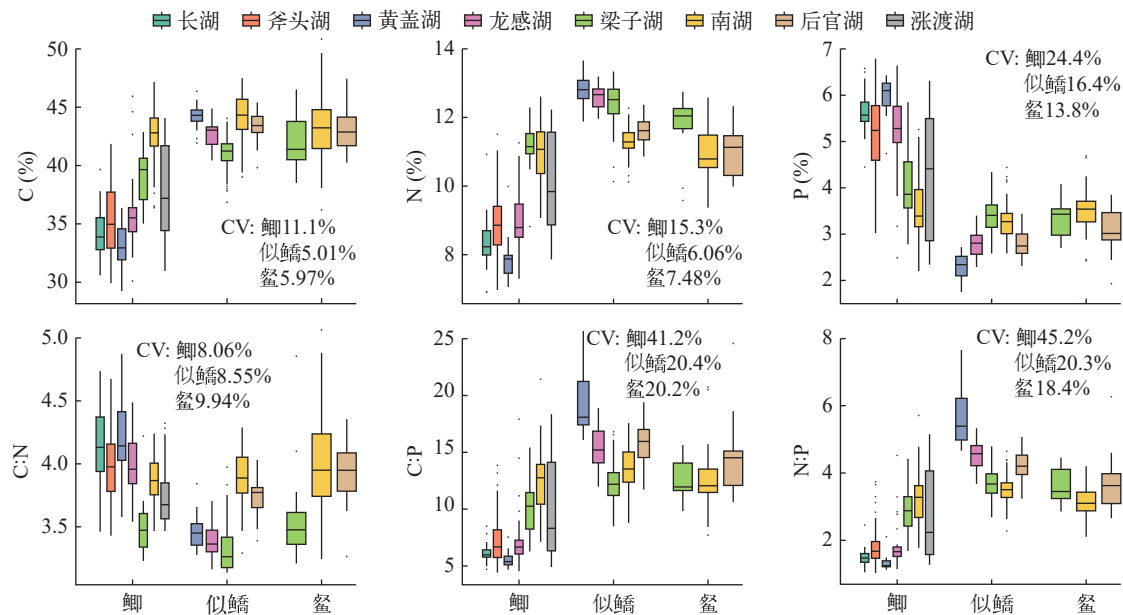


图2 八个湖泊三种鱼类碳、氮、磷元素含量及比值

Fig. 2 Contents and ratios of carbon, nitrogen, and phosphorus of the three fish species from eight lakes

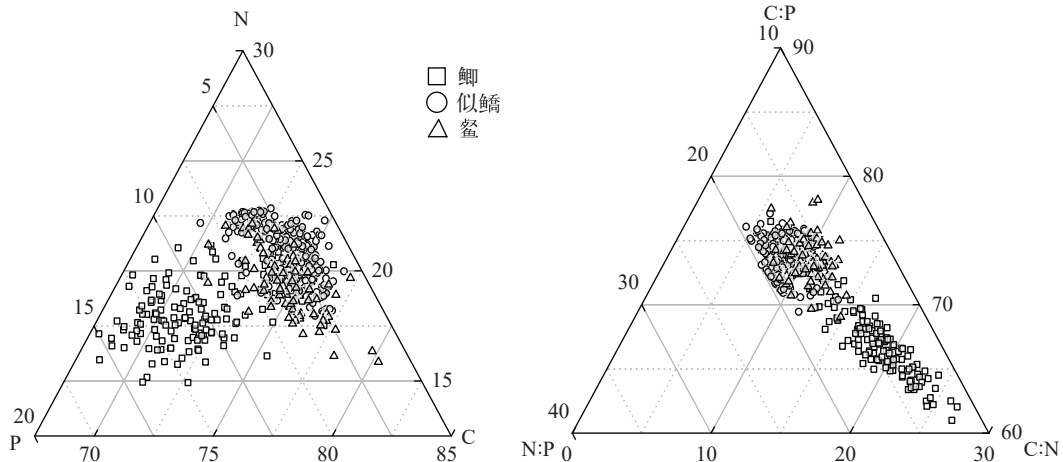


图3 三种鱼类碳、氮、磷元素含量和比值三元图

Fig. 3 Ternary plot of carbon, nitrogen, and phosphorus content and their ratios of the three fish species

鲫的P含量要显著高于似鲮和鲮; 鲫的C含量显著低于似鲮和鲮; 似鲮的C:N则显著低于鲫和鲮。

2.4 三种鱼类生态化学计量特征与湖泊水环境关系

非参数检验结果表明(图 5), 3种鱼类C、N、P含量及其比值在不同营养状态湖泊中都存在显著差异($P<0.05$)。鲫在富营养湖泊中C和N含量显著高于中营养湖泊, P含量则无显著性差异。此外, 中度富营养化湖泊中鲫体内C:N显著高于轻度富营养化湖泊, 但C:P和N:P在两种营养类型湖泊间无显著性差异。似鲮在中度富营养湖泊中C含量、C:N和C:P显著高于轻度富营养湖泊, N含量相反, P含量和N:P则无显著性差异。在中度富营养湖泊中, 鲮体内P含量和C:N显著高于轻度富营养湖泊, N含量和N:P显著低于轻度富营养湖泊, C含量和C:P则无显著性差异。

