

DOI: 10.12264/JFSC2025-0043

地理环境因素对鳙生长的影响

方宇航^{1,2}, 陈永进², 何斌³, 薛雪², 杨云磊^{1,2}, 徐东坡^{1,2*}

1. 上海海洋大学水产与生命学院, 上海 201306;

2. 中国水产科学研究院淡水渔业研究中心/农业农村部淡水渔业和种质资源利用重点实验室, 江苏 无锡 214081;

3. 四川省农业科学院水产研究所, 四川 成都 611730

摘要: 为揭示地理环境因素对鳙(*Hemiculter leucisculus*)生长的调控机制及其生态适应策略, 本研究基于 2022—2024 年对乌梁素海、松花湖、衡水湖、太湖、蠡湖、白马湖、邳海、洱海等 8 个典型湖泊的生态调查数据, 整合经纬度梯度、湖盆形态和水体理化参数等多维度环境变量, 运用皮尔逊相关分析、冗余分析及广义可加模型, 系统解析了环境异质性的影响。结果表明: 鳙的生长系数 K 和拐点年龄 t_1 主要受岸线发育系数(SDI)和透明度(SD)影响。当 SDI 为 0.3~0.4、SD 为 0.5~1 m 时, 生长系数 K 最大, 而拐点年龄 t_1 最小。此外, 水深也是影响鳙拐点年龄的重要因素, 两者之间成负相关关系; 水温和水深是影响鳙的渐进体长的关键因素。渐进体长在 18~20 °C 时达到最大值, 在水深为 15 m 时达到最小值。本研究构建了湖泊形态-水文参数耦合的生长预测模型, 证实地理环境因素通过改变饵料分布格局间接影响鱼类生活史策略, 为流域尺度下鱼类资源适应性管理提供了量化依据, 也为渔业资源的可持续利用和生态管理提供了科学指导。

关键词: 鳙; 广义加性模型; 冗余分析; 生长系数; 拐点年龄; 水文因子; 环境参数

中图分类号: S931

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2025)07-0901-13

鱼类生长参数是指用于评估鱼类个体或群体生长状况的量化指标体系, 主要包括生长系数(growth coefficient, K)、生长拐点(inflexion point, t_1)、渐进体长(asymptotic length, L_∞)和生长性能指数(growth performance index, ϕ')等, 这些参数不仅能够反映鱼类在不同环境条件下的生长潜力和适应性, 还能为渔业资源评估、养殖管理以及生态保护提供重要的科学依据^[1]。生长系数反映了鱼类接近其最大理论体长的速率, 其值越大表明生长速度越快; 生长拐点则是指生长速率由加速增长转变为减速增长的转折点, 通常与鱼类的性成熟年龄、能量分配策略以及生活史特征密切相关^[2]。此外, 渐进体长代表在理想条件下鱼类可能达到的最大理论体长, 而生长性能指数则综合了 K 和

L_∞ 的信息, 可用于不同种类或种群间的生长性能比较^[3]。这些参数不仅被广泛应用于描述鱼类的生长模式, 还能有效评估环境因子(如温度、饵料可得性等)对鱼类生活史特征的影响。近年来整合生理学、生态学和多组学数据的跨学科研究, 为深入理解鱼类生长参数的生物学机制及其在气候变化背景下的适应性演化提供了新的研究思路^[4]。

湖泊环境因子是调控湖泊生态系统结构与功能的关键驱动要素, 涵盖物理、化学和生物 3 类维度, 通过多尺度相互作用动态塑造水体环境特征及生物群落的适应策略。大量研究发现, 温度、光照、溶解氧、pH、营养盐浓度及水文形态等环境参数对鱼类的生长具有显著影响^[5]。但环境因素对于鱼类生长的影响并非简单的线性关系, 往

收稿日期: 2025-04-13; 修订日期: 2025-06-18.

基金项目: 农业农村部财政专项“西南地区重点水域渔业资源与环境调查”; 中国水产科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(2023TD65); 国家农业科学渔业资源环境滨湖观测实验站(NAES013FS05).

作者简介: 方宇航(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为渔业生态学. E-mail: 2506058391@qq.com

通信作者: 徐东坡, 研究员, 研究方向为渔业资源保护与利用. E-mail: xudp@ffrc.cn

往存在环境因子之间、环境因子与鱼类种群之间复杂的相互作用^[6]。光照强度变化会影响温度和水体深度,而温度和深度对植食性和杂食性鱼类的饵料资源以及鱼类的繁殖行为具有显著的影响,且生物体对环境的响应模式通常都是非线性的,随着环境因子的动态变化而变化^[7]。因此,单一的线性分析手法不足以充分地阐述环境因素和鱼类之间的复杂相互关系,尤其在跨地理梯度下多湖泊系统的空间异质性调控效应研究领域仍存在显著空白。

鲮(*Hemiculter leucisculus*)是鲤科、鲮属的一种在中国淡水水系中广泛分布的小型经济鱼类,体侧扁背缘平直,腹缘略呈弧形,自胸鳍基下方至肛门具腹棱,体背部青灰色,腹侧银色,尾鳍边缘灰黑色(图 1)。它在生态系统中扮演着关键角色,既是水生食物链的重要组成部分,也是众多捕食者的重要食物来源。自 19 世纪起,已有学者对我国各水域鲮的生活史进行研究,相关研究涵盖了黑龙江流域^[8]、内蒙古的达赉湖^[9]向南延伸至广东的东江^[10],以及高原地区的洱海^[11]等水域。这些研究时间跨度较长,局限在于对鲮缺乏系统性解析介绍,且相关结果受渔业资源保护活动的影响,增加了全面整合鲮生活史策略的复杂性。本研究以鲮为研究对象,根据纬度、面积、地形、深度和水温等环境因素,选择了我国不同地理区域的 8 个具有典型特征且生境各异的湖泊,探究其生长参数和外部环境之间的关系,并量化这些因素对鲮生长的影响程度。旨在揭示鱼类生长如何响应环境的变化,并探究鲮在多种水体环境中建立种群的适应性,以期鱼类资源保护和管理提供科学建议。



图 1 鲮的简图

Fig. 1 A simple diagram of *Hemiculter leucisculus*

1 材料与方法

1.1 调查时间和区域

根据地形和经纬度,本研究于 2022—2024 年对 8 个典型湖泊进行调查。湖泊位置如图 2 所示,分别为位于内蒙古的乌梁素海,水域面积约 325 km²,平均水深 1.5 m;松花湖位于吉林省吉林市,水域面积约为 554 km²,平均水深 35 m;衡水湖位于河北省衡水市,水域面积约为 75 km²,平均水深 1.75 m;太湖是中国第 3 大淡水湖,位于江苏和浙江两省交界处,水域面积约为 2338 km²,平均水深 1.8 m;蠡湖位于江苏省无锡市西南郊,水域面积约为 9.1 km²,平均水深 2.2 m;白马湖位于江苏省淮安市境内,水域面积约为 113 km²,平均水深 1.5 m;邛海位于四川省西昌市境内,水域面积约为 28 km²,平均水深 14 m;洱海作为云南省第二大淡水湖,水域面积约 252 km²,平均水深 10.8 m。

1.2 数据采集和环境调查

使用多目复合刺网及定置(串联)倒须笼壶收集鲮样本。每个站位每次放置 3 条多目复合刺网和 3 条定置(串联)倒须笼壶。多目复合刺网网目尺寸为 1.2、2、4、6、8、10、14 cm,每条网长 125 m、高 1.5 m。定置(串联)倒须笼壶网目尺寸为 1.6 cm,每条网长 10 m、宽 0.4 m、高 0.4 m。网具放置 12 h 后收集渔获物。鲮的种类鉴定依据《江苏鱼类志》和《中国淡水鱼类检索》,将鱼类鉴定到种,并用游标卡尺和电子天平测定所有鱼类的全长、体长和体质量,体长精确到 0.01 mm,体质量精确到 0.01 g。

