

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

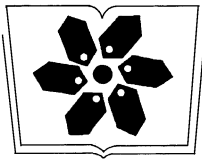
Acta Ecologica Sinica



第32卷 第18期 Vol.32 No.18 **2012**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 32 卷 第 18 期

2012 年 9 月 (半月刊)

目 次

亚热带典型树种对模拟酸雨胁迫的高光谱响应.....	时启龙, 江 洪, 陈 健, 等 (5621)
珠江三角洲地面风场的特征及其城市群风道的构建.....	孙 武, 王义明, 王越雷, 等 (5630)
粤北山地常绿阔叶林自然干扰后冠层结构与林下光照动态.....	区余端, 苏志尧 (5637)
四种猎物对南方小花蝽生长发育和繁殖的影响.....	张昌容, 鄧军锐, 莫利锋 (5646)
普洱季风常绿阔叶林次生演替中木本植物幼苗更新特征.....	李帅锋, 刘万德, 苏建荣, 等 (5653)
喀斯特常绿落叶阔叶混交林物种多度与丰富度空间分布的尺度效应.....	张忠华, 胡 刚, 祝介东, 等 (5663)
格氏栲天然林土壤养分空间异质性.....	苏松锦, 刘金福, 何中声, 等 (5673)
种植香根草对铜尾矿废弃地基质化学和生物学性质的影响.....	徐德聪, 詹 婧, 陈 政, 等 (5683)
灌溉对三种荒漠植物蒸腾耗水特性的影响.....	单立山, 李 毅, 张希明, 等 (5692)
真盐生植物盐角草对不同氮形态的响应.....	聂玲玲, 冯娟娟, 吕素莲, 等 (5703)
鹿泉沟自然保护区寒温性针叶林演替优势种格局动态分析.....	张钦弟, 毕润成, 张金屯, 等 (5713)
不同水肥条件下 AM 真菌对丹参幼苗生长和营养成分的影响.....	贺学礼, 马 丽, 孟静静, 等 (5721)
垄沟覆膜栽培冬小麦田的土壤呼吸.....	上官宇先, 师日鹏, 韩 坤, 等 (5729)
不同方式处理牛粪对大豆生长和品质的影响.....	郭立月, 刘雪梅, 战丽杰, 等 (5738)
基于大气沉降与径流的乌鲁木齐河源区氮素收支模拟.....	王圣杰, 张明军, 王飞腾, 等 (5747)
基于能值理论的循环复合农业生态系统发展评价——以福建省福清星源循环农业产业示范基地为例.....	钟珍梅, 翁伯琦, 黄勤楼, 等 (5755)
低温暴露和恢复对棘胸蛙雌性亚成体生存力及能量物质消耗的影响.....	凌 云, 邵 晨, 颜志刚, 等 (5763)
暗期干扰对棉铃虫两个不同地理种群滞育抑制作用的比较.....	陈元生, 涂小云, 陈 超, 等 (5770)
水土流失治理措施对小流域土壤有机碳和全氮的影响.....	张彦军, 郭胜利, 南雅芳, 等 (5777)
不同管理主体对泸沽湖流域生态系统影响的比较分析.....	董仁才, 苟亚青, 李思远, 等 (5786)
连江鱼类群落多样性及其与环境因子的关系.....	李 捷, 李新辉, 贾晓平, 等 (5795)
溶氧水平对鲫鱼代谢模式的影响.....	张 伟, 曹振东, 付世建 (5806)
象山港人工鱼礁区的网采浮游植物群落组成及其与环境因子的关系.....	江志兵, 陈全震, 寿 鹿, 等 (5813)
填海造地导致海湾生态系统服务损失的能值评估——以套子湾为例.....	李睿倩, 孟范平 (5825)
城市滨水景观的视觉环境质量评价——以合肥市为例.....	姚玉敏, 朱晓东, 徐迎碧, 等 (5836)
专论与综述	
生态基因组学研究进展.....	施永彬, 李钧敏, 金则新 (5846)
海洋酸化生态学研究进展.....	汪思茹, 殷克东, 蔡卫君, 等 (5859)
纺锤水蚤摄食生态学研究进展.....	胡思敏, 刘 胜, 李 涛, 等 (5870)
河口生态系统氨氧化菌生态学研究进展.....	张秋芳, 徐继荣, 苏建强, 等 (5878)
嗜中性微好氧铁氧化菌研究进展.....	林超峰, 龚 骏 (5889)
典型低纬度海区(南海、孟加拉湾)初级生产力比较.....	刘华雪, 宋星宇, 黄洪辉, 等 (5900)
植物叶片最大羧化速率及其对环境因子响应的研究进展.....	张彦敏, 周广胜 (5907)
中国大陆鸟类栖息地选择研究十年.....	蒋爱伍, 周 放, 覃 玥, 等 (5918)
研究简报	
孵化温度对赤链蛇胚胎代谢和幼体行为的影响.....	孙文佳, 俞 霄, 曹梦洁, 等 (5924)
不同培肥茶园土壤微生物量碳氮及相关参数的变化与敏感性分析.....	王利民, 邱珊莲, 林新坚, 等 (5930)
施肥对两种莧菜吸收积累镉的影响.....	李凝玉, 李志安, 庄 萍, 等 (5937)

期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 322 * zh * P * ¥70.00 * 1510 * 36 * 2012-09



封面图说: 冬天低空飞翔的丹顶鹤——丹顶鹤是鹤类中的一种, 因头顶有“红肉冠”而得名。是东亚地区特有的鸟种, 因体态优雅、颜色分明, 在这一地区的文化中具有吉祥、忠贞、长寿的象征, 是传说中的仙鹤, 国家一级保护动物。丹顶鹤具备鹤类的特征, 即三长——嘴长、颈长、腿长。成鸟除颈部和飞羽后端为黑色外, 全身洁白, 头顶皮肤裸露, 呈鲜红色。丹顶鹤每年要在繁殖地和越冬地之间进行迁徙, 只有在日本北海道等地是留鸟, 不进行迁徙, 这可能与冬季当地人有组织地投喂食物, 食物来源充足有关。

彩图提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201108051147

张伟,曹振东,付世建. 溶氧水平对鲫鱼代谢模式的影响. 生态学报, 2012, 32(18): 5806-5812.

Zhang W, Cao Z D, And Fu S J. Effect of dissolved oxygen level on metabolic mode in juvenile crucian carp. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(18): 5806-5812.