线性混合效应模型和层次分割结果表明(图 6), 鲫的体长和干重两种生长参数对其体内C:N贡献显著(贡献率42.0%, $P<0.05$), 而水体中营养盐参数

对鲫体内C:P和N:P贡献分别为55.6%和51.0%, 其中水体TOC对鲫体内C:P和N:P表现出显著驱动效应($P<0.05$)。似鲮和鲮C:N和C:P同样受生长参数(体长和干重)显著影响($P<0.05$), 但其整体贡献率低于水环境营养盐参数。此外, 水体TP对似鲮和鲮C:N也表现出显著驱动效应($P<0.05$)。

偏相关分析结果表明(图 7), 鲫、鲮和似鲮体内C:N与TLI显著正相关($R^2<0.01$, $P=0.002$; $R^2=0.09$, $P=0.026$; $R^2=0.35$, $P<0.001$); 鲫和鲮体内C:P与TLI无显著相关性, 而似鲮体内C:P与TLI显著正相关($R^2=0.21$, $P<0.001$); 鲮体内N:P与TLI显著负相关($R^2=0.09$, $P<0.026$), 似鲮相反($R^2=0.05$, $P<0.001$), 鲫体内N:P与TLI无显著相关性。

3 讨论

3.1 三种鱼类元素组成及变化特征

前人的研究表明, 鱼体内C元素含量与脂质或碳水化合物相关; N含量与蛋白质相关; P含量不仅

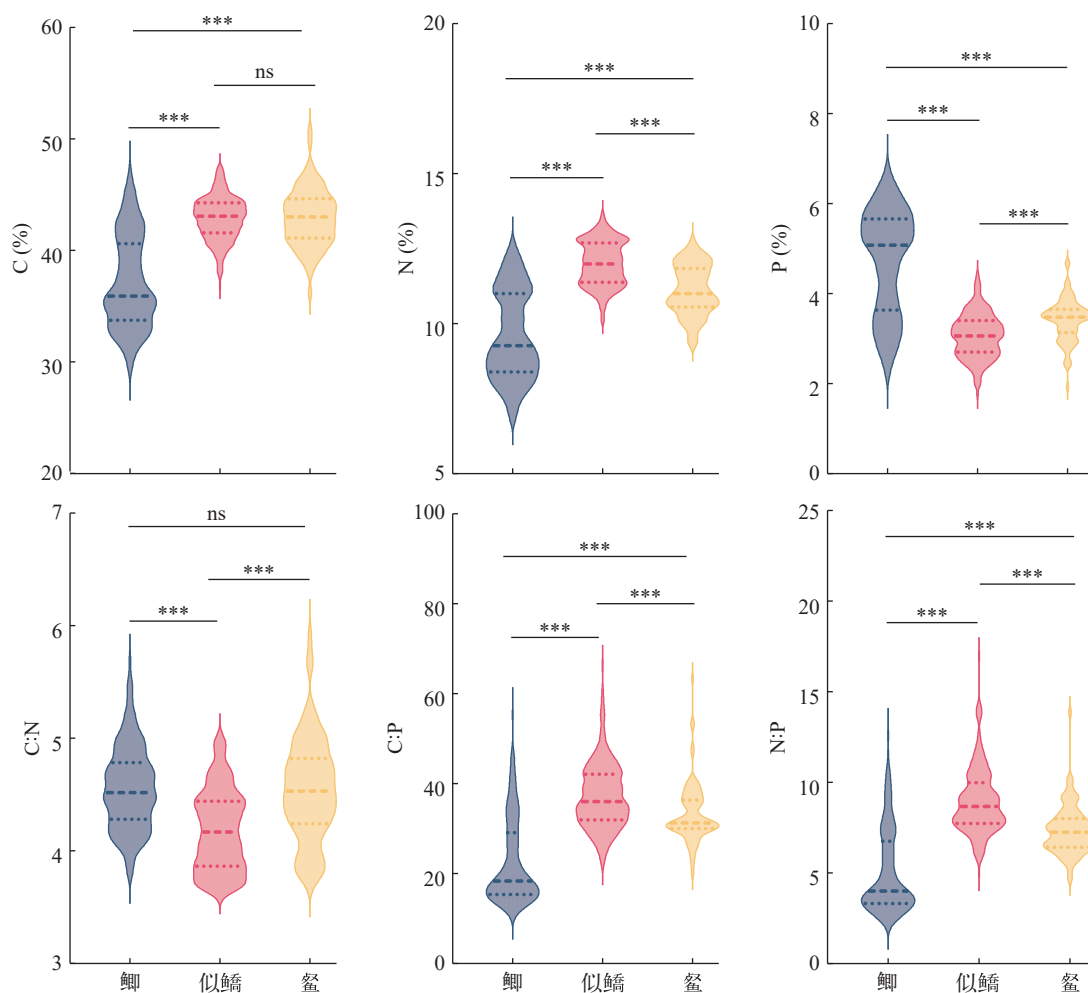


图4 三种鱼类碳、氮、磷元素含量和比值小提琴图

Fig. 4 Violin plot of carbon, nitrogen and phosphorus content, and their ratios of the three fish species