各湖泊的环境参数参考前人已发表的研究^[12-19]。本文使用的环境参数包括:经度 Lon、纬度 Lat、水域面积 s 、海拔 H_1 、蓄水量 S 、岸线发育系数 SDI、水质 WQ、综合营养状态指数 TLI、年气温超 20 °C 天数 Time、平均水温 WT、平均气温 T 、平均水深 H 、透明度 SD、溶解氧 Do、pH、总磷 TP、总氮 TN、叶绿素 chl-a、浮游动物密度 zoo 和浮游植物密度 phy。

1.3 生长参数计算

本研究选择平均体重 AW、平均体长 AL、条件因子 a 、异速生长因子 b 、渐近体长 L_∞ 、渐近体重 W_∞ 、生长系数 K 、拐点年龄 t_1 、生长性能指

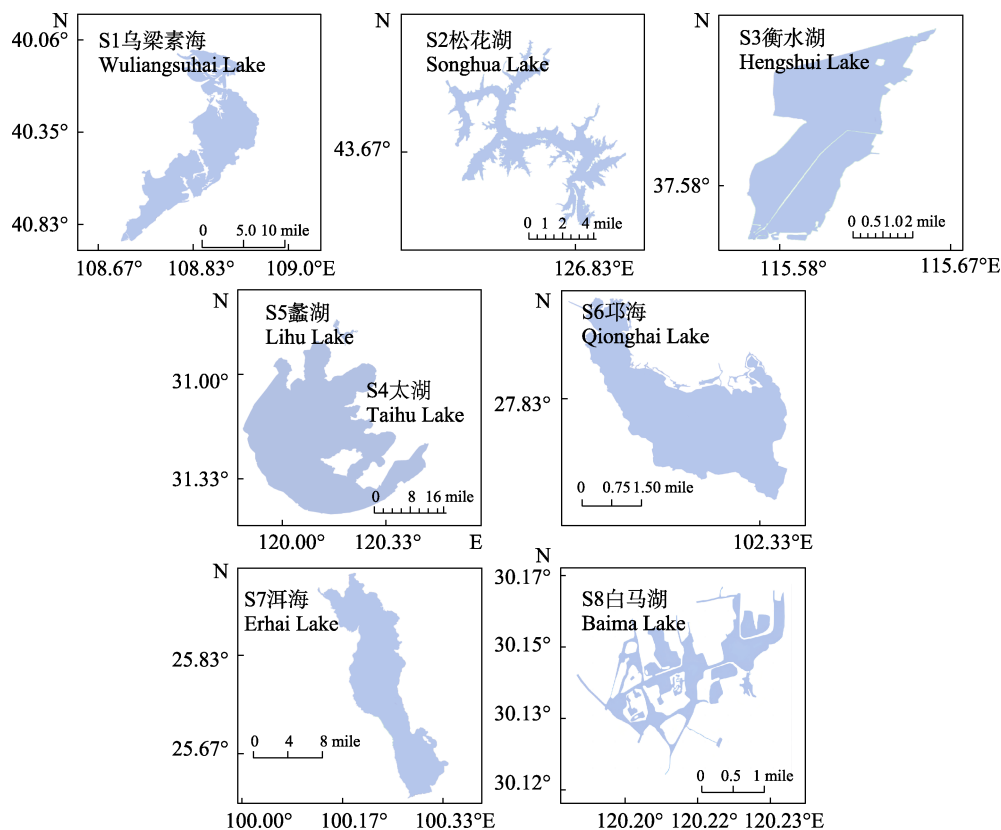


图 2 采样地点
Fig. 2 Sampling locations

数 φ' 等生长参数量化蟹生长状况。平均体长和平均体重采用算术平均值法计算。条件因子和异速生长因子的计算基于体长-体重关系的幂函数拟合, 其表达式为:

$$W = aL^b$$

式中, W 为体重, L 表示体长, a 、 b 为参数。 a 为条件因子, 常表征鱼群生存环境优越程度; b 为异速生长因子, 当 $b=3$ 时, 表示鱼类个体等速生长; $b>3$ 时, 表示鱼体呈正异速增长; $b<3$ 时, 鱼体呈负异速增长。

渐近体长、渐近体重和生长系数用 FiSAT II 中的体长频率分析法(ELEFAN I)进行估算, 以 Von-Bertalanffy 生长方程拟合蟹的生长:

$$L_t = L_\infty [1 - e^{-k(t-t_0)}]$$
$$W_t = W_\infty [1 - e^{-K(t-t_0)}]^b$$

式中, L_t 为 t 龄时的体长, W_t 表示 t 龄时的体重, t_0 表示理论上的生长起点年龄。可根据 K 值将鱼类划分为 3 种类型: $K>0.2$, 快速生长型; $0.1<K\leq 0.2$, 中速生长型; $0.05<K\leq 0.1$, 缓慢生长型。

拐点年龄是鱼类生长特征的重要参数, 表示鱼类体重生长速率达到最大值时所对应的年龄, 根据 Pauly 的经验公式计算:

$$\ln(-t_0) = -0.3922 - 0.2752 \ln L_\infty - 1.038K$$
$$t_1 = \ln b / K + t_0$$

运用生长性能指数(growth performance index, φ')来衡量鱼类的总体生长表现, 其计算公式为:

$$\varphi' = \lg K + 2 \lg L_\infty$$

1.4 数据处理

本文数据使用 Microsoft Excel 2019 进行整理汇总, 并使用 OriginPro 2018 软件绘制不同湖泊蟹生长参数的分布图。采用皮尔斯相关性分析方法, 利用 R 语言(3.21 版本, vegan 包)分析环境因子和蟹生长参数之间的相关性。其中, $P<0.01$ 代表相关性极显著, $P<0.05$ 代表显著。随后, 使用 Canoco 5 软件进行冗余分析(RDA)解析具体的环境因子对蟹生长参数的影响, 并进一步筛选显著影响蟹生长参数的关键环境因子。最后, 构建广义加性模型(GAM), 拟合具体生长参数(生长系数、渐进体长、生长拐点)

和环境因素的最佳关系。为了避免生长参数为零的情况, 对所有的名义生长参数值加上常数 1, 并进行对数化处理, 其表达式为:

$$\log(Y+1) = \beta_0 + s(x_1) + s(x_2) + s(x_3) + \dots + \varepsilon$$

式中, Y 为鳙的生长参数, β_0 为截距, x 为环境因子, ε 是服从正态分布的随机误差项。在模型构建过程中, 采用逐步法对各因子进行筛选, 以赤池信息量准则(AIC)作为模型选择标准, 从单一变量开始^[20], 依次在 AIC 最小的模型上添加其他环境变量, 通过循环迭代的方式, 直至筛选出 AIC 值最小的模型作为最优模型^[21]。GAM 模型使用 R 语言中的 mgcv 包进行。

2 结果与分析

2.1 不同湖泊中鳙的体长与体重组成

不同湖泊中鳙的体长和体重分布如图 3 所示。松花湖鳙样本平均体长最大, 为(143.6±22.49) mm, 其次从大到小依次为蠡湖、邳海、乌梁素海、洱海、衡水湖、白马湖和太湖, 平均体长分别为(123.56±14.45) mm、(120.32±23.46) mm、(117.23±19.51) mm、(115.76±20.71) mm、(95.48±10.24) mm、(92.25±18.51) mm 和(86.03±21.57) mm。其中, 乌梁素海的鳙样本体长范围最广, 为 35.98~

190.5 mm。衡水湖体长范围最窄, 为 49.15~122.59 mm。与体长的分布趋势类似, 鳙样本的平均体重最大出现在松花湖, 为(41.58±24.5) g, 且个体体重分布范围最广, 介于 0.35~93.14 g; 其次是蠡湖、乌梁素海、邳海、洱海、白马湖、太湖和衡水湖, 平均体重依次为(26.39±9.45) g、(24.15±12.92) g、(23.48±13.01) g、(21±12.46) g、(13±11.55) g、(10.42±10.2) g 和(10.27±2.88) g。