溶氧水平对鲫鱼代谢模式的影响

张 伟, 曹振东, 付世建*

(重庆师范大学进化生理与行为学实验室, 重庆市动物学重点实验室, 重庆 400047)

摘要:为了探讨水体溶氧水平对鲫鱼(*Carassius carassius*)运动、消化能力及其交互作用的影响,在(25.0±0.5)℃温度条件下,测定了8(饱和溶氧水平)、2和1mg/L溶氧水平下摄食(饱足摄食)和空腹组(空腹2 d)鲫鱼的临界游泳速度(U_{crit})、运动前耗氧率($MO_{2pre-exercise}$)、活跃耗氧率($MO_{2active}$)和代谢范围(MS)。摄食诱导的耗氧率上升在各溶氧水平下无显著差异。在饱和溶氧水平下,摄食组和空腹组的 U_{crit} 没有显著差异,但在1和2 mg/L条件下,摄食组的 U_{crit} 显著低于空腹组($P<0.05$)。在饱和溶氧水平条件下,消化和运动诱导的耗氧率上升在各个游泳水平均能完全叠加,且摄食组鱼类与空腹组鱼类具有相似的 MS 和 U_{crit} 和更高的 $MO_{2active}$,提示鲫鱼在常氧下为添加代谢模式。随着溶氧水平下降至2和1mg/L,呼吸能力(摄食组的 $MO_{2active}$)对溶氧水平下降较运动耗氧率更为敏感,消化诱导的耗氧率增加只能在较低游泳速度叠加,与空腹组鱼类比较,摄食组鱼类的 MS 和 U_{crit} 显著下降, $MO_{2active}$ 无显著差异,提示低氧下消化和运动对氧气需求竞争的加剧使其代谢模式转化为消化优先。

关键词:溶氧水平;代谢模式;消化;运动;耗氧率;鲫鱼

Effect of dissolved oxygen level on metabolic mode in juvenile crucian carp

ZHANG Wei, CAO Zhendong, FU Shijian*

Laboratory of Evolutionary Physiology and Behaviour, Chongqing Key Laboratory of Animal Biology, Chongqing Normal University, Chongqing 400047, China

Abstract: Under natural conditions, animals often need to carry out digestion and locomotion simultaneously. The physiological design of their cardio-respiratory systems must accommodate these simultaneous demands either by according emphasis to one of them or by somehow sharing them. The outcomes of the competition between digestion and locomotion i. e., metabolic modes, are ecologically important in fish species. In this study, we selected crucian carp (*Carassius carassius*), one of the most hypoxia tolerant fish as experimental model and aimed to investigate the effect of water dissolved oxygen level on digestion, locomotion and their interaction in juvenile crucian carp. To achieve this goal, we measured the critical swimming speed (U_{crit}), pre-exercise oxygen consumption rate ($MO_{2pre-exercise}$), active oxygen consumption rate ($MO_{2active}$) and metabolic scope (MS) of both fasting and fed fish at 8, 2 and 1 mg/L water dissolved oxygen level, under water temperature of (25.0±0.5) °C. The $MO_{2pre-exercise}$ of fasting and fed fish (satiated meal size) were 212.1 vs 488.3, 181.1 vs 418.2 and 106.4 vs 238.3 mg/kg. h, respectively, at 8, 2 and 1 mg/L. The U_{crit} of fasting and fed fish were 5.83 vs 6.15, 5.17 vs 4.74 and 3.78 vs 3.08 BL/s, respectively, at 8, 2 and 1 mg/L. Digestion had no effect on U_{crit} at 8 mg/L, but it caused a significantly lower U_{crit} in both 2 and 1 mg/L. The $MO_{2active}$ of fasting and fed fish were 689.9 vs 957.5, 587.5 vs 687.1 and 434.7 vs 469.9 mg/kg. h while the MS of fasting and fed fish were 463.2 vs 469.2, 406.4 vs 268.8 and 328.3 vs 231.6 mg/kg. h, respectively, at 8, 2 and 1 mg/L. At 8 mg/L, the postprandial increase in resting

基金项目:国家自然科学基金资助项目(31172096, 30700087); 重庆市自然科学基金(2010BB1089); 重庆市科技创新能力建设项目 CSTC(2010CA1010)

收稿日期:2011-08-05; **修订日期:**2012-02-14

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: shijianfu9@hotmail.com

MO_2 was maintained at all levels of swimming speed till the highest swimming speed and fed fish showed a similar U_{crit} and MS but a significantly higher $MO_{2active}$, which indicated that crucian carp exhibit the additive metabolic mode in normoxia. It suggest that the juvenile crucian carp can handle both digestion and aerobic locomotion simultaneously in normoxia due to the higher respiratory capacity and relatively lower metabolic capacity of digestive and locomotive tissues. Since the respiratory capacity (as indicated by $MO_{2active}$ of fed fish) decrease more acutely than swimming capacity (as indicated by U_{crit} and $MO_{2active}$ of fasting fish) with the decrease of dissolved oxygen level, the elevated MO_2 due to digestion can be maintained under only lower swimming speed throughout the U_{crit} test at both low dissolved oxygen level, but the fed fish end up having a profoundly lower U_{crit} and MS and a similar $MO_{2active}$ compared with fasting fish, which indicate that crucian carp exhibit the digestion-priority metabolic mode in hypoxia due to the intensified oxygen demand competition between digestion and locomotion. The present study showed that the impairment of postprandial aerobic swimming performance increased with decreasing water dissolved oxygen level due to the unparalleled changes in the central cardio-respiratory, peripheral digestive and locomotory capacities of crucian carp. The different metabolic strategies of juvenile crucian carp at different water dissolved oxygen levels may relate to changes in oxygen demand and supply.