ns $P>0.05$, * $P<0.05$, ** $P<0.01$, *** $P<0.001$; 下同The same applies below

与RNA和DNA相关^[28],还与骨骼结构中的磷灰石及肌肉中的磷酸肌酸相关^[29]。因此,探明不同湖泊中鱼类的C、N和P元素含量特征及,有利于进一步了解这3种鱼类对环境的适应性。

在本研究的8个平原湖泊中,鲫、似鲮和鲮3种鱼类C、N、P元素含量变化较大,与C和N元素含量相比,P元素含量变化更为明显(变异系数 $P>N>C$;图2)。Wang等^[20]和Sun等^[30]分别对北部湾和长江口鱼类的生态化学计量特征进行调查,本研究结果与两者结果相似,鱼体内P含量变化均大于C和N。已有研究表明,类群内化学计量变异与类群间化学计量变异相当或更为显著,而这种变异主要由P含量变化所驱动^[31]。鱼体P含量与系统发育密切相关,P含量的变化是导致鱼体元素组成多样性的主要因子^[12]。

3.2 三种鱼类元素组成的种间差异

已有研究结果表明鱼类的生态化学计量特征存在种间差异,其中在P含量的差异上最为明显。Guo等^[19]研究发现草鱼(*Ctenopharyngodon idella*)、鲤(*Cyprinus carpio*)和尼罗罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)之间C、N、P含量其比值存在种间差异,其中尼罗罗非鱼P含量显著高于其他两种鱼类。在本研究中,3种鱼类的生态化学计量特征存在显著种间差异,在P含量上差异尤为明显,与上述结论一致。此外,浮游生物食性的似鲮和鲮体内N含量和

N:P显著高于杂食性鱼类的鲫($P<0.05$),这与朱利明等^[32]的研究结果相似。鱼类食性和系统发育共同驱动了其体内生态化学计量特征的种间差异^[33,34],鱼体内P含量变化与骨骼和鳞片的形成密切相关^[35],在分类科级水平下,同为鲤科的3种鱼类P含量差异可能由骨骼差异所造成,此外不同饮食结构差异也可能是造成3种鱼类化学计量特征种间差异的重要驱动因素^[36]。

在鱼类生态化学计量研究中,C:N可以准确地反映鱼体脂肪含量,较高的C:N对应较高的脂肪含量和较低的蛋白质含量,较大的个体能够储存更多的脂肪^[37],研究表明许多鱼类体内脂肪含量随着食物增加而增加^[38];生长速率和体型是驱动N:P变化的重要因素,较高N:P对应较高的生长速率和更细长的体型^[39]。因此,生长速率和体型所驱动的3种鱼类生态化学计量特征种间差异需进一步从系统发育角度进行分析。

3.3 三种鱼类元素组成与湖泊营养状态之间的关系

本研究结果表明水环境营养状况驱动了3种鱼类个体层面生态化学计量的种内变异,其中C:N、C:P、N:P与水体营养状态之间存在显著相关性,并且对水体营养程度增加有着不同响应方式。偏相关结果显示(图7):3种鱼类体内C:N与TLI指数显著正相关,而鱼类体内C:N含量与脂肪含量密切相关,在水体营养程度增加下,鲫、似鲮和鲮3种鱼