2.2 不同湖泊中鳙的生长参数

从体长-体重关系的 b 值来看, 整体范围为 2.54~3.65, 衡水湖、蠡湖表现为负异速生长, 其余均为正异速生长。不同湖泊的渐进体长 L_{∞} 值范围为 140.7~220.5 mm, 松花湖鳙的渐进体长最大, 为 220.5 mm; 衡水湖最小, 为 140.7 mm。从生长系数 K 值来看, 各湖泊的整体范围为 0.31~1.4, 其中白马湖和蠡湖的 K 值最大, 均为 1.4; 乌梁素海最小, 为 0.31。不同湖泊鳙的拐点年龄差距较大, 整体范围为 0.625~3.18, 其中, 乌梁素海的拐点年龄最大, 为 3.18; 蠡湖的拐点年龄最小, 为 0.625。生长性能指数的范围为 4.09~4.72, 各湖泊差距较小(表 1)。

2.3 生长参数与外部环境因素的相关性分析

本文采用皮尔斯相关性分析量化了外部环境因素和鳙的生长参数的关系, 结果如图 4 所示:

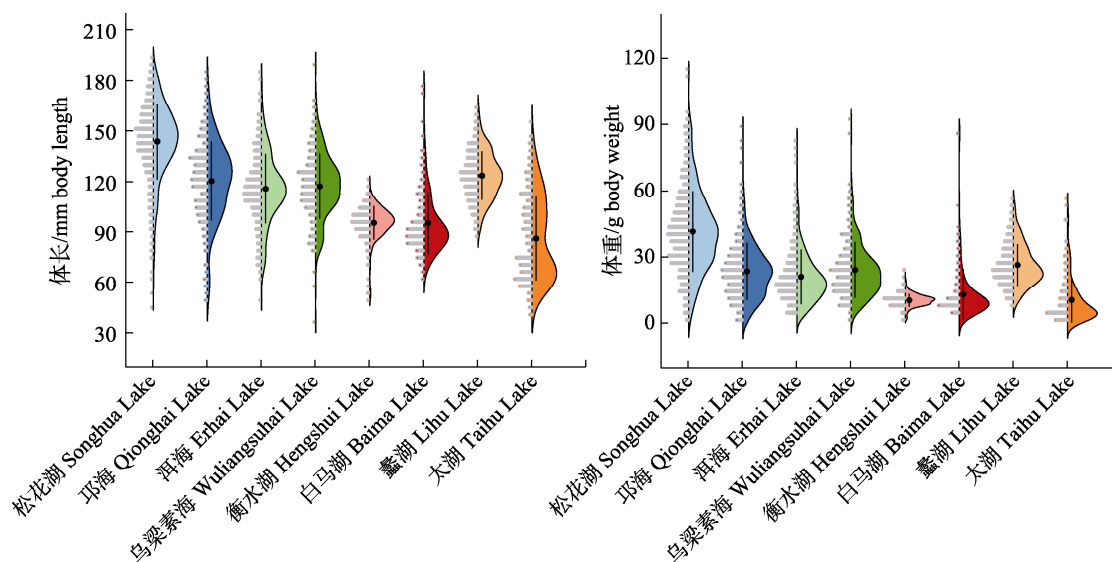


图 3 不同水域鳙的体长和体重频次分布图

各水域样本量为: 松花湖 843 尾、邳海 474 尾、洱海 489 尾、乌梁素海 391 尾、衡水湖 654 尾、白马湖 190 尾、蠡湖 375 尾、太湖 297 尾。

Fig. 3 Length-weight distribution of *Hemiculter leucisculus* from different waters
Sample sizes from Songhua Lake, Qionghai Lake, Erhai Lake, Wuliangsu Lake, Hengshui Lake, Baima Lake, Lihu Lake and Taihu Lake were 843, 474, 489, 391, 654, 190, 375 and 297, respectively.

表 1 不同水域鳊的体长-体重关系和生长参数

湖泊名称 lake name	体长-体重关系	渐近体长/mm	生长系数/yr ⁻¹	拐点年龄/yr	生长性能指数
	length-weight relationship	L_{∞}	K	t_1	ϕ'
邛海 Qionghai Lake	$W=8.2417\times10^{-6}L^{3.09}$ ($R^2=0.9452$)	204.75	0.85	1.14	4.55
衡水湖 Hengshui Lake	$W=9.3729\times10^{-5}L^{2.54}$ ($R^2=0.7824$)	140.7	0.62	1.22	4.09
洱海 Erhai Lake	$W=2.8763\times10^{-6}L^{3.30}$ ($R^2=0.92551$)	199.5	0.39	2.64	4.19
松花湖 Songhua Lake	$W=7.2467\times10^{-6}L^{3.12}$ ($R^2=0.91005$)	220.5	0.46	2.11	4.35
乌梁素海 Wuliangsu Lake	$W=6.6442\times10^{-6}L^{3.2}$ ($R^2=0.9173$)	210	0.31	3.18	4.13
白马湖 Baima Lake	$W=2.4668\times10^{-6}L^{3.36}$ ($R^2=0.9704$)	194.25	1.4	0.75	4.72
蠡湖 Lihu Lake	$W=3.3598\times10^{-5}L^{2.81}$ ($R^2=0.7812$)	189	1.4	0.625	4.69
太湖 Taihu Lake	$W=6.1069\times10^{-7}L^{3.65}$ ($R^2=0.9215$)	171.15	0.7	1.61	4.31

