

王慧, 吴卫菊, 刘国义, 等. 鱼类对苦草生长和水质影响的温度差异研究[J]. 环境科学与技术, 2025, 48(8): 62-70. Wang Hui, Wu Weiju, Liu Guoyi, et al. Temperature differences on the effects of fish on *Vallisneria natans* growth and water quality[J]. Environmental Science & Technology, 2025, 48(8): 62-70.

鱼类对苦草生长和水质影响的温度差异研究

王慧^{1,5}, 吴卫菊^{2,3}, 刘国义⁴, 刘睿诚⁴,
陈晓飞^{2,3}, 宋学峰⁴, 吴辰熙^{1*}

(1. 中国科学院水生生物研究所, 湖北 武汉 430072;

2. 湖北省生态环境科学研究院(省生态环境工程评估中心), 湖北 武汉 430072;

3. 污染损害评估与环境健康风险防控湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430072;

4. 大庆油田水务环保公司, 黑龙江 大庆 163000;

5. 中国地质大学(武汉)环境学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 鱼类对沉水植物生长有着不可忽视的影响。该文选取了武昌鱼、鲫、乌鳢和鳊作为不同食性鱼类的代表, 通过野外实验研究了其对典型沉水植物苦草和水质的影响及其温度差异。结果显示, 温度较低时, 除武昌鱼组苦草总生物量显著降低外, 其他鱼类对苦草生长无显著影响; 鲫组水体氮、磷营养盐和叶绿素 *a* (Chl *a*) 含量均显著升高。温度较高时, 相比对照组武昌鱼显著抑制了苦草的生长, 鲫的影响次之, 乌鳢和鳊的影响相对较小; 鱼类的存在均一定程度上提高了水体营养盐和 Chl *a* 浓度, 其中鲫对水质的影响最为显著, 乌鳢影响最小。鱼类对沉水植物的影响与其生活习性和温度条件有关, 草食性和底层杂食性鱼类对沉水植物生长和水质的影响较大, 在沉水植物恢复时需重点控制。

关键词: 鱼类; 食性; 苦草; 水质; 温度

中图分类号: X524 文献标志码: A doi: 10.19672/j.cnki.1003-6504.2268.24.338 文章编号: 1003-6504(2025)08-0062-09

Temperature Differences on the Effects of Fish on *Vallisneria natans* Growth and Water Quality

WANG Hui^{1,5}, WU Weiju^{2,3}, LIU Guoyi⁴, LIU Ruicheng⁴,
CHEN Xiaofei^{2,3}, SONG Xuefeng⁴, WU Chenxi^{1*}

(1. Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China;

2. Hubei Provincial Academy of Eco-environmental Sciences (Provincial Ecological Environment Engineering Assessment Center),
Wuhan 430072, China;

3. Hubei Key Laboratory of Pollution Damage Assessment and Environmental Health Risk Prevention and Control, Wuhan 430072, China;

4. Daqing Oilfield Water and Environmental Protection Company, Daqing 163000, China;

5. School of Environmental Studies, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China)

Abstract: Fish has an undeniable impact on the growth of submerged macrophytes. This work selected *Megalobrama amblycephala*, *Carassius auratus*, *Channa argus*, and *Aristichthys nobilis* as representatives of fish species with different feeding habits, and studied their effects on typical submerged plants *Vallisneria natans* and water quality and their seasonal differences through field experiments. The results showed that at lower temperatures, except for *Megalobrama amblycephala*, other fishes had no significant effect on the growth of *Vallisneria natans*. The nitrogen, phosphorus, and chlorophyll *a* (Chl *a*) content in the water of the crucian carp group increased significantly. At higher temperatures, compared with the control group, *Megalobrama amblycephala* significantly inhibited the growth of *Vallisneria natans*, followed by *Carassius auratus*, and the effects of *Channa argus* and *Aristichthys nobilis* were relatively small. The presence of fish has increased the concentration of nutrients and Chl *a* in the water to some extent, with *Carassius auratus* having the most significant impact on water quality and *Channa argus* having the least impact. Research has shown that the impact of fish on submerged plants is related to their feeding habits

《环境科学与技术》编辑部: (网址) <http://jks.chinajournal.net.cn> (电话) 027-87643502 (电子信箱) hjkxyjs@vip.126.com

收稿日期: 2024-12-24; 修回 2025-03-17

基金项目: 湖北省生态环境保护科研项目(2024HB01); 中国工程院院地合作项目(HB2023B05)

作者简介: 王慧(2000-), 女, 硕士研究生, 研究方向为水污染防治, (电子信箱) wanghui01@ihb.ac.cn; *通讯作者, 男, 研究员, 博士, 研究方向为环境地球化学和污染物生态学, (电子信箱) chenxi.wu@ihb.ac.cn。

and temperature conditions. Herbivorous and bottom omnivorous fish have a significant impact on the growth of submerged plants and water quality, and should be carefully controlled during the recovery of submerged macrophyte.

Key words: fish; feeding habits; *Vallisneria natans*; water quality; temperature

沉水植物作为水生态系统中重要组成部分和主要生产者,具有净化水体、抑制藻类生长和沉积物再悬浮等生态功能^[1-3],其在控制水体富营养化、维持水生态系统健康等方面发挥着重要的作用^[4-6]。影响沉水植物生长的因素可分为非生物因素和生物因素。其中,非生物因素主要包括温度、光照、营养盐、基质、水深、水动力等;生物因素主要包括浮游植物、附着藻类以及鱼类和其他草食性动物等^[7-9]。

鱼类作为湖泊生态系统中重要的组成部分,深刻影响着水体中沉水植物的生长^[10]。沉水植物的生长不仅受到鱼类牧食的直接影响,同时也受到由鱼类扰动造成的透明度下降、营养盐含量变化等因素的间接影响^[11]。鱼类对底泥的扰动会干扰沉水植物的固着和生根,并且底泥扰动释放的营养盐也会影响沉水植物的生长^[12]。目前关于草食性及杂食性鱼类对沉水植物生长的影响研究已有较多报道^[13-16],而其他食性鱼类对沉水植物生长的研究尚不多见。