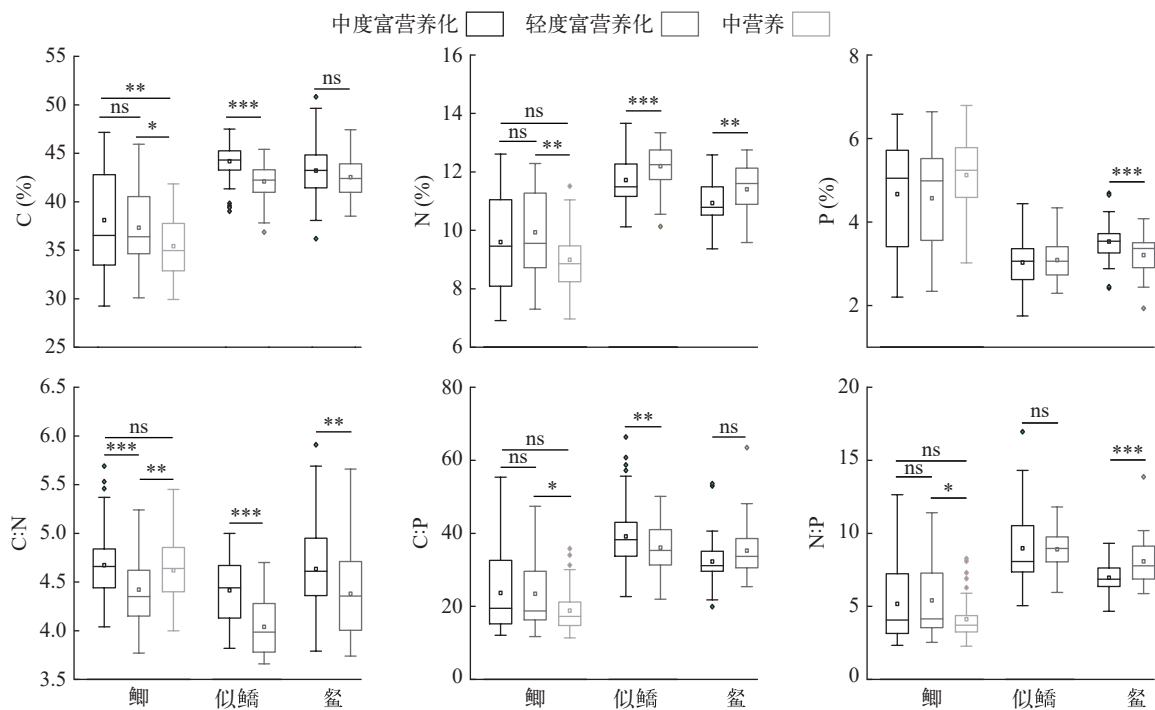


图5 不同营养级湖泊中鱼类碳、氮、磷含量和比值箱线图

Fig. 5 Box plots of the carbon, nitrogen and phosphorus contents and their ratios of three fish species from lakes with different trophic levels