Key Words: dissolved oxygen level; metabolic mode; digestion; locomotion; oxygen consumption rate; crucian carp (*Carassius carassius*)

摄食和运动不仅是动物最主要的生理活动,同时也是机体代谢能量消耗的主要过程^[1]。根据机体运动和摄食消化过程诱导能量代谢率大小^[2-3]及二生理过程在能量和时间分配的相对多少可以将鱼类分为消化生长型和运动型两种代谢类型。相对于运动型鱼类,消化生长型鱼类摄食代谢率能占用更大的代谢范围(MS),且更多的能量分配于消化和生长^[3-4]。机体生理功能的完成可能会受到呼吸能力(氧气的摄入、运输和二氧化碳的清除)和物质代谢能力(底物的动员、活化、运输、利用和代谢废物的清除)等方面的限制。水环境溶氧缺乏且时、空间变异大。因此,相对于陆生动物,鱼类生理功能的进行可能更易受心鳃“中心系统”呼吸能力,而不是肌肉和消化系统外周组织代谢能力的限制^[4]。在自然界中,鱼类需要同时进行摄食消化和游泳活动,这种能力对于其生存和适应环境具有重要意义^[5-6]。当两种功能同时进行时,机体在消化和运动代谢竞争上的优先次序被研究者称为代谢模式^[1,5]。鱼类在代谢模式上存在添加模式、运动优先模式和消化优先模式^[5]。鱼类代谢类型、代谢功率限制位点和代谢模式三者相互关联,构成代谢对策的主要内容^[4,7]。

早期动物运动能量学研究主要以哺乳类为实验对象,由于其摄食代谢低(消化诱导的代谢率上升一般在20%—50%),很难对运动能力产生影响。随着代谢模式的研究在鱼类(消化诱导的代谢率上升一般在150%—600%)和爬行类逐渐开展,餐后运动能力的变化及其生态学意义逐渐被研究者关注^[5,8]。最近有关温度、溶氧、饥饿、种类甚至运动锻炼等内外环境因子对代谢模式的影响在鱼类中开展^[4-5,7,9-11]。相关研究发现鱼类代谢模式具有可塑性,与不同条件下氧气获取的难易、食物资源多少等密切相关。如对于金鱼(*Carassius auratus*)、鲤鱼(*Cyprinus carpio*)、中华倒刺鲃(*Spinibarbus sinensis*)的研究发现,在低温下由于溶氧丰富且各生理功能代谢能力相对较低,均为添加代谢模式,随着温度的上升,不同鱼类根据其代谢类型的差异分别改变为消化优先、添加和运动优先模型^[7]。有关溶氧对代谢模式研究仅在海鲈(*Dicentrarchus labrax*)和南方鲇(*Silurus meridionalis*)上进行,研究发现两种鱼类在低氧下(1 mg/L)均为运动优先模型^[5,9]。因此推测,由于运动能力的维持对于鱼类生存更为迫切,在极端的条件下,鱼类都会采用运动优先模式来保证一定的运动能力。然而,这两种鱼类均为肉食性鱼类,有相对较高的摄食代谢能力(即偏向于生长代谢类型),该推测还有待以其他类型鱼类为对象进行研究。鲫鱼(*Carassius carassius*)为广布性鱼类,适应能力极强,其消化能力相对较低、心鳃系统结构和血氧亲和能力可塑性强^[12],为低氧耐受能力最强的鱼类之一,常氧下呼吸能力对生理功能的限制应该不大。研究发现多数鲤科鱼类的静止代谢水平在当溶氧下降到2到1 mg/L之间的某一点时,开始下降,即临界氧压(P_{crit})^[13],表明此时其基本生理机能受到影响。因此本研究选取鲫鱼幼鱼为

实验对象,在 25℃ 条件下,分别在 8 (饱和溶氧水平)、2 和 1 mg/L 溶氧水平下,测定空腹和摄食后鱼类的持续有氧运动能力,即临界游泳速度 (Critical swimming speed, U_{crit}) 及其耗氧率 (MO_2),本研究目标是考察溶氧水平对鲫鱼 (低氧耐受能力最强的鱼类之一) 摄食代谢、运动代谢及其交互作用 (即代谢模式) 的影响,并比较其与其它鱼类的差异。

1 材料与方法

1.1 实验鱼的来源与驯化

实验鲫幼鱼 (体重 (7.72 ± 0.25) g, 体长 (6.96 ± 0.06) cm, $n=48$) 购于当地渔民,购回后于 (25.0 ± 0.5) °C 将其驯化于实验室循环控温水槽 ($1.2 \text{ m} \times 0.55 \text{ m} \times 0.55 \text{ m}$, 实际水容量约为 250 L) 中,驯化时间为两周。驯化水体为经曝气 2 d 并去氯后的自来水,然后用充气泵向水体中持续充入空气,溶氧水平控制在 7 mg/L 以上,水体中氨氮浓度控制在 0.025 mg/L 以内。在驯化期间,以商业饲料进行投喂,每天在 10:00 进行饱足投喂 1 次,待投喂 1 h 后用虹吸管清除残饵及实验鱼粪便,以避免水体氨氮浓度过高影响实验鱼正常的生理状态。日换水量约为驯化水体的 10%,光照周期为 L:N=12:12 h。在实验前 48 h 对鲫幼鱼停止投喂。

1.2 不同溶氧水平下临界游泳速度的测定

为了研究溶氧和消化对鲫鱼有氧运动能力的影响,分别在每个溶氧水平下 (1、2、8 mg/L) 进行鱼类最大有氧持续游泳速度,即临界游泳速度 (U_{crit}) 的测定。水体中的溶氧水平通过空气泵和氮气阀进行调节 (水面覆盖塑料膜减小气体交换),精度在 ± 0.1 mg/L。

究采用本实验室自行研制的鱼类游泳代谢测定仪对 U_{crit} 进行测定。具体结构见图 1。通过调压电源调节调速水泵以调控游泳管内水流的速度。通过摄像机记录游泳管器内部黑色凝胶颗粒 (与水等比重) 的速度来标定水流速度并建立速度与电压的关系。在进行 U_{crit} 测定时,将 3 组实验鱼 (8 尾/组) 在常氧下禁食适应 2 d 为空腹组,另 3 组 (8 尾/组) 以商业饲料饱足投喂 (约 2%—4% 体重),随后将 3 组鱼放回不同溶氧水平下 (1、2、8 mg/L) 的鱼类游泳代谢测定仪中以微水流 (6 cm/s, 0.5 BL/s) 适应 2 h (根据预备实验餐后耗氧率的数据表明,此时实验鱼接近摄食代谢的峰值时期),随后开始 U_{crit} 的测定。该测定采用逐步提速法 (ramp- U_{crit}),初始速度为 15—18 cm/s,每档的流速增量 (ΔV) 为 3—6 cm/s (初始速度和增量的设置以保证各实验组在相似的时间历时完成测定为准),每档历时时间 (ΔT) 为 20 min,直致实验鱼力竭。力竭的判断标准为实验鱼拒绝游泳,其停留在游泳代谢仪尾部筛板处 20 s 以上^[14],力竭后,取出实验鱼测量其体高、体宽、体重、体长等相关形态学参数并做记录。由于实验鱼横截面积未超过水体横截面积的 10%,无需进行水阻校正。