研究表明,温度升高可能导致清水系统中沉水植物的分布变化和生物量增加^[17],也可能加剧富营养化,导致富营养化湖泊中沉水植物的消失^[18]。水环境中鱼类的摄食和代谢活动也会受到季节性温度变化的影响^[19-21]。基于上述分析,本研究分别在温度较低和温度较高条件下开展了野外实验,研究了代表性的草食性、杂食性、滤食性以及肉食性鱼类对典型沉水植物苦草的影响,旨在揭示不同温度条件下不同食性鱼类对沉水植物苦草生长的影响及系统内水质的变化情况,以期为湖泊管理提供参考。

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验在湖北省鄂州市梁子湖区沼山镇实验基地(114.6499°E,30.1391°N)进行。苦草采自梁子湖周边水草培育池塘,并用纯水清洗植株备用。分别选择武昌鱼(*Megalobrama amblycephala*)、鲫(*Carassius auratus*)、鳊(*Aristichthys nobilis*)和乌鳢(*Channa argus*)作为草食性、杂食性、滤食性和肉食性鱼类的代表。实验用鱼购自鄂州市梁子湖区水产养殖基地,选取平均体长8 cm左右健壮个体,分别在150 L的桶内暂养14 d,以适应实验环境。实验用水和沉积物均采自梁子湖周边池塘,用抽水泵抽取中下层水体,经浮游生物网(200目)过滤后作为实验用水。

1.2 实验设计

低温条件实验于2023年11月在200 L白色聚乙烯塑料桶中进行,塑料桶上、下直径及深度分别为74、59和72 cm。沉积物去除杂物后均匀铺于15个实验桶底部,厚度约10 cm。桶内加水至70 cm深度澄清后,在各实验桶均匀种植11株质量和长度基本相同的苦草(表1),待水桶中苦草稳定生长1周后放入指定食性鱼类。实验分为对照组、武昌鱼组、鲫组、乌鳢组和鳊组共5组(表2),每组设置3个重复,共15个实验桶。在每个实验桶上覆盖40目纱网,以防止鱼类跃出,实验期间在乌鳢组投加少量红虫,以满足乌鳢的摄食需要。高温条件实验于2024年5月开展,实验设计与秋季基本相同,为保证各实验组鱼类生物量基本相同及由于苦草的季节生长问题,两次实验所用苦草和鱼类规格略有不同。

表1 实验所用苦草规格
Table 1 Specification of experimental *Vallisneria natans*

温度	数量/株	全长/cm	根长/cm	质量/(g·株 ⁻¹)	生物量/(g·m ⁻²)
低温	11	47.4±2.0	7.7±0.9	10.5±1.9	432.8±66.1
高温	12	48.0±1.8	8.8±1.3	7.0±0.9	281.5±37.1

注:表中数据为均值±标准差,n=3,下同。

表2 实验所用鱼类规格
Table 2 Specification of experimental fish

温度	种类	数量/尾	体长/cm	质量/(g·尾 ⁻¹)	生物量/(g·m ⁻²)
低温	武昌鱼	3	7.8±1.2	3.84±0.55	42.74±2.19
	鲫	2	8.1±0.9	6.74±1.89	49.31±5.40
	乌鳢	1	11.7±0.5	11.91±1.81	43.59±6.63
	鳊	1	11.0±0.5	12.78±1.10	46.78±5.35
高温	武昌鱼	1	9.5±0.4	11.96±1.67	44.30±6.19
	鲫	1	8.2±0.2	12.78±0.29	47.33±1.07
	乌鳢	1	11.3±0.6	13.94±1.68	51.63±6.22
	鳊	2	6.5±0.3	6.43±0.11	47.62±0.41

1.3 样品采集与分析

实验开始以及实验期间每周现场测定水体的pH值、溶解氧含量(DO)和温度。同时,采集表层5~10 cm处水样,测定总氮(TN)、氨态氮(AN)、总磷(TP)、溶解活性磷(SRP)、高锰酸盐指数、总悬浮物(TSS)和叶绿素 a (Chla)浓度。分析方法参考《水和废水监测分析方法(第四版)》^[22]。

各实验组苦草根长、全长及湿重分别于实验开始前和实验结束后测定,通过式(1)计算各实验组苦草的相对生长率:

$$RGR = 1\,000 \times \ln(W_f / W_i) / W_i / t \quad (1)$$

式中,RGR是苦草的相对生长率,mg/(g·d); W_f 和 W_i 分别是实验结束后和实验开始前各组苦草的湿重,g; t 是实验持续时间,d。

1.4 数据处理

实验数据采用 SPSS 27.0 软件进行统计分析,通过重复测量方差分析(RM-ANOVA)方法分析随

时间推移,不同处理组间温度、DO、pH、营养盐浓度、TSS及Chla浓度之间的差异以及时间效应;通过独立样本 t 检验分析各组苦草参数在实验开始和实验结束后的差异;通过单因素方差分析比较实验结束时各组苦草参数差异。所有数据分别用Excel 2016、SPSS 27.0和Origin 2019进行整理、统计分析和绘图。

2 结果与分析

2.1 水体理化指标

2.1.1 低温条件下实验水体理化指标变化趋势

低温条件下,实验期间的温度为1~15℃。如图1所示,各处理组和对照组的温度、DO、pH随时间变化而变化,但各处理组之间无显著性差异($P>0.05$)。实验结束时,各处理组和对照组的TSS均显著低于实验初始($P<0.05$)。鲫组TSS浓度高于对照组($P<0.05$),而其他处理组与对照组之间无显著差异。