类均倾向于脂肪富集。此外, 似鲮体内C:P与N:P也与TLI指数显著正相关, 湖泊营养程度变化直接或间接驱动了似鲮的生长效应。

消费者体内元素组成是将生物体与环境变化相联系的关键参数, 水体营养状况变化会直接或间接影响消费者的食物来源和组成, 进而对消费者体

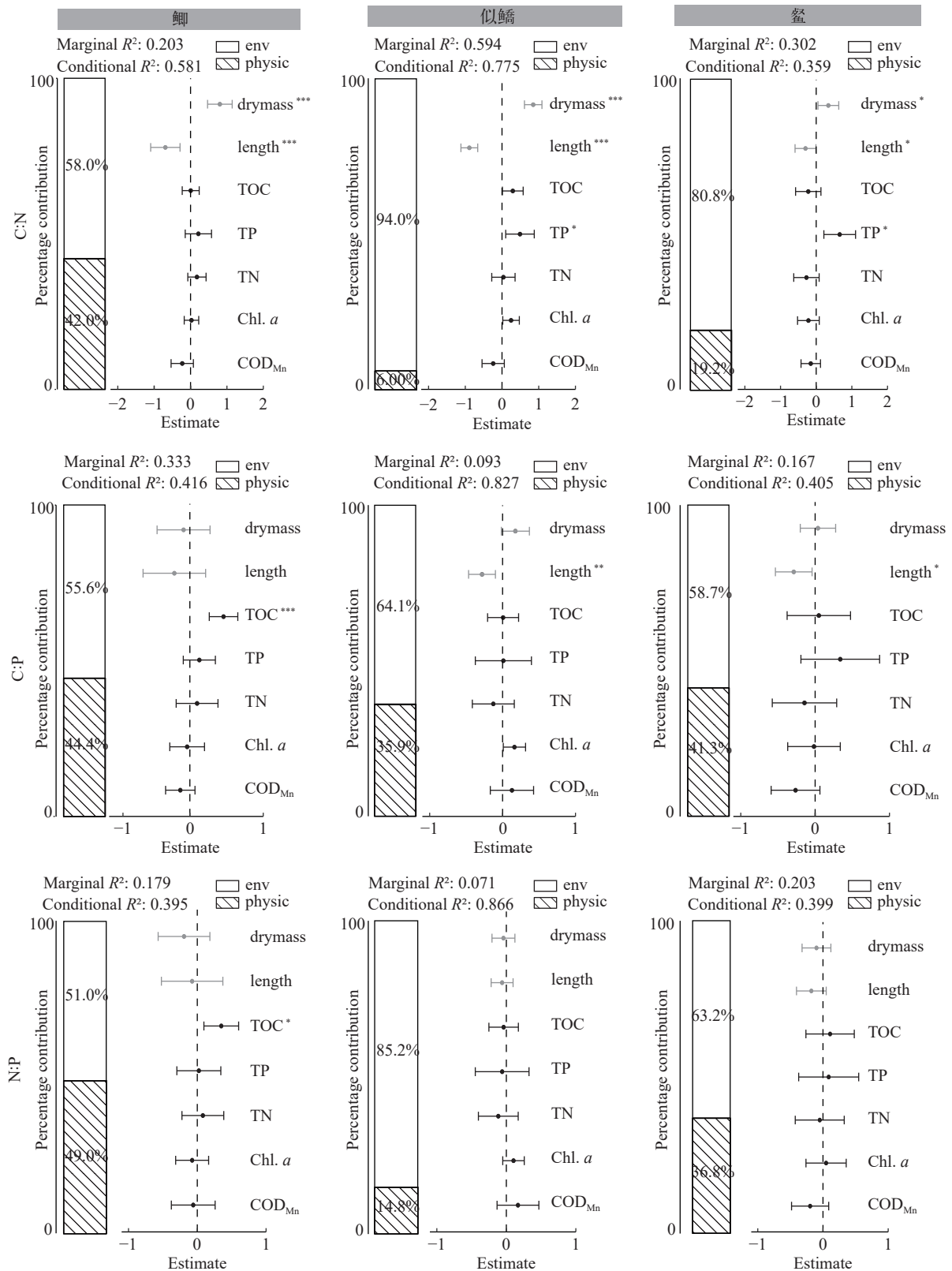


图6 三种鱼类C:N、C:P、N:P线性混合效应模型及层次分割结果

Fig. 6 Linear mixed effects model and hierarchical partitioning of C:N, C:P and N:P in three fish species

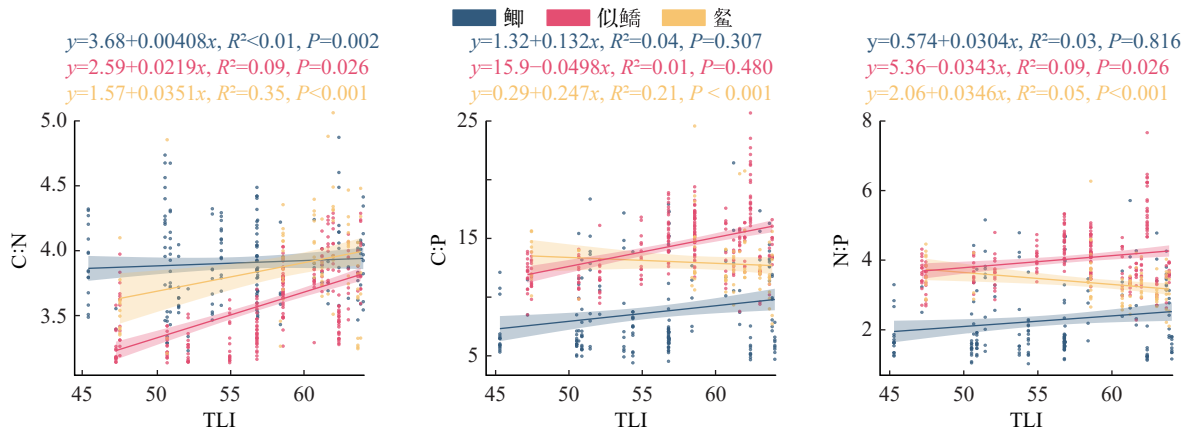


图7 三种鱼类C:N、C:P、N:P与TLI相关性分析

Fig. 7 Correlation analysis results of relationships between C:N, C:P, N:P and TLI of three fishes species

内元素含量产生影响。Mäkelin等^[40]的研究发现,底栖动物的化学计量特征会随着食物来源和环境条件的变化而变化。另有结果发现,在操纵营养供应下,蓝鳃太阳鱼(*Lepomis macrochirus*)体内化学计量特征也随之发生变化^[22]。在本研究中,3种鱼类在水体营养程度加深下生态化学计量特征的改变可能是环境变化直接或间接改变它们食物来源所导致。其中似鲮和鲮是中上层浮游食性小型鱼类,在水体营养状态程度增加一定范围内,浮游生物大量繁殖,为它们提供丰富食物来源,组织中储存了更多脂肪。

此外,朱利明等^[32]和Wang等^[20]分别对三峡水库小江流域和北部湾海域鱼类生态化学计量学研究发现,在营养状态差异较小的水体中,鱼类体内元素含量与大部分水体营养盐参数无显著相关性,具有较强的稳态机制。与上述研究类似,本研究中大部分营养盐参数与鱼类体内元素含量及比值无显著相关性,其原因可能是单一营养盐并不能完全反映湖泊营养状态及食物来源。尽管如此,本研究中不同营养湖泊间3种鱼类元素组成的显著种内差异及随TLI指数显著性变化间接证实了鱼类并未维持严格的稳态机制,鱼类体内元素组成随水环境营养程度变化而发生改变。