每尾鱼 U_{crit} 采取以下公式进行计算^[15]:

$$U_{crit} = V + (t/T) \Delta V \quad (1)$$

式中, U_{crit} 为临界游泳速度 (cm/s), V 是完成设定时间 (20 min) 游泳所具有的最大速度 (鱼力竭前一档速度) (cm/s), ΔV 是各速度梯度的速度增量, T 是在各速度梯度下设定的持续游泳时间 ($T = 20 \text{ min}$), t 是在最大速度下未能完成设定历时的实际持续时间 ($t < 20 \text{ min}$)。为了消除体长对 U_{crit} 的影响,每尾实验鱼绝对 U_{crit} (cm/s) 均除以相应的体长得到相对 U_{crit} (BL/s)。

1.3 不同溶氧水平下游泳耗氧率的测定

在测定上述 U_{crit} 的同时测定其游泳耗氧率 (MO_2) 作为代谢率的指标。鱼类游泳代谢仪系统上附带有一个外循环系统 (流量约为 500 mL/min),该系统封闭时可进行水体取样,开放时可用于置换管内的代谢水。当游泳管的流速调到设定值后,用氧探头 (HQ20, Hach Company, Loveland, CO, USA) 对游泳代谢仪中氧浓度每 2 min 进行一次测定,为保证游泳代谢仪中氧含量在所设定的溶氧范围内,每 10 min 打开游泳代谢仪后盖进行换水,实验过程中溶氧值始终保持在所设定溶氧水平 ± 0.1 mg/L^[16],温度控制在 (25 ± 0.2) °C。每尾实验鱼的运动耗氧率 (MO_2 , $\text{mgO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$) 采用以下公式计算:

$$MO_2 = \text{Slope} \times 60 \times \text{Vol} / m \quad (2)$$

式中, Slope ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$) 为测定时间 (min) 与溶氧值 (mg/L) 之间经直线拟合后方程的斜率的绝对值, Vol

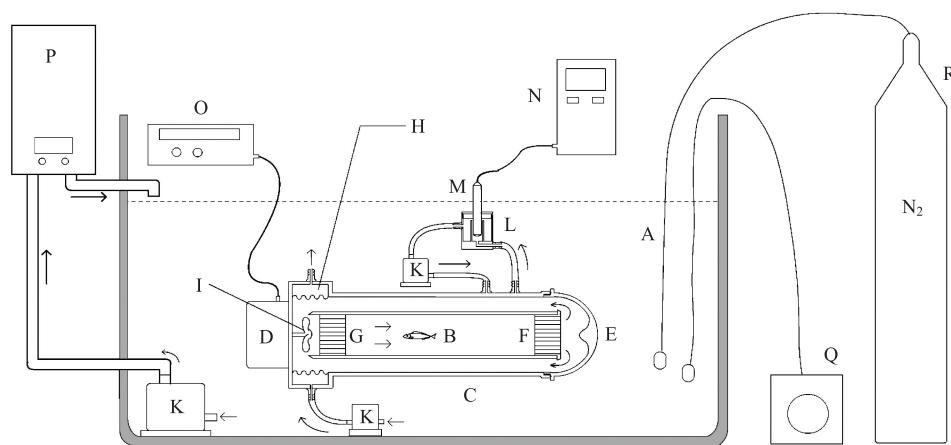


图1 鱼类游泳代谢测定仪

Fig.1 The structure of fish swimming-MO₂ determining device

A:水浴水槽;B:游泳管;C:回流套管;D:调速电机;E:密封盖;F G:多孔导流板;H:交换器;I:螺旋桨;K:水泵;L:测量杯;M:氧探头;N:溶氧仪;O:变频电源;P:水处理及控温装置;Q:空气泵;R:氮气瓶

为扣除实验鱼体积后的系统总体积, m 为实验鱼体重(kg)。在做 Slope 分析时,当相关性指数 $r^2 > 0.95$ 数值才被分析,用作计算耗氧率^[16]。

1.4 实验参数以及数据统计与分析

实验相关参数有:(1)运动前耗氧率($MO_{2\text{pre-exercise}}$),实验鱼在进行 U_{crit} 测定前的耗氧率(其中空腹组可作为日常维持代谢消耗,即静止耗氧率的指标;摄食组可作为摄食耗氧率的指标);(2)活跃耗氧率($MO_{2\text{active}}$),实验鱼在游泳过程中的最大耗氧率;(4)代谢范围(MS),实验鱼 $MO_{2\text{active}}$ 与 $MO_{2\text{pre-exercise}}$ 之间的差值。

用 Excel 对所有实验数据作常规计算,再用 STATISTICA4.5 软件进行相关统计分析,溶氧水平和消化对 U_{crit} 、 $MO_{2\text{pre-exercise}}$ 、 $MO_{2\text{active}}$ 和 MS 的影响采用双因素方差分析。不同游泳速度下消化和溶氧水平对耗氧率的影响采用三因素方差分析。所有实验数据均以平均值 $\pm$ 标准误(Mean $\pm$ SE)的方式表示,显著水平为 $P < 0.05$ 。

2 结果

2.1 溶氧水平和消化对运动前代谢率($MO_{2\text{pre-exercise}}$)的影响

溶氧水平($P < 0.001$)和消化($P < 0.001$)对 $MO_{2\text{pre-exercise}}$ 有显著的影响但无交互作用($P = 0.113$)(图2)。随着溶氧水平下降至2和1 mgO₂/L,空腹组的 $MO_{2\text{pre-exercise}}$ 分别下降15%和50%,而摄食组分别下降14%和51%。各溶氧水平组摄食组的 $MO_{2\text{pre-exercise}}$ 均显著大于空腹组($P < 0.001$)。

2.2 溶氧水平和消化对临界游泳速度(U_{crit})的影响

溶氧水平($P < 0.001$)和消化($P = 0.013$)对 U_{crit} 有显著的影响,且存在交互作用($P = 0.001$)(图3)。随着溶氧水平下降至2和1 mg/L,空腹组的 U_{crit} 分别下降11%和35%,而摄食组分别下降23%和50%。在饱和和溶氧水平组,摄食组和空腹组的 U_{crit} 没有显著差异;由于摄食组的 U_{crit} 对溶氧水平的下降更为敏感,在1和2 mg/L条件下,摄食组的 U_{crit} 显著低于空腹组($P < 0.05$)。