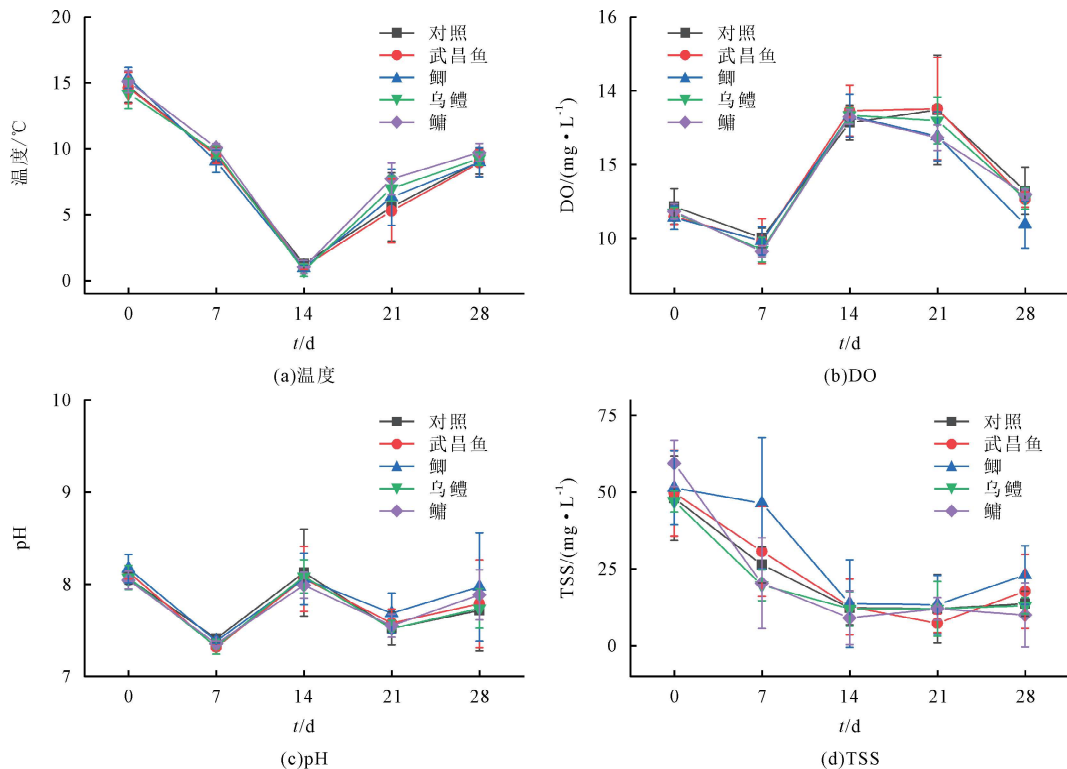


图1 低温条件下不同实验组中水体理化指标变化趋势

Fig.1 Trends of physical and chemical properties in different groups under low-temperature conditions

2.1.2 高温条件下实验水体理化指标变化趋势

高温条件下,实验期间的温度范围为18~28℃。如图2所示,各组的温度随时间呈现出显著的上升趋势。各组的DO随时间呈现出先上升后下降的趋势,武昌鱼组DO低于其他组,鳊组和乌鳢组DO高于对照组,其中武昌鱼组的DO显著低于鳊组($P<0.05$)。

鲫组pH经历了先上升后下降之外,其他各组pH整体呈现先上升后趋于平稳的趋势,其中鲫组的pH在实验后期显著低于对照组、乌鳢组和鳊组($P<0.05$)。实验结束时,各组TSS相较于实验初始均有所增加,其中鲫组TSS在实验后期显著上升且显著高于其他组($P<0.05$)。

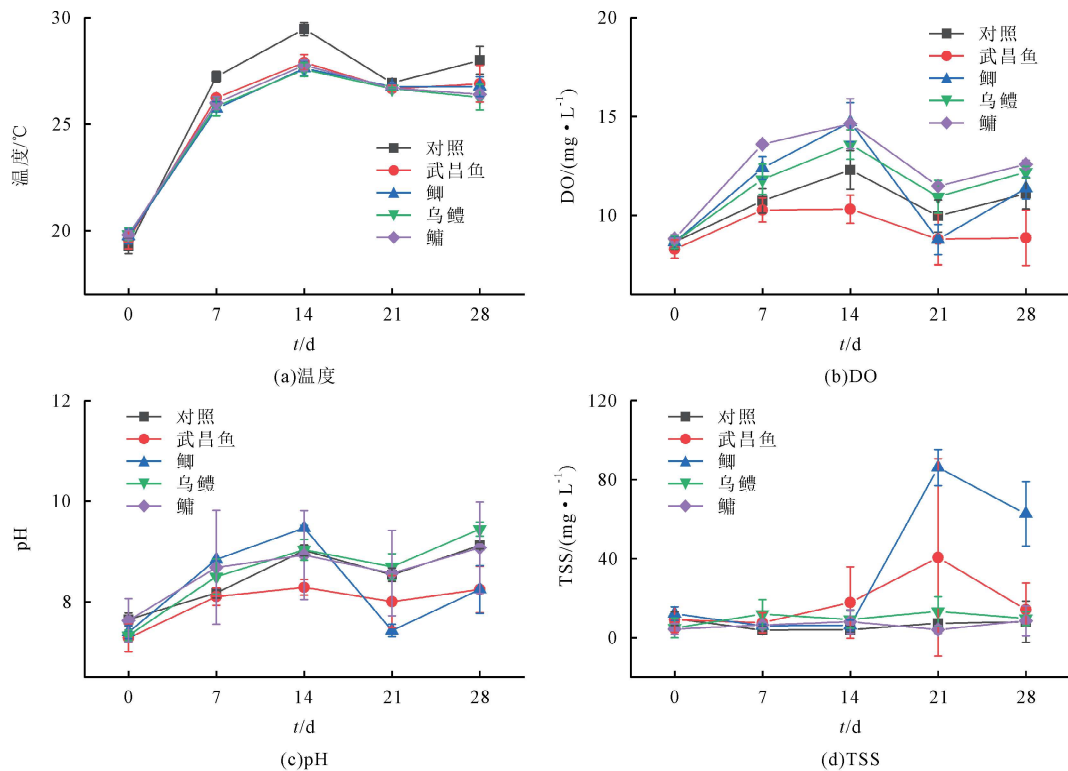


图2 高温条件下不同实验组中水体理化指标变化趋势
Fig.2 Trends of physical and chemical properties in different groups under high-temperature conditions