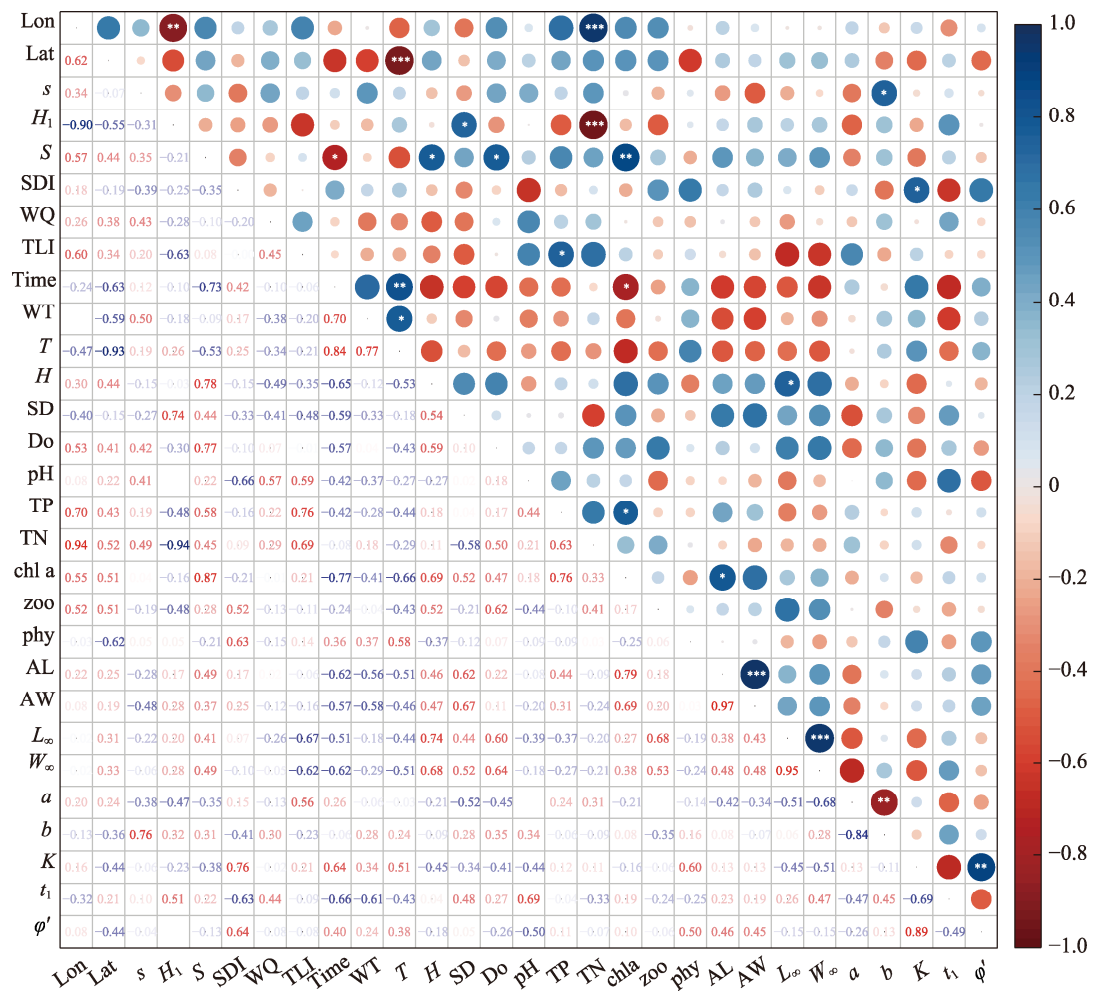


图 4 鳊生长参数与环境因子的相关分析

Lon: 经度; Lat: 纬度; s: 水域面积; H_1 : 海拔; S: 蓄水量; SDI: 岸线发育系数; WQ: 水质; TLI: 综合营养状态指数; Time: 年气温超 20 °C 天数; WT: 平均水温; T: 平均气温; H: 平均水深; SD: 透明度; Do: 溶解氧; TP: 总磷; TN: 总氮; chl-a: 叶绿素; zoo: 浮游动物密度; phy: 浮游植物密度; AL: 平均体长; AW: 平均体重; L_{∞} : 渐近体长; W_{∞} : 渐近体重; a: 条件因子; b: 异速生长因子; K: 生长系数; t_1 : 生长拐点; ϕ' : 生长性能指数. ** $P=0.05$; *** $P=0.01$; **** $P\leq0.001$.

Fig. 4 Correlation analysis of growth parameters of *Hemiculter leuciscus* with environmental factors
Lon: Longitude; Lat: Latitude; s: water Area; H_1 : altitude; S: water storage capacity; SDI: shoreline development index; WQ: water quality; TLI: trophic level index; Time: number of days per year with air temperature >20 °C; WT: mean water temperature; T: mean air temperature; H: mean depth; SD: water transparency; Do: dissolved oxygen; TP: total phosphorus; TN: total nitrogen; chl-a: chlorophyll-a; zoo: zooplankton density; phy: phytoplankton density; AL: average Length; AW: average weight; L_{∞} : asymptotic olength; W_{∞} : asymptotic weight; a: condition factor; b: allometric growth factor; K: growth coefficient; t_1 : inflection point; ϕ' : growth performance index; ** $P=0.05$; *** $P=0.01$; **** $P\leq0.001$.

蟹样本的平均体长、平均体重与叶绿素浓度均呈显著正相关($P<0.05$), 且平均体重与透明度具有显著正相关关系($P<0.05$)。综合营养状态指数、平均深度和浮游动物浓度均显著影响了蟹的渐进体长($P<0.05$), 而 pH 对蟹的拐点年龄具有显著影响($P<0.05$)。此外, 相关性分析结果发现外部环境参数对蟹的渐进体重、 a 、 b 、生长性能指数 φ' 和生长系数 K 的影响不显著($P>0.05$)。

2.4 环境因素与蟹生长参数之间的 RDA 分析

本文使用 RDA 分析各环境参数对蟹生长参数的影响, 去除共线性环境因子(VIF>10)后, 筛选得到对蟹生长参数影响最大的 6 个环境因子, 分别为平均水深、平均水温、透明度、岸线发育系数、纬度和水质。RDA 结果详见表 2、表 3 和图 5。

表 2 蟹的生长参数和环境因子间 RDA 分析的统计信息

Tab. 2 Statistical information on RDA analysis between growth parameters of <i>Hemiculter leucisculus</i> and environmental factors				
指标 indicator	轴 1 axis 1	轴 2 axis 2	轴 3 axis 3	轴 4 axis 4
特征值 eigenvalue	0.7759	0.1403	0.0203	0.0022
解释变异程度(累积)% variation explained (cumulative)	77.59	91.62	93.56	93.88
相关系数 correlation coefficient	0.9644	0.9987	0.9744	0.8403

表 3 排序轴与环境因子的相关关系

Tab. 3 Correlation coefficients between the ordination axes and environmental factors				
指标 indicator	轴 1 axis 1	轴 2 axis 2	贡献率/% contribution rate	P 值 P value
透明度/m transparency (SD)	-0.5831	-0.3871	41.2	0.08
水质 water quality (WQ)	-0.0629	0.1967	21.5	0.176
岸线发育系数 shoreline development index (SDI)	0.0926	-0.3375	15.8	0.204
平均水深/m mean depth (H)	-0.5218	-0.5236	0.8	0.192
平均水温/℃ mean water temperature (WT)	0.2887	0.6464	18.4	0.028
纬度 latitude (Lat)	-0.0828	-0.4699	2.3	0.32

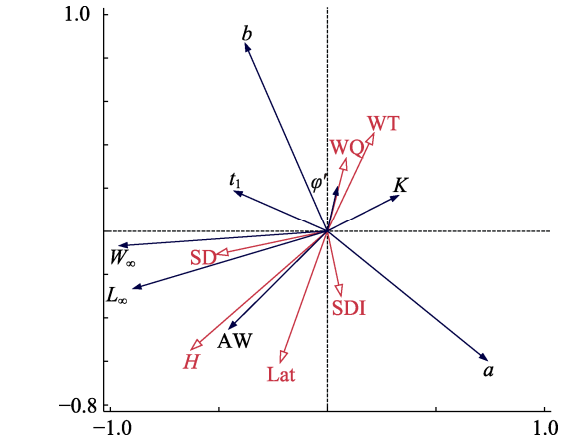


图 5 不同水域蟹的生长参数与环境因素的冗余分析(RDA)

Lat: 纬度; SDI: 岸线发育系数; WQ: 水质; WT: 平均水温; H: 平均水深; SD: 透明度.

Fig. 5 Redundancy Analysis (RDA) of growth parameters of *Hemiculter leucisculus* and environmental factors in different areas

Lat: Latitude; SDI: shoreline development index; WQ: water quality; WT: mean water temperature; H: mean depth; SD: water transparency.

轴 1 和轴 2 解释了蟹群落总方差的 77.59%和 14.03%, 共计 91.62%。生长参数与环境因子关联系数最大达到了 0.9987, 反映排序可较好地表现出鱼类生长参数与环境因子间的关系(表 2)。排序轴 1 与平均温度的正相关性最大, 相关性系数为 0.2287, 与透明度的负相关性最大, 相关性系数为-0.5831; 排序轴 2 与平均水温的正相关性最大, 相关性系数为 0.6464, 与平均水深的负相关性最大, 相关性系数为-0.5236 (表 3)。

RDA 排序结果显示如图 5 所示。蟹的生长参数 K 受平均水温的影响较大, 两者具有明显的正相关关系, 而与平均深度和透明度呈负相关; 生长性能指数和异速生长因子 b 与水质具有明显的正相关关系; 渐进体长、渐进体重、生长拐点 t_1 受透明度影响较大, 而平均体长、平均体重受深度和纬度的影响较大。

2.5 环境因子对蟹生长参数的影响

2.5.1 环境因子对蟹的生长拐点年龄 t_1 的影响

利用 AIC 准则筛选因子, 根据 AIC 最小原则构建得到最优 GAM 模型。结果发现, 当影响因子超过 3 个时, 模型出现过拟合现象。模型表达式为:

$$\log(t_1 + 1) = \beta_0 + s(\text{SDI}) + s(\text{SD}) + s(H) + \varepsilon$$

式中, t_1 为蟹的生长拐点年龄, β_0 为截距, SD 为透明度, SDI 为岸线发育系数, H 为平均水深, ε 是服从正态分布的随机误差项。GAM 模型偏差分析显示, 该模型的累计偏差解释率为 88.83%, 残偏差为 6.57×10^{-5} , AIC 为 -55.01。如表 4 所示, 岸线发育系数和平均水深对蟹的生长拐点年龄均具有显著影响。