2.3 溶氧水平和消化对活跃耗氧率($MO_{2\text{active}}$)的影响

溶氧水平($P < 0.001$)和消化($P < 0.001$)对 $MO_{2\text{active}}$ 有显著的影响,且存在交互作用($P = 0.001$)(图4)。随着溶氧水平下降至2和1 mg/L,空腹组的 $MO_{2\text{active}}$ 分别下降15%和37%,而摄食组分别下降28%和51%。由于摄食组 $MO_{2\text{active}}$ 对溶氧下降更为敏感,在饱和溶氧水平和2 mg/L组,摄食组的 $MO_{2\text{active}}$ 高于空腹组分别为39%和17%,但1 mg/L组没有显著差异。

2.4 溶氧水平和消化对运动代谢范围(MS)的影响

溶氧水平($P < 0.001$)和消化($P = 0.021$)对 MS 有显著的影响,且存在交互作用($P = 0.014$)(图5,表1)。

对于空腹组鱼类, 1 mg/L 组显著低于其它 2 组, 而对于摄食组鱼类, 8 mg/L 组显著高于其它 2 组 ($P < 0.05$)。由于摄食组 MS 对溶氧下降更为敏感, 在 8 mg/L 条件下, 摄食对 MS 不产生影响, 但在 2 mg/L 组和 1 mg/L 条件下, 摄食组运动 MS 显著下降 ($P < 0.05$)。

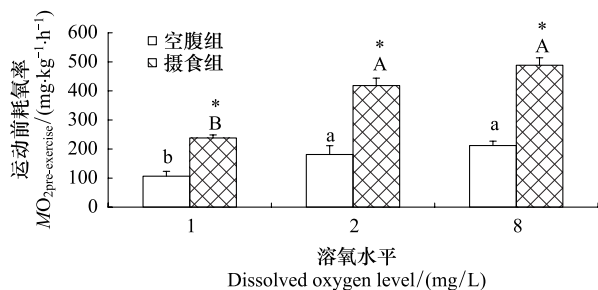


图2 溶氧水平和消化对鲫幼鱼运动前耗氧率 ($MO_{2pre-exercise}$) 的影响 (平均值±标准误, $n=8$)

Fig. 2 The effect of dissolved oxygen level and digestion on pre-exercise oxygen consumption rate in juvenile crucian carp

a, b: 上标字母不同表示空腹组不同溶氧水平组之间差异显著;

A, B: 上标字母不同表示摄食组不同溶氧水平组之间差异显著;

*: 表示同一溶氧水平下摄食组和空腹组之间差异显著

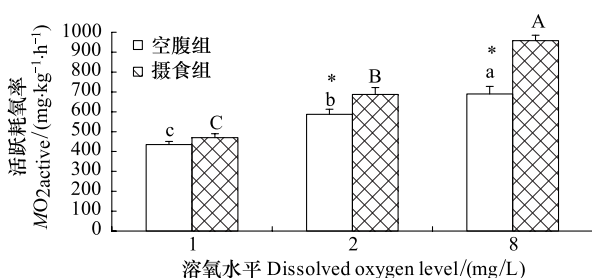


图4 溶氧水平和消化对鲫幼鱼活跃耗氧率 ($MO_{2active}$) 的影响 (平均值±标准误, $n=8$)

Fig. 4 The effect of dissolved oxygen level and digestion on active oxygen consumption rate in juvenile crucian carp

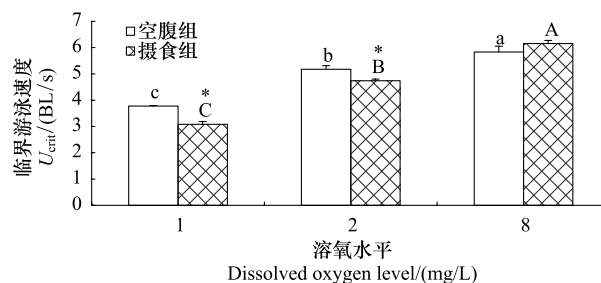


图3 溶氧水平和消化对鲫幼鱼临界游泳速度 (U_{crit}) 的影响 (平均值±标准误, $n=8$)

Fig. 3 The effect of dissolved oxygen level and digestion on critical swimming speed in juvenile crucian carp

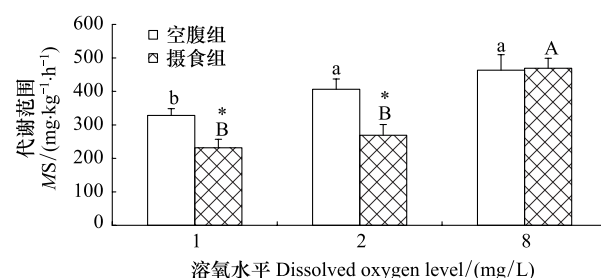


图5 溶氧水平和消化对鲫幼鱼运动代谢范围 (MS) 的影响 (平均值±标准误, $n=8$)

Fig. 5 The effect of dissolved oxygen level and digestion on metabolic scope in juvenile crucian carp

2.5 溶氧水平和消化对不同游泳速度下的游泳代谢率的影响

溶氧水平 ($P < 0.001$)、消化 ($P < 0.001$) 和游泳速度 ($P < 0.001$) 对 MO_2 均有显著影响。溶氧水平与消化 ($P < 0.001$) 和游泳速度 ($P = 0.007$) 之间均存在交互作用, 但消化和游泳速度之间 ($P = 0.635$) 及三因素间 ($P = 0.155$) 交互作用不显著。不同溶氧水平组鲫幼鱼 MO_2 均随游泳速度的上升而显著上升 (图 6)。消化导致各游泳速度下 MO_2 的上升, 但随着溶氧水平的下降消化导致的 MO_2 增量减少。

3 讨论

3.1 溶氧水平对鲫幼鱼摄食代谢的影响

本实验空腹组的 $MO_{2pre-exercise}$ 可认为是日常能量消耗的指标, 而摄食组的 $MO_{2pre-exercise}$ 可作为摄食代谢率指标, 因此摄食组和空腹组 $MO_{2pre-exercise}$ 的比值可反应鲫鱼摄食代谢的大小。在饱和溶氧水平下, 二者的比值为 230%, 低于相同温度条件下南方鲇的 408%^[17] 和鲇鱼 (*Silurus asotus*) 592%^[18], 而与运动能力较强的鲤鱼 (*Cyprinus carpio*) (181%) 和中华倒刺鲃 (*Spinibarbus sinensis*) (177%) 接近^[7]。说明鲫幼鱼消化、同化能力不强, 这可能是其生长较慢的原因之一。有关溶氧水平对摄食代谢的影响鲜见报道, 本研究发现随着溶氧水平从饱和下降到 1 mg/L, 鲫幼鱼摄食代谢率 (即摄食组的 $MO_{2pre-exercise}$) 下降 51%, 相同温度条件下南方鲇摄食代