2.2 水质

2.2.1 低温条件下实验水质变化趋势

如图3所示,各组TP浓度整体随时间逐渐下降,鲫组相对于其他组波动较大。实验结束时,对照组、武昌鱼组、鲫组、乌鳢组和鳙组TP浓度分别为0.035、0.043、0.067、0.030和0.030 mg/L,鲫组的TP浓度显著高于对照组($P<0.05$),其他鱼类处理组与对照组不存在显著性差异($P>0.05$)。对照组、鲫组、武昌鱼组SRP浓度整体呈下降趋势,实验结束时SRP浓度相较于实验初始显著降低($P<0.05$)。鳙组和乌鳢组SRP波动较大,在实验后期显著高于其他组($P<0.05$)。对照组TN浓度呈现出先下降后上升再下降的趋势,而各处理组TN浓度呈现出先下降再趋于平稳的趋势。实验结束时,对照组、武昌鱼组、鲫组、乌鳢组和鳙组TN浓度分别为0.331、0.459、0.440、0.396和0.488 mg/L,武昌鱼组、鲫组和鳙组的TN浓度显著高于对照组($P<0.05$)。各组中AN浓度在实验前后无显著性差异($P>0.05$),鳙组AN浓度在实验期间显著低于对照组($P<0.05$)。武昌鱼组、鲫组和鳙组的高锰酸盐指数在实验后期显著上升($P<0.05$),其他组无显著变化。除武昌鱼组实验结束时高锰酸盐指数显著高于初始值($P<0.05$),其他组无明显差异。各组Chla浓度变化趋势相似,均呈现先上升后下降的趋势,各处理组的Chla浓度高于对照组,其中乌鳢组Chla浓度相较于其他鱼类处理组较低。

实验结束时,对照组、武昌鱼组、鲫组、乌鳢组和鳙组Chla浓度分别为1.57、3.79、6.81、1.59和3.16 mg/L,鲫组的Chla浓度显著高于对照组和乌鳢组($P<0.05$)。

2.2.2 高温条件下水质指标变化趋势

如图4所示,鲫组TP浓度在实验期间显著上升且显著高于其他组($P<0.05$),实验结束时,对照组、武昌鱼组、鲫组、乌鳢组和鳙组TP浓度分别为0.034、0.056、0.179、0.036和0.049 mg/L,鱼类处理组TP浓度均高于对照组且鲫组最为显著。各组之间SRP浓度均无显著性差异($P>0.05$)。鲫组TN浓度在实验期间显著上升且显著高于对照组($P<0.05$),实验结束时,对照组、武昌鱼组、鲫组、乌鳢组和鳙组TN浓度分别为0.787、0.939、1.212、0.713和0.943 mg/L,武昌鱼组、鲫组和鳙组显著高于对照组($P<0.05$)。各组中AN浓度在实验期间先缓慢下降后快速上升,其中对照组、武昌鱼组和乌鳢组AN浓度在实验后期上升显著,实验中期鲫组中的AN浓度显著高于对照组($P<0.05$)。各组高锰酸盐指数均随时间而有所升高,武昌鱼组和鲫组高锰酸盐指数在实验后期显著高于对照组($P<0.05$)。鲫组Chla浓度随时间显著上升且显著高于其他组($P<0.05$),乌鳢组对Chla浓度的影响最小。

2.3 苦草生长

2.3.1 低温条件下苦草生长情况

如图5所示,各组苦草根长和全长在实验前后无

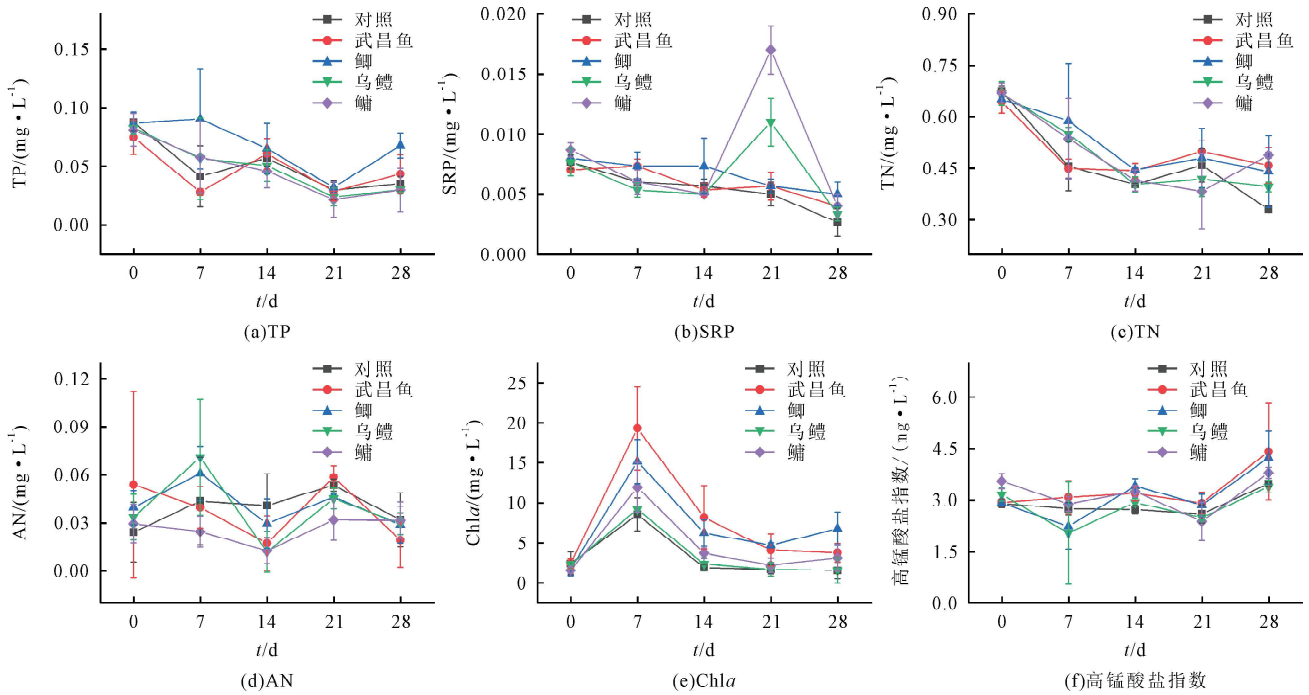


图3 低温条件下不同实验组中水质变化趋势

Fig.3 Trends of water quality in different experimental groups under low-temperature conditions