生长拐点与岸线发育系数、透明度和平均水深的关系如图 6 所示。蟹的生长拐点与水体透明

度呈单峰关系, 在 0.5~1 m 透明度时达到最佳值。低于 1.5 m 时呈正相关, 高于 1.5 m 后转为负相关。透明度在 0.5~1 m 的区间内为蟹的最佳生长拐点。岸线发育系数介于 0.1~0.35 内, 蟹的生长拐点随着其增大而减小; 高于 0.35 时, 拐点年龄则随其增大而增大; 该系数在 0.3~0.4 区间内为蟹的最佳生长拐点。拐点年龄与湖泊深度成负相关关系, 表现为随着平均水深的增加, 拐点年龄呈现一种平缓的下降趋势。

表 4 生长拐点与岸线发育系数、透明度和平均水深的 GAM 模型拟合检验表

Tab. 4 GAM model fit test for the relationship between growth inflection point and shoreline development coefficient, transparency, and mean depth

环境因子 environmental factor	剩余偏差 residual deviance	AIC	累计偏差解释率/% cumulative deviance explained	P
岸线发育系数 shoreline development index (SDI)	1.321	14.48	42.69	0.0105
透明度/m transparency (SD)	0.087	-1.6	76.62	0.087
平均水深/m mean depth (H)	6.57×10^{-5}	-55.01	88.83	0.027

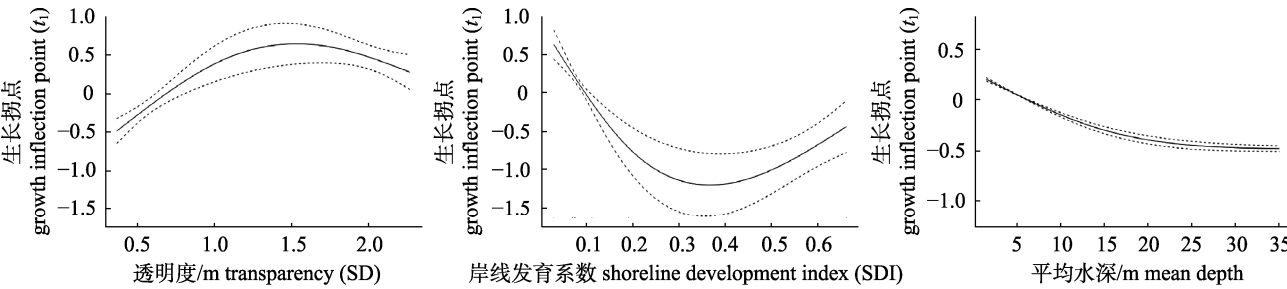


图 6 生长拐点与岸线发育系数、透明度和平均水深的关系

Fig. 6 Relationships between growth inflection point and shoreline development coefficient, transparency, and average water depth

2.5.2 环境因子对蟹的生长系数 K 的影响 利用 AIC 准则筛选环境因子, 根据 AIC 最小原则构建得到最优 GAM 模型, 当影响因子超过 2 个时出现过拟合现象。模型表达式为:

$$\ln(K+1) = \beta_0 + s(\text{SDI}) + s(\text{SD}) + \varepsilon$$

式中 K 为蟹的生长系数, β_0 为截距, SD 为透明度, SDI 为岸线发育系数, ε 是服从正态分布的随机误差项。GAM 模型的累计偏差解释率为 36.63, 残偏差为 0.18, AIC 为 4.088。岸线发育系数和透明度对蟹的生长拐点具有显著影响。

表 5 生长系数与岸线发育系数、透明度的 GAM 模型拟合检验表

Tab. 5 GAM model fit test for the relationship between growth coefficient and shoreline development coefficient, transparency

环境因子 environmental factor	残偏差 residual deviance	AIC	累计偏差解释率/% cumulative deviance explained	P
岸线发育系数 shoreline development index (SDI)	1.38	14.65	32.72	0.056
透明度 transparency (SD)	0.18	4.088	46.63	0.0539

图 7 展示了岸线发育系数 SDI 和透明度 SD 对蟹的生长系数 K 的影响。蟹的生长系数的随

岸线发育系数增加呈先增加后减小趋势。岸线发育系数为 0.35 时, 蟹的生长系数达到最大值。

类似地, 鰻的生长系数随着水体透明度呈先上升后下降趋势, 表现为水体透明度在 0.5~1.5 m 范围内时, 鰻的生长系数随透明度增加呈下降趋势, 水深超过 1.5 m 后生长系数值缓慢上升, 透明度在 0.5~1 m 的区间时鰻表现出最快的生长速度。

2.5.3 环境因子对鰻的渐进体长的影响 同样基于 AIC 准则筛选环境因子并构建 GAM 模型, 表达式为:

$$\log(L_{\infty} + 1) = \beta_0 + s(WT) + s(H) + \varepsilon$$

式中 L_{∞} 为鰻的渐进体长, β_0 为截距, WT 为平均水温, H 为平均深度, 该 GAM 模型的累计偏差解释

率为 69.52, 残偏差为 0.024, AIC 为 -11.4。如表 6 所示, 平均水温、平均水深对鰻的渐进体长影响显著。

平均水温 WT、平均水深 H 对鰻的渐进体长 L_{∞} 的影响如图 8 所示。鰻的渐进体长 L_{∞} 的随 WT 增加呈先增加再减小趋势, 平均水温在 12~18 ℃ 的范围内, 渐进体长随温度的升高不断增加, 温度超过 18 ℃ 后渐进体长降低, 但降低的幅度较小。鰻的渐进体长在 18~20 ℃ 时达到最大值。平均水深在 5~15 m, 渐进体长缓慢下降, 该数值在水深超过 15 m 后逐渐增大, 但增幅较小。

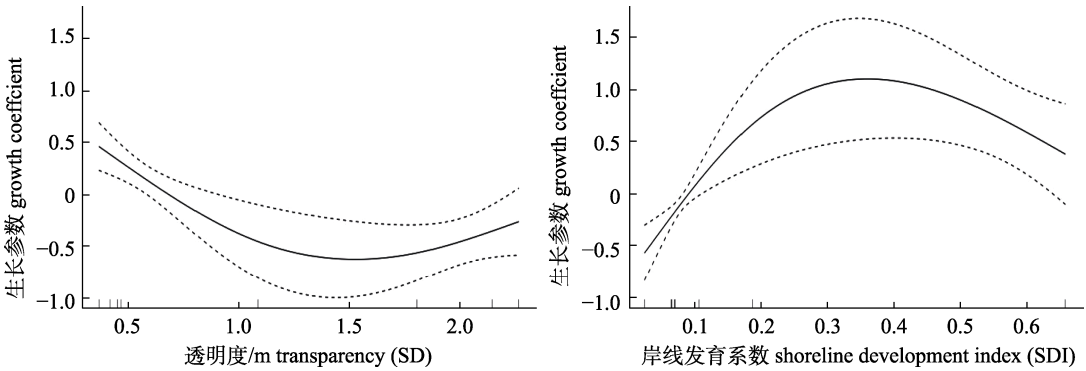


图 7 生长系数与岸线发育系数和透明度的关系
Fig. 7 The Relationship between Growth Coefficient, Shoreline Development Coefficient and Transparency

表 6 渐进体长与平均水温和平均水深的 GAM 模型拟合检验表
Tab. 6 GAM model fit test for asymptotic length and average water temperature and depth

环境因子 environmental factor	剩余偏差 residual deviance	AIC	累计偏差解释率/% cumulative deviance explained	P
平均水深/m mean depth (H)	0.099	-6.45	48.36	0.023
平均水温/℃ mean water temperature (WT)	0.024	-11.4	69.52	0.017