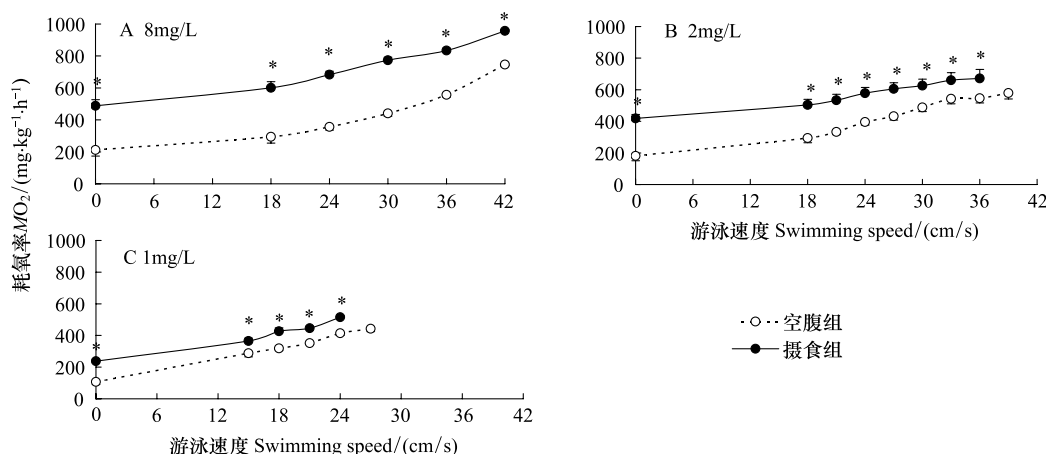


图6 溶氧水平和摄食对不同游泳速度下耗氧率的影响(平均值±标准误, $n=8$)

Fig. 6 The effect of dissolved oxygen level and digestion on swimming speed- MO_2 curve in juvenile crucian carp

* 表示同一游泳速度下摄食组和空腹组之间差异显著

谢下降 31%^[5],而鳕鱼(*Gadus morhua*) 10℃ 温度下溶氧水平下降至 30% 时,摄食代谢下降 24%^[19]。综合分析,溶氧水平对鲫鱼摄食代谢的影响与报道的鱼类大致相似或稍显敏感。

3.2 溶氧水平对运动能力的影响

鲫幼鱼在饱和溶氧水平下 U_{crit} 为 5.83 BL/s, 高于相似大小的鲇形目鱼类如黄颡鱼(*Pelteobagrus vachelli*) (4.63 BL/s) 和鲤形目的草鱼(*Ctenopharyngodon idellus*) (4.51 BL/s)^[4], 但低于相同条件下大多数其它鲤科鱼类幼鱼, 如相似大小的金鱼^[7]、鲤鱼^[7]、中华倒刺鲃^[7]和鳊鱼(*Parabramis pekinensis*)^[20] 在 25℃ 下的 U_{crit} 分别为 6.92、8.09、8.12、8.47 BL/s。其诱导的最大耗氧率即活跃耗氧率也大大低于大多数鲤科鱼类幼鱼。说明鲫鱼的运动能力也不强。随着溶氧水平从饱和下降至 1 mg/L, 鲫幼鱼的 U_{crit} 和 $MO_{2active}$ 分别下降了 35% 和 37%, 这于鳕鱼 50% 溶氧水平下降的结果相似(29% 的 U_{crit} 下降和 43% 的 $MO_{2active}$ 下降)^[9]。相同的溶氧水平下降导致南方鲇 U_{crit} 和 $MO_{2active}$ 的下降为 48% 和 59%^[5], 鳊鱼为 53% 和 66%^[20], 中华倒刺鲃为 50% 和 75%^[20], 金鱼为 39% 和 67%^[21]。可见鲫鱼作为低氧耐受能力极强的鱼类, 其有氧运动能力对溶氧水平的变化敏感性显著低于其它鱼类。仅于另一种低氧耐受能力极强的近缘种-金鱼的 U_{crit} 反应相似, 但后者 $MO_{2active}$ 对溶氧水平的变化敏感性显著高于鲫鱼, 说明二者在低氧下维持持续运动能力的机制可能不同, 如 Mandic 等的研究发现, 低氧或无氧条件下, 金鱼更多的通过分解肝脏糖原产生乙醇的无氧代谢途径为运动代谢及其恢复过程提供能量^[22]。而有关鲫鱼的研究发现短期低氧、运动锻炼、高温均能诱导鲫鱼鳃丝面积大量增加, 进而提高呼吸能力^[12, 21]。这可能这是其运动能力及其运动耗氧率对水体溶氧水平变化相对不敏感的原因之一。

3.3 鲫鱼的代谢模式及其对溶氧水平变动的反应

在饱和溶氧水平时, 摄食组和空腹组鲫鱼临界游泳速度和运动代谢范围均没有显著差异, 摄食消化与运动诱导的耗氧率增加完全叠加, 即两种生理功能能独立完成、互不干扰, 因此其代谢模式在常氧下为添加模式。这是因为常氧下, 鲫鱼运动和消化能力均不强, 而作为低氧耐受能力极强的物种, 鲫鱼具有较高的呼吸能力, 能完全满足消化和运动的代谢需求。如果假定消化和运动能诱导最大的代谢率, 而把摄食组的 $MO_{2active}$ 作为呼吸能力指标的话, 随着溶氧水平的下降至 1 mg/L, 其运动能力(以 U_{crit} 为指标)和消化能力(以摄食组和空腹组 $MO_{2pre-exercise}$ 比值为指标)仅下降约 30% 甚至更低, 而呼吸能力下降超过 50%。因此在低氧水平下, 需要鲫鱼同时进行消化和运动时, 呼吸能力无法满足两种生理功能同时进行, 摄食组鱼类的运动代谢范围下降, 导致游泳速度下降, 表现为消化优先模式。关于溶氧水平对鱼类代谢模式的影响发现, 溶氧水平由饱和下降到 50%, 海鲈的代谢模式由添加模式转化为运动优先模式^[9]; 而对于南方鲇当溶氧水平有饱和下降到 50%