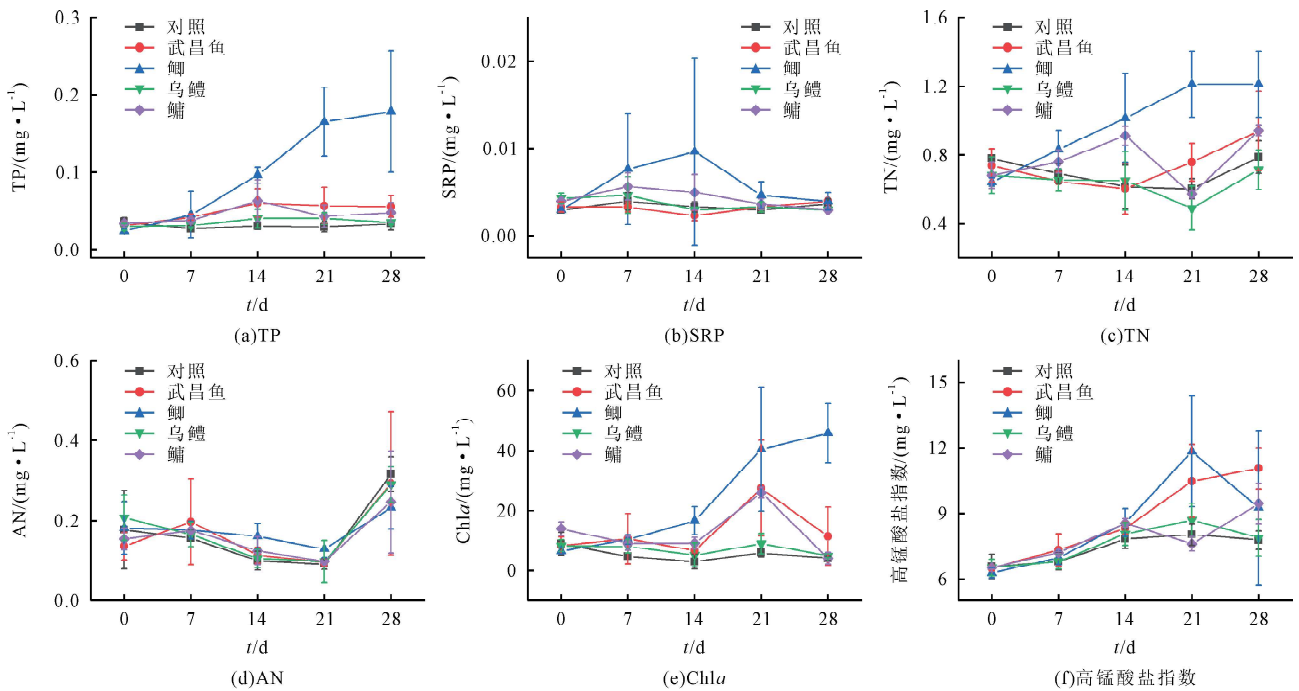


图4 高温条件下不同处理组中水质的变化趋势

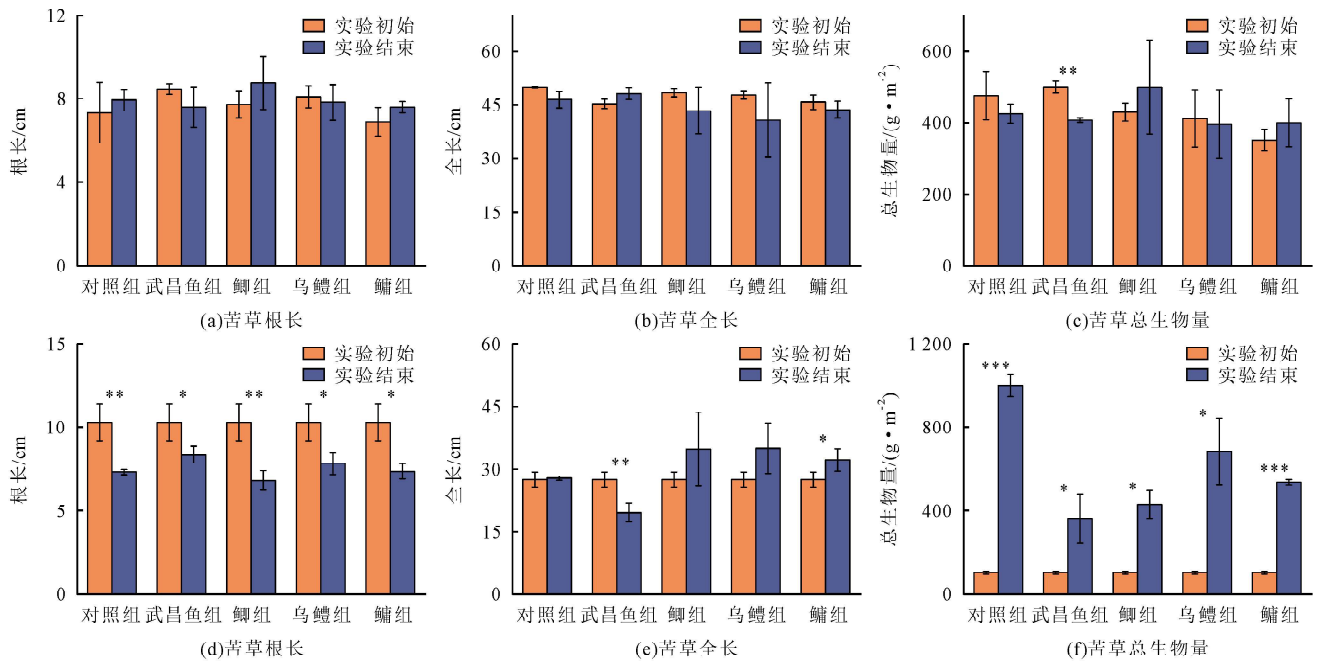
Fig.4 Trends of water quality in different experimental groups under high-temperature conditions

显著性差异 ($P>0.05$)。实验结束时,对照组、武昌鱼组和乌鳢组中的沉水植物总生物量都有所下降,相对增长速率分别为 -0.28 、 -0.59 、 -0.13 ,呈现出负增长,而鲫组和鳙组中沉水植物总生物量增加,相对增长速率分别为 0.42 和 0.47 。虽然实验结束时对照组和乌鳢组的苦草总生物量相对于实验初始均有所降低,但差异不显著 ($P>0.05$)。武昌鱼组实验结束时的苦草总生物