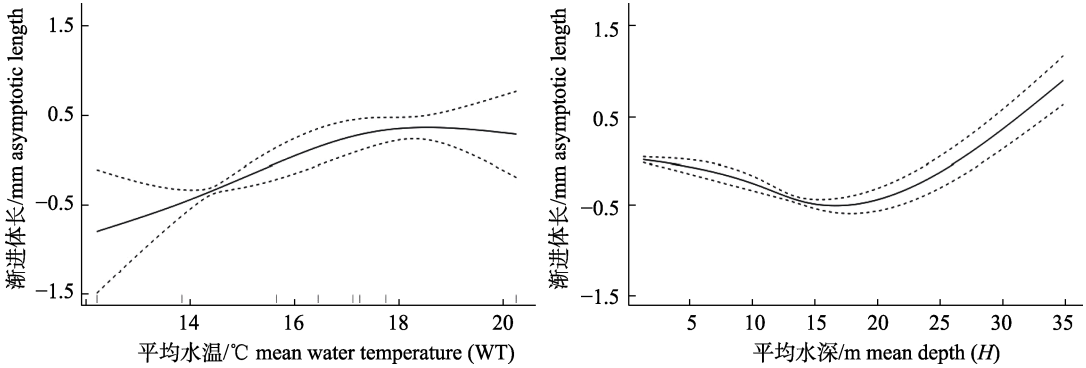


图 8 渐进体长与平均水温和平均水深的关系
Fig. 8 Relationship between asymptotic length and average water temperature and depth

3 讨论

3.1 水文参数对鳊生长参数的影响

岸线发育系数(SDI)表征湖岸形态复杂性, 高 SDI 数值通常指示丰富的生态界面(如岬湾、湿地)和高效的物质交换效率^[22]。根据 GAM 模型结果, 鳊的生长系数 K 和拐点年龄 t_1 在 SDI 在 0.4~0.5 的范围最佳。鳊作为一种典型的湖泊鱼类, 常栖息于湖泊、河流的岸线的中上层^[23], 自然曲折岸线可提升周丛生物量及仔稚鱼庇护效率^[24], 并且为其提供丰富的栖息地和食物来源。这是提升鳊的生长系数、降低拐点年龄的主要因素。然而过高的 SDI 会降低鳊的生长参数, 何万朝等^[25]研究表明, 洱海生态廊道建设 S 型湖湾, 使其多样性指数下降, 小型鱼类密度下降明显。Marchetti^[26]对北美 20 个湖泊的研究显示, 人工岸线区域的鱼类物种丰富度比自然岸线低 35%, 幼鱼栖息地显著减少。此外, 岸线的开发减少了水生植物和其他水生生物的数量^[27], 而这些生物是鳊食物链的一部分, 同时水生植物的减少使得鳊的遮蔽物减少, 不利于鳊的生存。结合前人研究可以发现, 高岸线系数区域可能提供更多的食物源头、遮蔽和保护区域, 有利于鳊的快速生长, 但也可能因为人类活动增加而带来污染和干扰, 对生长拐点产生负面影响。因此可将湖泊 SDI 控制在 0.4~0.5 的理想区间, 通过生态工程构建“锯齿状”自然岸线, 保留原生植物带作为生态缓冲区, 提升保护鱼类的存活率。

3.2 理化因子对鳊生长参数的影响

水体平均温度(WT)对鱼类的代谢速率有直接作用, 在适温范围内, 温度升高会加快鳊的新陈代谢, 提高其生长速度^[28]。根据温度大小规则, 通常预测水生生态系统的变暖会增加个体生长速率, 但会减小变温动物的渐近体型^[29], 因此在一定的范围内鳊的渐进体长会随 WT 的升高而增大, 随着水温持续升高导致能量更多地用于维持代谢活动, 会出现渐进体长减小的趋势。这与 GAM 模型的结果相似, 并且能得到渐进体长在 18~20 °C 时达到最大值。

研究表明, 水体透明度的变化直接影响水体

中浮游生物的分布、丰度和可见度^[30], 并通过食物链效应提升鳊饵料生物量。然而, 高透明度(SD)环境虽促进沉水植被(如苦草群落)扩张, 为鳊提供丰富的栖护场所与有机碎屑资源, 但同时也增加其暴露于捕食者的风险^[31]。这种“资源-风险”权衡导致鳊生长拐点(t_1)随 SD 升高呈非线性响应: 当 SD 低于 1.8 m 时, t_1 与 SD 正相关; 超过此阈值后, t_1 显著下降, 表明高 SD 生境促使鳊提前进入快速生长期以规避捕食压力。

不同水深通过影响水体热力学结构如温跃层深度、混合强度等, 调控鱼类能量分配策略^[32], 在较浅的水域中, 鱼类面临较大的种群密度和较强的同类竞争压力。鱼类在竞争激烈的环境中可能会因为资源的有限性(如食物和栖息空间)而导致个体生长受限^[33], 从而使得鱼类的渐进体长相对较小, 同时鳊维持代谢成本占比上升, 使得能量分配模式延迟其性腺发育到达表现为 t_1 较高。研究表明, 深水区常伴随溶解氧垂直梯度和底栖饵料匮乏, 迫使鳊增加活动范围以获取资源, 表现为 t_1 年龄随水深增加呈缓增趋势^[34](每增加 1 m, t_1 延迟 0.15 年)。本实验结果却与其相反, 同时有学者观测到较深的水域通常提供了更多的隐蔽场所, 能有效减少捕食者的压力, 从而为鱼类提供更好的生长环境^[35], 提高渐进体长。其原因为水深的变化还可能与季节性环境变化、人类活动等因素相关联。季节变化对水深的影响可能导致水温和水质的变化, 进而影响鱼类的生长模式。人类活动, 如水利工程建设、农业排水等, 也可能导致水深的改变, 进而影响鱼类栖息地的质量^[36]。因此, 水深与鱼类生长之间的关系是多因素综合作用的结果, 并非单纯的正相关或负相关。

3.3 地理环境因素对鱼类生长的影响

已有大量研究发现, 理化因子(盐度、水温、溶解氧)及水文形态等环境参数对鱼类的生长具有显著影响: 盐度变化迫使鱼类分配能量于渗透调节, 导致生长速率下降^[37]; 复杂栖息地提供避难所和觅食场所, 优化生长-生存权衡^[38]; 鱼类生长速率与水温呈非线性关系, 存在物种特异性最适温度区间^[39]; 地理性低氧水域(如热带湖泊)塑造鱼类的耐低氧表型, 影响生长策略^[40]; 地理环

境的结构复杂性通过捕食压力和食物可得性影响鱼类生长^[40]。然而, 这些研究多聚焦于单一变量的独立效应, 本实验采用广义加性模型(GAM)系统分析了鱼类生长参数与多维环境因子的非线性关系, 量化了这些因素对其生长的影响, 探究到自然环境因子间存在复杂的协同或拮抗作用。此外, 环境因子的时空动态(如潮汐、季节变化)如何调节鱼类生长表型可塑性, 仍需通过多尺度实验与野外验证相结合的方法进一步探索。未来研究应整合控制实验、梯度观测与能量模型, 以揭示多环境压力下鱼类生长的适应性机制。