和 12.5% 时,在半饱足摄食的条件下代谢模式分别呈现为添加模式、消化优先和运动优先^[5]。本研究发现鲫幼鱼在低氧下为摄食优先,而并非运动优先。一方面可能是因为物种之间的差异,也可能因为鲫鱼为低氧耐受能力极强的鱼类,10% 低氧尚未对其生理产生重要胁迫,进一步的低氧是否能诱导出运动优先模式还有待研究。

References:

- [1] Fu S J, Cao Z D, Xie X J. Feeding metabolism and locomotion metabolism in fishes. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 43(2): 150-159.
- [2] Xie X J, Sun R Y. Advances of the studies on the specific dynamic action in fish. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1991, 15(1): 225-231.
- [3] Priede I G. Metabolic scope in fishes//Tytler P, Calow P, eds. *Fish Energetics: New Perspectives*. London: Croom Helm, 1985: 33-641.
- [4] Fu S J, Zeng L Q, Li X M, Pang X, Cao Z D, Peng J L, Wang Y X. The behavioural, digestive and metabolic characteristics of fishes with different foraging strategies. *Journal of Experimental Biology*, 2009, 212(14): 2296-2302.
- [5] Zhang W, Cao Z D, Peng J L, Chen B J, Fu S J. The effects of dissolved oxygen level on the metabolic interaction between digestion and locomotion in juvenile southern catfish (*Silurus meridionalis* Chen). *Comparative Biochemistry and Physiology-Part A: Molecular and Integrative Physiology*, 2010, 157(3): 212-219.
- [6] Thorarensen H, Farrell A P. Postprandial intestinal blood flow, metabolic rates, and exercise in Chinook salmon (*Oncorhynchus tshawytscha*). *Physiological and Biochemical Zoology*, 2006, 79(4): 688-694.
- [7] Pang X, Cao Z D, Fu S J. The effects of temperature on metabolic interaction between digestion and locomotion in juveniles of three cyprinid fish (*Carassius auratus*, *Cyprinus carpio* and *Spinibarbus sinensis*). *Comparative Biochemistry and Physiology-Part A: Molecular and Integrative Physiology*, 2011, 159(3): 253-260.
- [8] Hicks J W, Wang T, Bennett A F. Patterns of cardiovascular and ventilatory response to elevated metabolic states in the lizard *Varanus exanthematicus*. *Journal of Experimental Biology*, 2000, 203(16): 2437-2445.
- [9] Jourdan-Pineau H, Dupont-Prinet A, Claireaux G, McKenzie D J. An investigation of metabolic prioritization in the European sea bass, *Dicentrarchus labrax*. *Physiological and Biochemical Zoology*, 2010, 83(1): 68-77.
- [10] Fu S J, Pang X, Cao Z D, Peng J L, Yang G J. The effects of fasting on the metabolic interaction between digestion and locomotion in juvenile southern catfish (*Silurus meridionalis*). *Comparative Biochemistry and Physiology-Part A: Molecular and Integrative Physiology*, 2011, 158(4): 498-505.
- [11] Li X M, Cao Z D, Peng J L, Fu S J. The effect of exercise training on the metabolic interaction between digestion and locomotion in juvenile darkbarbel catfish (*Pelteobagrus vachelli*). *Comparative Biochemistry and Physiology, Part A: Molecular and Integrative Physiology*, 2010, 156(1): 67-73.
- [12] Sollid J, de Angelis P, Gundersen K, Nilsson G E. Hypoxia induces adaptive and reversible gross morphological changes in crucian carp gills. *Journal of Experimental Biology*, 2003, 206(20): 3667-3673.
- [13] Chen B J, Cao Z D, Fu S J, Wang Y X. Temperature Effect on rest metabolic rate and hypoxia tolerance in Chinese bream *Parabramis pekinensis*. *Chinese Journal of Zoology*, 2010, 45(5): 1-8.
- [14] Lee C G, Devlin R H, Farrell A P. Swimming performance, oxygen consumption and excess post-exercise oxygen consumption in adult transgenic and ocean-ranched coho salmon. *Journal of Fish Biology*, 2003, 62(4): 753-766.
- [15] Brett J R. The respiratory metabolism and swimming performance of young sockeye salmon. *Journal of the Fisheries Research Board Canada*, 1964, 21(5): 1183-1226.
- [16] Claireaux G, Couturier C, Groison A L. Effect of temperature on maximum swimming speed and cost of transport in juvenile European sea bass (*Dicentrarchus labrax*). *Journal of Experimental Biology*, 2006, 209(17): 3420-3428.
- [17] Fu S J, Xie X J, Cao Z D. Effect of meal size on postprandial metabolic response in southern catfish (*Silurus meridionalis*). *Comparative Biochemistry and Physiology-Part A: Molecular and Integrative Physiology*, 2005, 140(4): 445-451.
- [18] Fu S J, Cao Z D, Peng J L. Effect of meal size on postprandial metabolic response in Chinese catfish (*Silurus asotus* Linnaeus). *Journal of Comparative Physiology B: Biochemical, Systemic, and Environmental Physiology*, 2006, 176(5): 489-495.
- [19] Jordon A D, Steffensen J F. Effects of ration size and hypoxia on specific dynamic action in the cod. *Physiological and Biochemical Zoology*, 2007, 80(2): 178-185.
- [20] Zhao W W, Pang X, Peng J L, Cao Z D, Fu S J. Effects of dissolved oxygen levels, exercise training and fasting on the locomotion performance in juvenile *Spinibarbus sinensis* and *Parabramis pekinensis*. *Fish Physiology and Biochemistry*, 2012, in press.
- [21] Fu S J, Brauner C J, Cao Z D, Richards J G, Peng J L, Dhillon R, Wang Y X. The effect of acclimation to hypoxia and sustained exercise on subsequent hypoxia tolerance and swimming performance in goldfish (*Carassius auratus*). *Journal of Experimental Biology*, 2011, 214(12): 2080-2088.
- [22] Mandic M, Lau G Y, Nijjar M M S, Richards J G. Metabolic recovery in goldfish: a comparison of recovery from severe hypoxia exposure and exhaustive exercise. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology and Pharmacology*, 2008, 148(4): 332-338.

参考文献:

- [1] 付世建, 曹振东, 谢小军. 鱼类摄食代谢和运动代谢研究进展. *动物学杂志*, 2008, 43(2): 150-159.
- [2] 谢小军, 孙濡泳. 鱼类的特殊动力作用的研究进展. *水生生物学报*, 1991, 15(1): 225-231.
- [13] 陈波见, 曹振东, 付世建, 王翔翔. 温度对鲮鱼静止代谢和耐低氧能力的影响. *动物学杂志*, 2010, 45(5): 1-8.