量则显著低于实验初始 ($P<0.01$)。鲫组和鳙组中苦草总生物量在实验初始和结束时无显著性差异 ($P>0.05$)。

2.3.2 高温条件下实验苦草生长情况

如图5所示,实验结束时各处理组苦草根长均有显著性降低 ($P<0.05$),武昌鱼组中苦草根长最长。对照组中苦草全长在实验前后无显著性变化,鲫组和乌鳢组苦草全长虽有增加,但与实验初始无显著性差



注: * $P<0.05$; ** $P<0.01$; *** $P<0.005$; (a)、(b)、(c)分别为低温条件下实验结果; (d)、(e)、(f)分别为高温条件下实验结果。

图5 不同处理组实验前后苦草根长、全长和总生物量的变化趋势

Fig.5 Trends in root length, overall length and total biomass of *Vallisneria natans* before and after the experiment in different treatment groups

异。武昌鱼组苦草全长显著性降低($P<0.01$),而鳙组苦草全长显著性增加($P<0.05$)。各处理组的苦草总生物量均有显著提高,对照组、武昌鱼组、鳊组、乌鳢组、鳙组对应的苦草的相对增长速率分别是82.0、45.7、51.9、68.4、59.8。实验结束后,对照组苦草总生物量显著高于其他处理组,武昌鱼组苦草总生物量显著低于乌鳢组($P<0.05$)。

3 讨论

3.1 鱼类对水体理化指标的影响

研究表明,在温度较高时鱼类的运动能力和能源需求增加,生长速度也随温度升高而增加^[23,24]。水体溶解氧浓度以及pH是影响水体生物生存的重要指标,低温条件下,鱼类由于活性较低,对水体中溶解氧浓度以及pH影响不显著。鳊作为杂食性鱼类,在低温时其摄食频率和消化能力下降,活动范围也相对缩小。但即便活动能力受限,鳊鱼仍会进行一定的觅食活动,这可能与其生存本能有关,会扰动底质,导致TSS升高。温度较高时,苦草的生长速度较快,光合产氧增加,虽然鱼类的活动会消耗水体中的溶解氧,但不足以抵消光合产氧。仅武昌鱼组溶解氧含量显著降低,这是由于武昌鱼摄食苦草,排泄作用也增强,导致该组产氧较其他组少,pH也因 CO_2 消耗减少而降低。无论是低温还是高温条件下,鳊对水体总悬浮物的影响程度都大于其他鱼类,且高温条件下的影响更强,该研究结果与Gu等的实验结果一致^[25-27]。这是由

于鳊的底层杂食习性对于沉积物的扰动作用所造成,鳊在高温下的较高活动性导致其扰动作用更强。

3.2 鱼类对水质的影响

不同温度条件下鱼类对营养盐释放和水体中营养盐循环的影响不同,高温加速代谢,营养盐释放多;低温时部分鱼类代谢虽慢,但对营养盐转化等过程仍有作用,共同塑造沉水植物生长环境。低温条件下,鳊组的TN、TP浓度显著高于对照组,鳙组的AN浓度在实验结束时显著低于对照组;高温条件下,鱼类处理组的TP浓度高于对照组,SRP浓度与对照组无显著性差异,鳊组的TN浓度显著高于对照组。可见,不管是较低温度条件下还是较高温度条件下,鳊对水中氮磷的影响相对于其他鱼类都较大,这与Dorenbosch和Fischer等的研究结果一致^[28-30],这可能是因为杂食性鱼类的食物来源广泛,其活动和代谢会向水体中释放较多的营养物质。实验过程中,鱼类处理组的Chla含量都高于对照组,乌鳢对水体中Chla含量的影响相比其他鱼类较小,这与水体氮、磷含量的增加有关,而乌鳢对水体营养盐浓度的影响较小,这是因为肉食性鱼类通常以其他鱼类或水生动物为食,其代谢产物相对较少,对水质的影响可能相对较小^[31]。水体中营养盐含量的增加促进了浮游植物的生长^[32,33],这与姚洁等^[34,35]的研究结果一致。高锰酸盐指数是反映水体有机物污染程度的重要指标^[36],本研究低温条件下实验的鱼类处理组的高锰酸盐指数与对照组无显著性差异,高温条件下,武昌鱼组和鳊组的高锰酸盐指数显

著高于对照组,武昌鱼的摄食和排泄以及鲫鱼中藻类的繁殖可能是高锰酸盐指数升高的主要原因。

3.3 鱼类对苦草生长的影响

低温条件下,实验期间鲫、乌鳢和鳙对苦草的生长影响并不显著,仅武昌鱼组苦草总生物量略有降低,这可能是由于温度较低,鱼类的摄食和扰动作用均大幅降低,而武昌鱼作为一种草食性鱼类出于生存需要摄食了一定量的苦草。温度较高时,相比对照组,武昌鱼、鲫、乌鳢和鳙组均显著降低了苦草的总生物量,且实验结束时,武昌鱼组的苦草总生物量显著低于乌鳢组,可见不同食性的鱼类对苦草的生长均有抑制作用,武昌鱼对于苦草生长的抑制作用最强,这与王晓平等^[13,37]的研究结果类似。不同温度下鱼类对营养盐释放和水体中营养盐循环的影响不同,高温加速代谢,营养盐释放多;低温时部分鱼类代谢虽慢,但对营养盐转化等过程仍有作用,共同影响沉水植物生长环境。研究表明,适量营养盐可促进沉水植物生长,但过量营养盐会导致藻类大量繁殖,与沉水植物竞争光照和营养,抑制其生长^[38],武昌鱼由于直接摄食作用以及显著增加了水体浮游植物生物量的原因,对苦草的生长产生了不利影响。同时,高温条件下各组由于苦草的分蘖,实验结束时根长较初始显著降低,武昌鱼组由于摄食作用,苦草的全长也显著降低,由于资源再分配,实验结束时,武昌鱼组的苦草根长大于其他组。鱼类不仅能够通过直接的摄食作用影响沉水植物的生长,还会通过在水体中的扰动作用,对沉水植物的生根和固着产生影响,同时由于扰动作用引起沉积物上浮,导致水体浊度增加进而影响植物的光合作用,也不利于沉水植物的生长^[25]。本研究中,武昌鱼对苦草的影响主要是摄食,而其他鱼类对苦草生长的影响主要是扰动和营养竞争等间接因素所致。肉食性鱼类乌鳢的影响最小,可能是由于实验系统内缺少饵料鱼类,从而影响了乌鳢的活动性。