4 结论

本研究揭示了外部环境因素对鳙生长的显著影响, 进一步加深了对其生态适应机制的理解。研究表明, 鳙在我国 8 个具有明显地理差异的代表性湖泊中的生长参数表现出显著差异, 且多个环境因子与生长参数之间存在显著的正相关关系, 证明外部环境因素在鳙生长中起到了关键作用。其中, 水体深度、透明度及湖泊的纬度是影响鳙生长的主要环境因子。鳙的生长系数 K 和生长拐点年龄 t_1 主要受岸线发育系数和透明度的影响, 在岸线发育系数为 0.3~0.4 及透明度为 0.5~1 m 的环境中, 鳙的生长系数和最佳生长拐点年龄最为理想。同时, 水体深度也对鳙的生长拐点产生显著影响, 表现为随着水深的增加, 生长拐点年龄逐渐降低。温度和水深是影响鳙渐进体长的关键环境因子。随着平均水温的升高, 渐进体长呈现先增大后减小的趋势, 且在 18~20 °C 时达到最大值; 相反, 水深对渐进体长的影响则呈现相反趋势, 随着水深的增加, 渐进体长先减小后增大, 在水深为 15 m 时达到最小值。综上所述, 本研究为了解鳙生长与环境因子之间的复杂关系提供了科学依据, 对于其生态管理与资源保护具有重要意义。

参考文献:

- [1] King M. Fisheries Biology, Assessment and Management [M]. 2nd ed. Oxford: Blackwell Publishing Ltd, 2007.
- [2] Smart J J, Chin A, Tobin A J, et al. Multimodel approaches in shark and ray growth studies: Strengths, weaknesses and the future[J]. Fish and Fisheries, 2016, 17(4): 955-971.
- [3] Barneche D R, Robertson D R, White C R, et al. Fish reproductive-energy output increases disproportionately with body size[J]. Science, 2018, 360(6389): 642-645.
- [4] Flinn S A, Midway S R. Trends in growth modeling in fisheries science[J]. Fishes, 2021, 6(1): 1.
- [5] Guan S C. Influence of environmental factors on fish growth rate[J]. Technical Advisor for Animal Husbandry, 2013(10): 229. [管士成. 环境因素对鱼类生长速度的影响[J]. 养殖技术顾问, 2013(10): 229.]
- [6] Teichert N, Lizé A, Lepage M, et al. Hydro-morphological features and functional structure of fish assemblages mediate species isotopic niches in estuaries[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2024, 299: 108686.
- [7] Murase H, Nagashima H, Yonezaki S, et al. Application of a generalized additive model (GAM) to reveal relationships between environmental factors and distributions of pelagic fish and krill: A case study in Sendai Bay, Japan[J]. ICES Journal of Marine Science, 2009, 66(6): 1417-1424.
- [8] Wu Q J, Yi B L. Preliminary ecological investigation on Hemiculter spp. and Hemiculte species in the Heilongjiang River Basin[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 1959, 2: 157-169. [吴清江, 易伯鲁. 鳙条属鱼类和黑龙江流域鳙条属鱼类的初步生态调查[J]. 水生生物学集刊, 1959, 2: 157-169.]
- [9] Li S G, Yu Y L, Gao Q Q, et al. Analysis of nutritive composition in muscles of *Hemiculter bleekeri* warpachowskyi [J]. Freshwater Fisheries, 2008, 38(1): 23-26. [李树国, 于永利, 高庆全, 等. 内蒙古达赉湖蒙古油 肌肉营养成分分析[J]. 淡水渔业, 2008, 38(1): 23-26.]
- [10] Deng F Y. Study on the fish community characteristics of Dongjiang source and the comparative biology of *Hemiculter leucisculus* from different area[D]. Guangxi Normal University, 2013. [邓凤云. 东江源头区鱼类群落特征及鳙 *Hemiculter leucisculus* 不同地理区域的比较生物学研究 [D]. 广西师范大学, 2013.]
- [11] Wang T. Age, growth and reproductive biology of invasive fish *Hemiculter leucisculus* (basilewski, 1855) in Erhai Lake[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2012. [王腾. 洱海外来种鳙的年龄、生长和繁殖生物学[D]. 武汉: 华中农业大学, 2012.]
- [12] Ren C P, Zheng B H. Trend recognition and driving factors of water quality change in plateau lakes: A case study of Lake Qionghai, Sichuan Province[J]. Journal of Lake Sciences, 2024, 36(3): 756-769. [任春坪, 郑丙辉. 高原湖泊水质变化趋势及驱动因素研究: 以四川邛海为例[J]. 湖泊科学, 2024, 36(3): 756-769.]
- [13] Sheng P, Yang M, Chen W K, et al. Characteristics of

- phytoplankton community structure and its environmental influencing factors in Taihu Lake during the early stage of fishing ban[J]. Chinese Journal of Ecology, 2025, 44(4): 1191-1201. [盛漂, 阳敏, 陈文凯, 等. 禁捕初期太湖浮游植物的群落结构特征及其环境影响因子[J]. 生态学杂志, 2025, 44(4): 1191-1201.]
- [14] Liang B N. Correlation analysis of plankton and environmental factors in Hengshui Lake from 2019 to 2020[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2021. [梁倍宁. 2019-2020 年衡水湖浮游生物与环境因子的相关性分析[D]. 保定: 河北农业大学, 2021.]
- [15] Gao W Y. Investigation and health assessment of hydrobiont biodiversity in Wuliangsu Lake[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2020. [高闻一. 乌梁素海水生生物多样性调查分析及健康评估[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2020.]
- [16] Lu X X. Comparative study on the community structure of metazooplankton in the Qinhuai River and the Baoma Lake. Nanjing: Nanjing Normal University, 2019. [卢绪鑫. 秦淮河与白马湖后生浮游动物群落结构的比较研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2019.]
- [17] Dai P, Yan M J, Zhou Y, et al. Ecological characteristics of phytoplankton community structure in the littoral zone of Lake Wuli, Lake Taihu in 2014-2015[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018, 27(10): 2348-2357. [代培, 阎明军, 周游, 等. 太湖五里湖沿岸带浮游植物群落生态特征(2014—2015 年)[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(10): 2348-2357.]
- [18] Zou J Y, Liu H. Water quality and community structure of zooplankton in Songhua lake[J]. Journal of Engineering of Heilongjiang University, 2014, 5(1): 51-54. [邹继颖, 刘辉. 松花湖水水质及浮游动物群落结构的研究[J]. 黑龙江大学学报, 2014, 5(1): 51-54.]
- [19] Li Q. Phytoplankton diversity in typical lakes and reservoirs in northeast region[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2013. [李强. 东北典型湖库浮游植物多样性研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2013.]
- [20] Wei G E, Chen X J. Impacts of spatial resolution under different environment modes on CPUE standardization in the North Pacific Ocean[J]. Marine Sciences, 2021, 45(4): 147-158. [魏广恩, 陈新军. 不同环境模态下空间分辨率对北太平洋柔鱼 CPUE 标准化的影响[J]. 海洋科学, 2021, 45(4): 147-158.]
- [21] Zhao J, Liu X X, Wu J H, et al. Application of zero-inflated model in predicting the distribution of rare fish species: A case study of *Coilia nasus* in Yangtze estuary, China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(9): 3155-3163. [赵静, 柳晓雪, 吴建辉, 等. 零膨胀模型在珍稀鱼类资源时空分布预测中的应用——以长江口刀鲚为例[J]. 生态学杂志, 2020, 39(9): 3155-3163.]
- [22] Li X G, Jiang N, Wang H J, et al. Dynamic changes of lake shorelines morphology in the Taihu Basin during the past 30 years[J]. Journal of Lake Science, 2005, 17(4): 294-298. [李新国, 江南, 王红娟, 等. 近 30 年来太湖流域湖泊岸线形态动态变化[J]. 湖泊科学, 2005, 17(4): 294-298.]
- [23] Luo L K, Tan K, Wu J N, et al. Characteristics of plant and juvenile fish communities along different shorelines and their relationship with the distribution of finless porpoises: A case study of the Anqing section of the Yangtze River[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2025, 49(5): 30-42. [罗来开, 谈凯, 伍佳楠, 等. 不同岸线植物和仔稚鱼群落特征及其与江豚分布的关系: 以长江安庆段为例[J]. 水生生物学报, 2025, 49(5): 30-42.]
- [24] Liao W X, Chen Y Y, Zhao X, et al. Analysis of lake and lake shoreline evolution in Hubei Province in recent 30 years based on Google Earth Engine[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2021, 60(10): 46-54, 59. [廖文秀, 陈奕云, 赵曦, 等. 基于 GEE 的湖北省近 30 年湖泊及其岸线演变分析[J]. 湖北农业科学, 2021, 60(10): 46-54, 59.]
- [25] He W C, Yin C J, Yuan J, et al. Ecological corridor construction on the distribution and diversity of fish communities in different types of bays in Erhai lake[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2023, 47(12): 1965-1975. [何万朝, 尹成杰, 袁静, 等. 生态廊道建设对洱海不同类型湖湾鱼类群落分布及多样性的影响[J]. 水生生物学报, 2023, 47(12): 1965-1975.]
- [26] Marchetti M P, Lockwood J L, Light T. Effects of urbanization on California's fish diversity: Differentiation, homogenization and the influence of spatial scale[J]. Biological Conservation, 2006, 127(3): 310-318.
- [27] Gittman R K, Peterson C H, Currin C A, et al. Living shorelines can enhance the nursery role of threatened estuarine habitats[J]. Ecological Applications, 2016, 26(1): 249-263.
- [28] Gu C, Jiang M T, Jiang Z G. Impacts of habitat filtering on taxonomic and functional composition of fish communities in Lake Caizi, lower reaches of the Yangtze River[J]. Journal of Lake Sciences, 2020, 32(1): 124-133. [古辰, 姜美彤, 蒋忠冠. 生境过滤作用对长江下游菜子湖鱼类物种和功能组成的影响[J]. 湖泊科学, 2020, 32(1): 124-133.]
- [29] Pang X. Research on the fish eco-physiological (thermal tolerance, metabolism and swimming) response based on temperature changes[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014. [庞旭. 基于温度变化的鱼类生理生态(热耐受、代谢