4 结论

本研究通过分析湖北省典型平原湖泊中鲫、似鲮和鲮3种优势鱼类碳氮磷生态化学计量特征,揭示了3种鱼类生态化学计量特征随湖泊营养状态变化的响应机制。研究结果表明:(1)湖北省典型平原湖泊中鲫、似鲮和鲮的生态化学计量特征存在显著种间差异($P < 0.05$),鲫体内C和N含量显著低于似鲮和鲮,P含量则相反;(2)环境要素对湖北省典型

平原湖泊中鲫、似鲮和鲮的生态化学计量特征驱动效应强于鱼类个体层面变异;(3)湖北省典型平原湖泊中鲫、似鲮和鲮并未维持严格的稳态机制,3种鱼类生态化学计量特征在不同营养湖泊之间存在显著种内差异($P < 0.05$),随着水体营养程度加深,3种鱼类均倾向于脂肪的富集。基于本研究结果,在渔业资源管理、湖泊治理与保护过程中应更加关注水体营养状态的调控,控制外源性营养物质输入,合理放养或人工调控鱼类种群结构,避免水体长期富营养化对鱼类体内营养物质改变。在评估湖泊生态系统健康状况时,考虑将水生生物生态化学计量特征纳入评估范畴,更准确地反映湖泊生态系统变化。

(作者声明本文符合出版伦理要求)

参考文献:

- [1] Sterner R W, Elser J J. Ecological Stoichiometry: The Biology of Elements from Molecules to the Biosphere [M]. Princeton: Princeton University Press, 2002: 15-16.
- [2] He J S, Han X G. Ecological stoichiometry: Searching for unifying principles from individuals to ecosystems [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, **34**(1): 2-6. [贺金生, 韩兴国. 生态化学计量学: 探索从个体到生态系统的统一化理论 [J]. *植物生态学报*, 2010, **34**(1): 2-6.]
- [3] Xing W, Liu H, Liu G H. Ecological stoichiometry in aquatic ecosystems: studies and applications [J]. *Plant Science Journal*, 2015, **33**(5): 608-619. [邢伟, 刘寒, 刘贵华. 生态化学计量学在水生态系统中的研究与应用 [J]. *植物科学学报*, 2015, **33**(5): 608-619.]
- [4] Zeng D H, Chen G S. Ecological stoichiometry: a science to explore the complexity of living systems [J]. *Acta Phytoecologica Sinica*, 2005, **29**(6): 1007-1019. [曾德慧, 陈广生. 生态化学计量学: 复杂生命系统奥秘的探索 [J]. *植物生态学报*, 2005, **29**(6): 1007-1019.]
- [5] Wang F, Guo X T, Dong S L. Reviews on ecological stoichiometry in aquatic ecosystem [J]. *Periodical of Ocean*