此外,因受实验条件的限制,本研究所采用的实验系统尺寸较小。较小的环境空间可能会影响鱼类正常的生活行为,从而导致研究结果与真实情况之间存在一定的差异。后续应考虑扩大实验系统开展进一步的研究,从而更加真实地揭示鱼类对水质及沉水植物的影响。

4 结论

(1)低温条件下,鱼类对于水体溶解氧和pH的影响不明显,而随着温度的升高,草食性鱼类由于活性增强,对苦草的摄食和排泄作用增强,显著降低水体中的溶解氧浓度和pH。

(2)低温条件下,鱼类活动性下降,对水质影响相对较低,而随着温度的升高,鱼类活动性增强,鲫鱼显著增加水中的氮、磷营养盐和Chla含量,武昌鱼增加了氮、高锰酸盐指数和Chla含量,鳙和乌鳢对水质影响相对较小。

(3)低温条件下,仅武昌鱼不利于苦草的生长,而随着温度的升高,4种鱼类对于苦草的生长均有不利影响,其中武昌鱼的影响最显著,鲫鱼次之,乌鳢的影响最小。因此,沉水植物恢复需重点控制草食性和底层杂食性鱼类的不利影响。

【参考文献】

- [1] 黄小龙,郭艳敏,张毅敏,等. 沉水植物对湖泊沉积物氮磷内源负荷的控制及应用[J]. 生态与农村环境学报, 2019,35(12):1524-1530.
Huang Xiaolong, Guo Yanmin, Zhang Yimin, et al. Controlling of internal phosphorus and nitrogen loading in lake sediment by submerged macrophytes and its application[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2019,35(12):1524-1530.
- [2] Janssen A B G, Hilt S, Kosten S, et al. Shifting states, shifting services: linking regime shifts to changes in ecosystem services of shallow lakes[J]. Freshwater Biology, 2021, 66(1):1-12.
- [3] Van der Valk A G. The Biology of Freshwater Wetlands [M]. Oxford University Press, 2012.
- [4] Chen Y H, Liu W F. Research on stress factors and countermeasures of submerged plant community construction[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021,632(2):022017.
- [5] Bakker E S, Wood K A, Pagès J F, et al. Herbivory on freshwater and marine macrophytes: a review and perspective[J]. Aquatic Botany, 2016,135:18-36.
- [6] Moss B. Engineering and biological approaches to the restoration from eutrophication of shallow lakes in which aquatic plant communities are important components[J]. Hydrobiologia, 1990,200(1):367-377.
- [7] 赵风斌. 富营养化水体中常见沉水植物恢复重建影响因素研究[D]. 上海:上海海洋大学, 2012.
Zhao Fengbin. Research on Influence Factors of Common Submerged Macrophytes Restoration in Eutrophic Water [D]. Shanghai:Shanghai Ocean University, 2012.
- [8] 李泽. 若干环境因子对四种沉水植物恢复影响研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2012.
Li Ze. Studies on the Impact of Several Environment Elements to 4 Kinds of Submerged Macrophytes Restoration [D]. Wuhan:Wuhan University of Technology, 2012.
- [9] 王华,逢勇,刘申宝,等. 沉水植物生长影响因子研究进展[J]. 生态学报, 2008,28(8):3958-3968.