- 及游泳)响应研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.]
- [30] Wang J Q, Song Y Z, Huang J. Effects of increasing water temperature on water properties and aquatic organisms: A critical review[J]. *Journal of Hydroecology*, 2020, 41(1): 100-109. [王锦旗, 宋玉芝, 黄进. 水温升高对水体性质及水生生物的影响研究进展[J]. *水生态学杂志*, 2020, 41(1): 100-109.]
- [31] Gong X L, Zhang X Y, Cui Z K, et al. Seasonal changes of chlorophyll a and primary productivity in Jiuduansha Wetland[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2015, 24(4): 544-549. [龚小玲, 张晓懿, 崔忠凯, 等. 九段沙湿地叶绿素 a 和初级生产力的季节变化[J]. *上海海洋大学学报*, 2015, 24(4): 544-549.]
- [32] Dong Y Z, Zhao J F, Xiao K Y, et al. Spatial-temporal variations in phytoplankton communities and their relationship with environmental factors in the Qionghai Lake, China[J]. *Wetland Science*, 2024, 22(5): 757-768. [董艳珍, 赵金凤, 肖克彦, 等. 邛海浮游植物群落时空变化特征及其与环境因子的关系[J]. *湿地科学*, 2024, 22(5): 757-768.]
- [33] Magnuson J J, Crowder L B, Medvick P A. Temperature as an ecological resource[J]. *American Zoologist*, 1979, 19(1): 331-343.
- [34] Xie C X. *Ichthyology*[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2010. [谢从新. *鱼类学*[M]. 北京: 中国农业出版社, 2010.]
- [35] Bao H X. Research on the impact of water conservancy project construction in the lower reaches of the yellow river on the habitat of the yellow river carp[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2023. [包合鑫. 黄河下游水利工程建设对黄河鲤栖息地的影响研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2023.]
- [36] Bœuf G, Payan P. How should salinity influence fish growth [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology*, 2001, 130(4): 411-423.
- [37] Savino J F, Stein R A. Predator-prey interaction between largemouth bass and bluegills as influenced by simulated, submersed vegetation[J]. *Transactions of the American Fisheries Society*, 1982, 111(3): 255-266.
- [38] Clarke A, Johnston N M. Scaling of metabolic rate with body mass and temperature in teleost fish[J]. *Journal of Animal Ecology*, 1999, 68(5): 893-905.
- [39] Pörtner H O, Knust R. Climate change affects marine fishes through the oxygen limitation of thermal tolerance[J]. *Science*, 2007, 315(5808): 95-97.
- [40] Limburg K E, Waldman J R. Dramatic declines in north Atlantic diadromous fishes[J]. *BioScience*, 2009, 59(11): 955-965.

Impacts of geographical environmental factors on the growth of *Hemiculter leucisculus*

FANG Yuhang^{1,2}, CHEN Yongjin², HE Bin³, XUE Xue², YANG Yunlei^{1,2}, XU Dongpo^{1,2*}

1. College of Fisheries and Life Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. Freshwater Fisheries Research Center, Chinese Academy of Fishery Sciences; Key Laboratory of Freshwater Fisheries and Germplasm Resources Utilization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuxi 214081, China;

3. Fisheries Research Institute, Sichuan Academy of Agricultural Sciences, Chengdu 611730, China

Abstract: To systematically investigate how geographical environmental factors regulate the growth of topmouth culter (*Hemiculter leucisculus*) and its ecological adaptation strategies, this study collected related ecological survey data from eight representative lakes (i.e., Wuliangsuhai Lake, Songhua Lake, Hengshui Lake, Taihu Lake, Lihu Lake, Baima Lake, Qionghai Lake, and Erhai Lake) during 2022 to 2024. Multi-dimensional environmental variables, including latitudinal gradients, lake basin morphological indices, and water physicochemical parameters, were considered as potential environmental factors affecting the growth of *H. leucisculus*. Statistical approaches, including Pearson correlation analysis, redundancy analysis (RDA), and generalized additive models (GAM), were employed to evaluate the impacts of environmental heterogeneity on key growth parameters of *H. leucisculus*. The results revealed that the growth coefficient (K) and inflection point age (t_1) of *H. leucisculus* were primarily influenced by shoreline development index (SDI) and transparency (SD). Optimal conditions for maximizing K

and minimizing t_1 occurred when SDI ranged from 0.3 to 0.4 and SD from 0.5 to 1 m, indicating that moderately complex shorelines and moderate water clarity create favorable microhabitats for resource acquisition and growth efficiency of *H. leucisculus*. Additionally, water depth (H) exhibited a significantly negative correlation with t_1 , suggesting deeper lakes tend to delay the inflection point of growth, possibly due to reduced vertical habitat complexity or thermocline-induced metabolic constraints. Water temperature (WT) and H appeared as critical determinants for asymptotic body length (L_∞). L_∞ reached its peak at 18–20 °C, aligning with the thermal optimum for metabolic efficiency and energy allocation to somatic growth, while the minimum L_∞ occurred at a depth of 15 m, likely reflecting trade-offs between depth-dependent resource accessibility and energy expenditure. RDA revealed strong correlations between SDI and zooplankton biomass, SD and zooplankton biomass, WT and phytoplankton productivity, and H and phytoplankton productivity, further indicated that such environmental effects are possibly mediated through trophic pathways, forming a cascading effect on prey availability that shapes growth trajectories. By constructing a predictive model integrating lake morphology and hydrological parameters, this study demonstrated that geographical factors indirectly impact fish life history strategies by altering prey distribution and habitat quality. The findings provide a quantitative framework for adaptive management of fish resources at the basin scale, enabling the identification of critical environmental thresholds to support optimal growth. This research bridges ecological theory and applied fisheries management, offering scientific guidance for balancing sustainable resource utilization with aquatic ecosystem conservation, especially under ongoing climate change and anthropogenic pressures. The integrative methodology also serves as a transferable framework for studying species-environment interactions in lentic ecosystems, emphasizing the value of multi-dimensional datasets in unraveling complex adaptive mechanisms.

Key words: *Hemiculter leucisculus*; generalized additive model; redundancy analysis; growth coefficient; inflection point age; hydrological factors; environmental parameters

Corresponding author: XU Dongpo. E-mail: xudp@ffrc.cn