CONTENTS

Hyperspectral characteristics of typical subtropical trees at different levels of simulated acid rain	SHI Qilong, JIANG Hong, CHEN Jian, et al (5621)
Wind fields and the development of wind corridors in the urban metropolis of the Pearl River Delta	SUN Wu, WANG Yiming, WANG Yuelei, et al (5630)
Dynamics of canopy structure and understory light in montane evergreen broadleaved forest following a natural disturbance in North Guangdong	OU Yudian, SU Zhiyao (5637)
The influence of 4 species of preys on the development and fecundity of <i>Orius similis</i> Zheng	ZHANG Changrong, ZHI Junrui, MO Lifeng (5646)
Woody seedling regeneration in secondary succession of monsoon broad-leaved evergreen forest in Puer, Yunnan, Southwest China	LI Shuaifeng, LIU Wande, SU Jianrong, et al (5653)
Scale-dependent spatial variation of species abundance and richness in two mixed evergreen-deciduous broad-leaved karst forests, Southwest China	ZHANG Zhonghua, HU Gang, ZHU Jiedong, et al (5663)
The spatial heterogeneity of soil nutrients in a mid-subtropical <i>Castanopsis kawakamii</i> natural forest	SU Songjin, LIU Jinfu, HE Zhongsheng, et al (5673)
Effects of <i>Vetiveria zizanioides</i> L. growth on chemical and biological properties of copper mine tailing wastelands	XU Decong, ZHAN Jing, CHEN Zheng, et al (5683)
Effects of different irrigation regimes on characteristics of transpiring water-consumption of three desert species	SHAN Lishan, LI Yi, ZHANG Ximing, et al (5692)
The response of euhalophyte <i>Salicornia europaea</i> L. to different nitrogen forms	NIE Lingling, FENG Juanjuan, LÜ Sulian, et al (5703)
Dynamic analysis on spatial pattern of dominant tree species of cold-temperate coniferous forest in the succession process in the Pangquangou Nature Reserve	ZHANG Qindi, BI Runcheng, ZHANG Jintun, et al (5713)
Effects of AM fungi on the growth and nutrients of <i>Salvia miltiorrhiza</i> Bge. under different soil water and fertilizer conditions	HE Xueli, MA Li, MENG Jingjing, et al (5721)
The dynamics of soil respiration in a winter wheat field with plastic mulched-ridges and unmulched furrows	SHANGGUAN Yuxian, SHI Ripeng, HAN Kun, et al (5729)
Cattle dung composted by different methods had different effects on the growth and quality of soybean	GUO Liyue, LIU XueMei, ZHAN Lijie, et al (5738)
Nitrogen budget modelling at the headwaters of Urumqi River Based on the atmospheric deposition and runoff	WANG Shengjie, ZHANG Mingjun, WANG Feiteng, et al (5747)
Evaluating the ecosystem sustainability of circular agriculture based on the energy theory: a case study of the Xingyuan circular agriculture demonstration site in Fuqing City, Fujian	ZHONG Zhenmei, WENG Boqi, HUANG Qinlou, et al (5755)
Effects of cold exposure and recovery on viability and energy consumption in the sub-adult female giant spiny frogs (<i>Paa spinosa</i>)	LING Yun, SHAO Chen, XIE Zhigang, et al (5763)
A comparison of night-interruption on diapause-averting among two populations of the cotton bollworm, <i>Helicoverpa armigera</i>	CHEN Yuansheng, TU Xiaoyun, CHEN Chao, et al (5770)
Effects of soil erosion control measures on soil organic carbon and total nitrogen in a small watershed	ZHANG Yanjun, GUO Shengli, NAN Yafang, et al (5777)
Comparative analysis of Lugu Lake watershed ecosystem function under different management authorities	DONG Rencai, GOU Yaqing, LI Siyuan, et al (5786)
Relationship between fish community diversity and environmental factors in the Lianjiang River, Guangdong, China	LI Jie, LI Xinhui, JIA Xiaoping, et al (5795)
Effect of dissolved oxygen level on metabolic mode in juvenile crucian carp	ZHANG Wei, CAO Zhendong, FU Shijian (5806)
Community composition of net-phytoplankton and its relationship with the environmental factors at artificial reef area in Xiangshan Bay	JIANG Zhibing, CHEN Quanzhen, SHOU Lu, et al (5813)
Emergency appraisal on the loss of ecosystem service caused by marine reclamation: a case study in the Taozi Bay	LI Ruiqian, MENG Fanping (5825)
Assessing the visual quality of urban waterfront landscapes: the case of Hefei, China	YAO Yumin, ZHU Xiaodong, XU Yingbi, et al (5836)
Review and Monograph	
Advances in ecological genomics	SHI Yongbin, LI Junmin, JIN Zexin (5846)
Advances in studies of ecological effects of ocean acidification	WANG Siru, YIN Kedong, CAI Weijun, et al (5859)
Advances in feeding ecology of <i>Acartia</i>	HU Simin, LIU Sheng, LI Tao, et al (5870)
Research progress on ammonia-oxidizing microorganisms in estuarine ecosystem	ZHANG Qiufang, XU Jirong, SU Jianqiang, et al (5878)
Recent progress in research on neutrophilic, microaerophilic iron(II)-oxidizing bacteria	LIN Chaofeng, GONG Jun (5889)
A comparison study on primary production in typical low-latitude seas (South China Sea and Bay of Bengal)	LIU Huaxue, SONG Xingyu, HUANG Honghui, et al (5900)
Advances in leaf maximum carboxylation rate and its response to environmental factors	ZHANG Yanmin, ZHOU Guangsheng (5907)
10-years of bird habitat selection studies in mainland China: a review	JIANG Aiwu, ZHOU Fang, QIN Yue, et al (5918)
Scientific Note	
The effects of incubation temperature on embryonic metabolism and hatchling behavior in the Red-banded Snake, <i>Dinodon rufonotatum</i>	SUN Wenjia, YU Xiao, CAO Mengjie, et al (5924)
Sensitivity analysis and dynamics of soil microbial biomass carbon, nitrogen and related parameters in red-yellow soil of tea garden with different fertilization practices	WANG Limin, QIU Shanlian, LIN Xinxian, et al (5930)
Effect of fertilizers on Cd uptake of two edible amaranthus herbs	LI Ningyu, LI Zhian, ZHUANG Ping, et al (5937)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的生态学专业性高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 32 卷 第 18 期 (2012 年 9 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 18 (September, 2012)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:1000717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元