- Wang Hua, Pang Yong, Liu Shenbao, et al. Research progress on influencing of environmental factors on the growth of submersed macrophytes[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(8):3958–3968.
- [10] 梅雪英, Vladimir Razlutskiy, Lars G Rudstam, 等. 杂食性鱼类对浅水水体底栖-浮游生境耦合作用的影响: 微综述[J]. *湖泊科学*, 2021, 33(3):667–674.
- Mei Xueying, Vladimir Razlutskiy, Lars G Rudstam, et al. Effects of omnivorous fish on benthic-pelagic habitats coupling in shallow aquatic ecosystems: a minireview[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2021, 33(3):667–674.
- [11] Nurminen L, Horppila J, Lappalainen J, et al. Implications of rudd (*Scardinius erythrophthalmus*) herbivory on submerged macrophytes in a shallow eutrophic lake[J]. *Hydrobiologia*, 2003, 506(1):511–518.
- [12] 张嘉琦, 方祥光, 高晓月, 等. 沉水植物过度生长的生物控制技术进展[J]. *农业环境与发展*, 2013, 30(3):66–68.
- Zhang Jiaqi, Fang Xiangguang, Gao Xiaoyue, et al. Research progress of biological control technology for overgrowth of submerged plants[J]. *Agro-environment & Development*, 2013, 30(3):66–68.
- [13] 王晓平, 王玉兵, 杨桂军, 等. 不同鱼类对沉水植物生长的影响[J]. *湖泊科学*, 2016, 28(6):1354–1360.
- Wang Xiaoping, Wang Yubing, Yang Guijun, et al. The effects of different fish species on growth of submerged macrophytes[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2016, 28(6): 1354–1360.
- [14] 吴红飞, 魏小飞, 关保华, 等. 沉水植物对鱼类扰动引起的沉积物再悬浮的影响[J]. *江苏农业科学*, 2015, 43(4):369–371.
- Wu Hongfei, Wei Xiaofei, Guan Baohua, et al. Effect of submerged plants on sediment resuspension caused by fish disturbance[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2015, 43(4):369–371.
- [15] 孙健, 贺锋, 张义, 等. 草鱼对不同种类沉水植物的摄食研究[J]. *水生生物学报*, 2015, 39(5):997–1002.
- Sun Jian, He Feng, Zhang Yi, et al. The feeding behavior of grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) on different types of submerged plants[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2015, 39(5):997–1002.
- [16] Qiu X C, Mei X Y, Razlutskiy V, et al. Effects of common carp (*Cyprinus carpio*) on water quality in aquatic ecosystems dominated by submerged plants: a mesocosm study[J]. *Knowledge & Management of Aquatic Ecosystems*, 2019 (420):28.
- [17] Rooney N, Kalff J. Inter-annual variation in submerged macrophyte community biomass and distribution: the influence of temperature and lake morphometry[J]. *Aquatic Botany*, 2000, 68(4):321–335.
- [18] Rao W M, Ning J J, Zhong P, et al. Size-dependent feeding of omnivorous *Nile tilapia* in a macrophyte-dominated lake: implications for lake management[J]. *Hydrobiologia*, 2015, 749(1):125–134.
- [19] 陈松波. 不同温度条件下鲤鱼摄食节律与呼吸代谢的研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2004.
- Chen Songbo. Studies on Feeding Rhythm and Respiratory Metabolism of Common Carp at Different Temperature[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2004.
- [20] 刘加慧, 杨洪师, 王辉. 持续高温对吉富罗非鱼幼鱼消化酶和溶菌酶活力的影响[J]. *广东海洋大学学报*, 2013, 33(6): 47–51.
- Liu Jiahui, Yang Hongshuai, Wang Hui. Effects of continuous high temperature on digestive enzyme and lysozyme activities of young GIFT *Oreochromis niloticus*[J]. *Journal of Guangdong Ocean University*, 2013, 33(6):47–51.
- [21] 苏艳莉. 环境温度对鱼类的影响及预防研究[J]. *农技服务*, 2015, 32(7):191–192.
- Su Yanli. Study on the influence of environmental temperature on fish and its prevention[J]. *Agricultural Technology Service*, 2015, 32(7):191–192.
- [22] 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[M]. 4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002:200–284.
- [23] Streit Jr D P, Tesser M B, Burkert D, et al. Survival and growth of juvenile marine pejerrey, *Odontesthes argentinensis*, reared at different temperatures[J]. *Journal of the World Aquaculture Society*, 2010, 41(6):931–935.
- [24] Person-Le Ruyet J, Buchet V, Vincent B, et al. Effects of temperature on the growth of pollack (*Pollachius pollachius*) juveniles[J]. *Aquaculture*, 2006, 251(2/3/4):340–345.
- [25] Gu J, Jin H, He H, et al. Effects of small-sized crucian carp (*Carassius carassius*) on the growth of submerged macrophytes: implications for shallow lake restoration[J]. *Ecological Engineering*, 2016, 95:567–573.
- [26] He H, Hu E, Yu J L, et al. Does turbidity induced by *Carassius carassius* limit phytoplankton growth? A mesocosm study[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(5):5012–5018.
- [27] 陈坤全, 李启升, 韩燕青, 等. 鲫(*Carassius auratus*)对浅水湖泊水体浊度、营养水平和浮游生物生物量的影响: 基于中宇宙模拟实验[J]. *湖泊科学*, 2021, 33(2):397–404.
- Chen Kunquan, Li Qisheng, Han Yanqing, et al. Effects of *Carassius auratus* on water turbidity, nutrient levels and plankton biomass in shallow lakes: a mesocosm experiment [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2021, 33(2):397–404.
- [28] Dorenbosch M, Bakker E S. Effects of contrasting omnivorous fish on submerged macrophyte biomass in temperate lakes: a mesocosm experiment[J]. *Freshwater Biology*, 2012, 57(7):1360–1372.
- [29] 姚洁, 刘正文. 罗非鱼对富营养型水体中沉水植物苦草的影响[J]. *生态环境学报*, 2010, 19(5):1063–1067.

- Yao Jie, Liu Zhengwen. Effects of *Tilapia* on submerged macrophyte *Vallisneria spiralis* in eutrophic waters[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2010,19(5):1063–1067.
- [30] Fischer J R, Krogman R M, Quist M C. Influences of native and non-native benthivorous fishes on aquatic ecosystem degradation[J]. Hydrobiologia, 2013,711(1):187–199.
- [31] Guo C, Li S Q, Ke J, et al. The feeding habits of small-bodied fishes mediate the strength of top-down effects on plankton and water quality in shallow subtropical lakes[J]. Water Research, 2023,233:119705.
- [32] 李瑞萍,张欣欣,刘卓,等. 池塘养殖水体 pH、营养盐、叶绿素 *a* 及 3 种磺胺类抗生素分布特征及其相关性分析[J]. 环境工程学报, 2015,9(6):2582–2588.
- Li Ruiping, Zhang Xinxin, Liu Zhuo, et al. Distribution characteristics and relationships of pH, nutrients, chlorophyll-*a* and three sulfonamides in pond aquaculture water[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, 9(6): 2582 – 2588.
- [33] 饶伟民. 不同大小罗非鱼对苦草和附着藻的影响及其对浅水富营养湖泊修复的意义[D]. 广州:暨南大学, 2014.
- Rao Weimin. Size-dependent Effects of Nile Tilapia (*Oreochromis niloticus*) on *Vallisneria natans* and Periphyton and Its Implication for the Eutrophic Lake Restoration[D]. Guangzhou:Jinan University, 2014.
- [34] 姚洁. 罗非鱼、附着藻类与沉水植物苦草关系的研究[D]. 广州:暨南大学, 2010.
- Yao Jie. Study on the Relationships among Tilapia, Periphyton and Submerged Macrophyte *Vallisneria spiralis*[D]. Guangzhou:Jinan University, 2010.
- [35] 胡婕. 升温与杂食性鱼类对沉水植物占优的浅水水体水质的影响[D]. 合肥:安徽农业大学, 2023.
- Hu Jie. Effects of Elevated Temperature and Omnivorous Fish on Water Quality in Shallow Aquatic Systems Dominated by Submerged Plants[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2023.
- [36] 马晓玲,王小娟. 浅析气相分子吸收光谱法在水质高锰酸盐指数的测定[J]. 治淮, 2022(6):17–18.
- Ma Xiaoling, Wang Xiaojuan. Analysis on determination of permanganate index in water quality by gas phase molecular absorption spectrometry[J]. Huaihe River Management, 2022 (6):17–18.
- [37] 王晓平,王玉兵,杨桂军,等. 不同鱼类对凤眼莲生长以及水质的影响[J]. 环境工程学报, 2017,11(4):1994–2000.
- Wang Xiaoping, Wang Yubing, Yang Guijun, et al. Effect of different fishes on growth of *Eichhornia crassipes* and the water quality[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017,11(4):1994–2000.
- [38] Xu X G, Zhou Y W, Han R M, et al. Eutrophication triggers the shift of nutrient absorption pathway of submerged macrophytes: implications for the phytoremediation of eutrophic waters[J]. Journal of Environmental Management, 2019,239: 376–384.