- University of China, 2015, **45**(12): 16-23. [王芳, 国先涛, 董双林. 水域生态系统生态化学计量学研究进展 [J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2015, **45**(12): 16-23.]
- [6] Chen L, Li C L, Zhao Z X, *et al.* N/P ratio imbalance affects compositions of diatom bodies and nutrient concentration of culture [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2016, **47**(1): 9-15. [陈蕾, 李超伦, 赵增霞, 等. N/P比失衡对两种硅藻元素组成及水体中氮磷组成的影响 [J]. 海洋与湖沼, 2016, **47**(1): 9-15.]
- [7] Xu D L, Lin N F, Zou C X, *et al.* The spatial differences analysis of ecological stoichiometric characteristics of Lake Taihu food web [J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(12): 4681-4689. [徐德琳, 林乃峰, 邹长新, 等. 太湖食物网生态化学计量学特征空间差异 [J]. 中国环境科学, 2017, **37**(12): 4681-4689.]
- [8] Cai Y J, Xue Q J, Lu Y J, *et al.* C: N: P stoichiometry of five common macrozoobenthic taxa in shallow lakes along the Yangtze River [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2015, **27**(1): 76-85. [蔡永久, 薛庆举, 陆永军, 等. 长江中下游浅水湖泊5种常见底栖动物碳、氮、磷化学计量特征 [J]. 湖泊科学, 2015, **27**(1): 76-85.]
- [9] Zhang H Y, Zhang Y C, An W C, *et al.* Ecological stoichiometric characteristics of two dominant macrozoobenthos taxa in Dalian Island, northern Yellow Sea, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2024, **35**(11): 3157-3164. [张合烨, 张琰超, 安文聪, 等. 黄海北部褡裢岛近岸海域大型底栖动物优势种的生态化学计量特征 [J]. 应用生态学报, 2024, **35**(11): 3157-3164.]
- [10] Li W, Fu H, Cao T, *et al.* Distribution and carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometric characteristics of submersed macrophytes in Lake Fuxian [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2017, **29**(2): 448-457. [李威, 符辉, 曹特, 等. 抚仙湖沉水植物分布及其碳、氮和磷化学计量学特征 [J]. 湖泊科学, 2017, **29**(2): 448-457.]
- [11] Hu C, Hu G, Zhang Z H, *et al.* Stoichiometric characteristics of submerged macrophytes in the Chengjiang karst wetland, Guangxi, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, **41**(13): 5300-5308. [胡聪, 胡刚, 张忠华, 等. 广西澄江喀斯特湿地沉水植物碳、氮、磷化学计量特征 [J]. 生态学报, 2021, **41**(13): 5300-5308.]
- [12] Hendrixson H A, Sterner R W, Kay A D. Elemental stoichiometry of freshwater fishes in relation to phylogeny, allometry and ecology [J]. *Journal of Fish Biology*, 2007, **70**(1): 121-140.
- [13] Jiang Z G. *Conservation Biology* [M]. Hangzhou: Zhejiang Science & Technology Press, 1997: 20-31. [蒋志刚. 保护生物学 [M]. 杭州: 浙江科学技术出版社, 1997: 20-31.]
- [14] Yu Q, Chen Q, Elser J J, *et al.* Linking stoichiometric homeostasis with ecosystem structure, functioning and stability [J]. *Ecology Letters*, 2010, **13**(11): 1390-1399.
- [15] Elser J J, Fagan W F, Denno R F, *et al.* Nutritional constraints in terrestrial and freshwater food webs [J]. *Nature*, 2000, **408**(6812): 578-580.
- [16] Elser J J, Acharya K, Kyle M, *et al.* Growth rate-stoichiometry couplings in diverse biota [J]. *Ecology Letters*, 2003, **6**(10): 936-943.
- [17] Boros G, Jyväsjärvi J, Takács P, *et al.* Between-lake variation in the elemental composition of roach (*Rutilus rutilus* L.) [J]. *Aquatic Ecology*, 2012, **46**(4): 385-394.
- [18] El-Sabaawi R W, Kohler T J, Zandoná E, *et al.* Environmental and organismal predictors of intraspecific variation in the stoichiometry of a neotropical freshwater fish [J]. *PLoS One*, 2012, **7**(3): e32713.
- [19] Guo X, Liu F, Wang F. Carbon, nitrogen, and phosphorus stoichiometry of three freshwater cultured fishes in growth stage [J]. *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2018, **18**(2): 239-245.
- [20] Wang C, Zhu L, Huang L, *et al.* Ecological stoichiometric characteristics of three dominant fish species from the Beibu Gulf: inter- and intraspecific variations [J]. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2023(11): 1176052.
- [21] Elser J J, Sterner R W, Galford A E, *et al.* Pelagic C:N:P stoichiometry in a eutrophied lake: responses to a whole-lake food-web manipulation [J]. *Ecosystems*, 2000, **3**(3): 293-307.
- [22] Downs K N, Hayes N M, Rock A M, *et al.* Light and nutrient supply mediate intraspecific variation in the nutrient stoichiometry of juvenile fish [J]. *Ecosphere*, 2016, **7**(10): e01452.
- [23] Feng M, Cheng H, Zhang P, *et al.* Stoichiometric stability of aquatic organisms increases with trophic level under warming and eutrophication [J]. *Science of The Total Environment*, 2023(858): 160106.
- [24] Qin B Q. Approaches to mechanisms and control of eutrophication of shallow lakes in the middle and lower reaches of the Yangze River [J]. *Journal of Lake Science*, 2002, **14**(3): 193-202. [秦伯强. 长江中下游浅水湖泊富营养化发生机制与控制途径初探 [J]. 湖泊科学, 2002, **14**(3): 193-202.]
- [25] Yan Z W, Xiao G Q, Zhou Y Z. Distribution and morphological characteristics of main lakes in Hubei Province [J]. *Journal of Hubei University of Arts and Science*, 2022, **43**(11): 72-75. [晏志伟, 肖贵清, 周彦洲. 湖北省主要湖泊分布及形态特征 [J]. 湖北文理学院学报, 2022, **43**(11): 72-75.]
- [26] Editorial Board of Water and Wastewater Monitoring and Analysis Methods, State Environmental Protection Administration. Water and Wastewater Monitoring and Analysis Methods: 4th edition [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002: 88-430. [国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法: 第4版 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 88-430.]
- [27] Jin X C. Lake Environment in China [M]. Beijing: Ocean Press, 1995: 234-302. [金相灿. 中国湖泊环境 [M]. 海洋出版社, 1995: 234-302.]
- [28] Wei H, Liang Y, Luo Q, *et al.* Environmental-related variation of stoichiometric traits in body and organs of non-native sailfin catfishes *Pterygoplichthys* spp [J]. *Ecology and Evolution*, 2022, **12**(11): e9483.
- [29] Breves G, Schröder B. Comparative aspects of gastroin-

- testinal phosphorus metabolism [J]. *Nutrition Research Reviews*, 1991, **4**(1): 125-140.
- [30] Sun P, Li X, Gong X, *et al.* Carbon, nitrogen and phosphorus ecological stoichiometry of *Lateolabrax maculatus* and *Acanthogobius ommaturus* in the Estuary of Yangtze River, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, **34**(4): 196-203.
- [31] Villar-Argaiz M, López-Rodríguez M J, Tierno de Figueroa J M. Body P content increases over ontogeny in hemimetabolous macroinvertebrates in a Mediterranean high mountain stream [J]. *Aquatic Ecology*, 2020, **54**(4): 1185-1200.
- [32] Zhu L M, Zou X, Shi F, *et al.* The C: N: P ratio in muscle tissue of fish from Xiaojiang River [J]. *Journal of Hydroecology*, 2022, **43**(5): 106-116. [朱利明, 邹曦, 史方, 等. 三峡水库小江流域常见鱼类肌肉碳、氮、磷生态化学计量特征 [J]. 水生态学杂志, 2022, **43**(5): 106-116.]
- [33] Pilati A, Vanni M J. Ontogeny, diet shifts, and nutrient stoichiometry in fish [J]. *Oikos*, 2007, **116**(10): 1663-1674.
- [34] Boros G, Sály P, Vanni M J. Ontogenetic variation in the body stoichiometry of two fish species [J]. *Oecologia*, 2015, **179**(2): 329-341.
- [35] Wang C G, Zhu L, Huang L L, *et al.* Ecological stoichiometry characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus in fishes from Beibu Gulf, Southern China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, **43**(10): 4226-4241. [王才广, 朱亮, 黄亮亮, 等. 北部湾鱼类碳、氮、磷生态化学计量特征 [J]. 生态学报, 2023, **43**(10): 4226-4241.]
- [36] Andrieux B, Signor J, Guillou V, *et al.* Body stoichiometry of heterotrophs: Assessing drivers of interspecific variations in elemental composition [J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2021, **30**(4): 883-895.
- [37] Sweeting C J, Polunin N V C, Jennings S. Effects of chemical lipid extraction and arithmetic lipid correction on stable isotope ratios of fish tissues [J]. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 2006, **20**(4): 595-601.
- [38] Van Ham E H, Berntssen M H G, Imsland A K, *et al.* The influence of temperature and ration on growth, feed conversion, body composition and nutrient retention of juvenile turbot (*Scophthalmus maximus*) [J]. *Aquaculture*, 2003, **217**(1/2/3/4): 547-558.
- [39] Tanner D K, Brazner J C, Brady V J. Factors influencing carbon, nitrogen, and phosphorus content of fish from a Lake Superior coastal wetland [J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2000, **57**(6): 1243-1251.
- [40] Mäkelin S, Villnäs A. Food sources drive temporal variation in elemental stoichiometry of benthic consumers [J]. *Limnology and Oceanography*, 2022, **67**(4): 784-799.

ECOLOGICAL STOICHIOMETRY CHARACTERISTICS OF THREE DOMINANT FISH SPECIES IN TYPICAL PLAIN LAKES IN HUBEI PROVINCE, CHINA

WANG Ke-Huan^{1,2}, JIA Jia¹, WU Wei-Ju³, LU Sheng-Hong³, XIONG Xiong¹, CHEN Xiao-Fei³ and WU Chen-Xi¹

(1. Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China; 2. University of Chinese Academy of Science, Beijing 101408, China; 3. Hubei Academy of Ecological and Environmental Sciences, Wuhan 430072, China)

Abstract: In order to explore the ecological stoichiometry characteristics of three dominant fish species in typical plain lakes in Hubei Province, this study systematically collected samples of three dominant fish species (crucian carp, *Toxabramis swinhonis* and *Hemiculter leucisculus*) from eight typical plain lakes in Hubei Province, China, and analyzed their carbon (C), nitrogen (N), and phosphorus (P) composition characteristics and correlations with environmental factors. The results showed that the content of C, N, and P in the three fish species ranged from 29.2%—50.8%, 6.91%—13.7%, and 1.75%—6.79%, with C:N, C:P, and N:P were 11.38—66.35, 3.64—5.91, and 2.27—16.96, respectively, among which P content exhibited the highest coefficient of variation. The content and ratio of C, N, and P in the three fish species showed significant interspecific differences ($P < 0.05$), and the difference in P content was most obvious. Nonparametric tests showed that certain elemental contents and ratios differed significantly among lakes with varying nutrient levels ($P < 0.05$), and correlated significantly with the trophic status index ($P < 0.05$). In addition, as the lake nutrient levels increased, three fish species tended to accumulate more fat. Overall, under the change of living environment, the ecological stoichiometric characteristics of three fish species did not maintain strict dynamic balance but were regulated by the nutrient status of the lake.

Key words: Ecological stoichiometry; Fish; Interspecific differences; Shallow lake; Trophic status