

文章编号: 1674 - 5566(2014)01 - 0117 - 06

运用稳定同位素技术研究千岛湖秋季刺网渔获物的食性和营养级

宋 固, 胡梦红, 刘其根

(上海海洋大学 农业部水产种质资源与利用重点开放实验室, 上海 201306)

摘要: 利用稳定性同位素技术,对2011年9月至11月期间利用浙江千岛湖主要渔具之一的刺网采集的渔获物开展了食物源和营养级的分析研究。结果表明,千岛湖鱼类主要食物源的 $\delta^{13}\text{C}$ 值跨度范围较大 ($-29.7\text{‰} \sim -23.9\text{‰}$),其中浮游植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值最高,颗粒有机物(POM)的 $\delta^{13}\text{C}$ 值最低。食物源的 $\delta^{15}\text{N}$ 值变化范围较小,以浮游植物最高(8.5‰),颗粒有机物最低(5.1‰)。与食物源的同位素值分布趋势相反,消费者的 $\delta^{13}\text{C}$ 值浮动范围相对较小 ($-29.7\text{‰} \sim -21.6\text{‰}$),而 $\delta^{15}\text{N}$ 值的浮动范围相对较大($5.1\text{‰} \sim 14.8\text{‰}$)。消费者的营养级从1.9到3.6,分属于3个营养等级,鱼类的营养级全部分布在第3到第4营养级之间,且与其食性特征有较好的一致性,但是两种外来种鱼类中的一种草食性鱼类团头鲂的营养级却高达3.4,而肉食性的斑点叉尾鲴的营养级则仅为3.0,说明其在千岛湖的食性均已发生了很大变化。同位素示踪方法研究的结果还表明千岛湖水体中的碳源主要是浮游植物。

研究亮点: 通过运用稳定性同位素技术首次明确了千岛湖生态系统的主要碳源为浮游植物,与通常认为的水库中外来有机质输入为主的外源性营养情况不同。其次,借助该技术也首次揭示了千岛湖两种鲴属鱼类细鳞鲴和黄尾鲴之间的食性分化,和了解了两种外来种鱼类团头鲂和斑点叉尾鲴的营养级。

关键词: 千岛湖;稳定同位素;食物源;营养级

中图分类号: S 931.1

文献标志码: A

食性研究是了解鱼类在群落中生态作用及其相互影响的重要基础。传统的食性研究主要基于胃(肠)含物分析,其优点是直观,但缺点是只能反映被采样当时的摄食状况,对空胃(肠)个体难以分析其食性,且易消化的食物种类因不易辨认而被低估等。近十多年来,一些新的手段如基于稳定性同位素和不饱和脂肪酸等的分析技术被引入到鱼类的食性分析中。PINNEGAR 和 POLUNIN^[1]等研究分析了碳氮稳定同位素在鱼类组织中不同程度的营养分馏,为运用稳定同位素研究水域生态系统奠定了基础;POST^[2]利用稳定同位素方法建模和基准物的选择等进一步优化了该技术;ZANDEN 和 RASMUSSEN^[3]成功地将稳定同位素营养分馏作用机理应用于构建水生食物网的研究中;SORENSEN 和 HOBSON^[4]等则将该技术用于研究夏威夷岛上的两侧洄游性

虾虎鱼的生活史等。在国内,ZHOU 等^[5]利用稳定同位素技术对太湖梅梁湾鲢、鳙的食性进行了研究;李忠义等^[6]利用稳定同位素方法研究了长江口和南黄海水域春季拖网渔获物的营养级;晁敏等^[7]对东海区海洋捕捞渔获物的营养级变化进行了研究。目前国内运用稳定性同位素对水库渔获物的食性研究还不多见。

此外,稳定性同位素技术还可用于分析湖泊(水库)的碳源,如 HOBSON 等^[8]将稳定同位素技术应用于大型湖泊污染物研究领域,利用其识别候鸟蛋内部的营养物质来源是内源性还是外源性问题,从而为认识湖泊的生态过程及其环境管理提供重要依据。然而目前我国国内的相关研究仍相对缺乏。

千岛湖原名新安江水库,位于浙江省淳安县境内($29^{\circ}22' \sim 29^{\circ}50' \text{N}$, $118^{\circ}34' \sim 119^{\circ}15' \text{E}$)。

收稿日期: 2013-03-25 修回日期: 2013-05-22

基金项目: 国家自然科学基金(31072218);公益性行业(农业)专项(201303056)

作者简介: 宋 固(1986—),男,硕士研究生,研究方向为水域生态学。E-mail: water4677890@163.com

通信作者: 刘其根, E-mail: qgliu@shou.edu.cn

同天然湖泊相比,水库是一种相对年轻的水体生态系统,其湖沼学和生态学特征有别于湖泊,但之前对于水库和湖泊两类水体生态系统的研究方法是基本相同的,甚至有一部分人认为水库和湖泊的本质是相同的^[9]。但近年来的研究表明,人工形成的水库同天然湖泊的水体生态系统并不一定相似^[10]。通常水库会接纳更多的地表径流,即可能接纳更多来自流域的有机质,甚至被认为是一种外源性的水体;那么作为典型深水型水库的千岛湖,其生态系统的营养过程(有机质)究竟是外源性还是内源性呢?对这个问题的不同回答,意味着对水库的不同环境管理策略。

为了更好地对千岛湖库区的水环境进行有效地管理和保护,同时也为了促进千岛湖渔业的可持续发展,近年来科技工作者对库区的水体生态系统进行了一系列的调查和研究,例如刘其根等^[11]自 2000 年起在千岛湖开展了以人工放养鲢鳙和控制凶猛鱼类为主要措施的保水渔业试验,结果表明基于非经典生物操纵的保水渔业使千岛湖食物网结构更趋合理。然而,过往的研究对鱼类的食性关系主要依赖于传统的研究手段,存在一定的局限;同时对水库的有机质主要来自流域还是湖泊自养过程产生,也没有进行过探讨,为此,本研究利用稳定同位素技术对千岛湖秋季渔获物的食性和营养级进行了分析,并对千岛湖水体的有机质来源(碳源)进行了初步分析,从而为千岛湖水体的水环境管理、保护和治理以及为渔业资源的可持续利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 样品收集

2011 年秋季(9 月中旬至 11 月中旬),对千岛湖主要生产性渔具之一的单层刺网的渔获物进行样品采集,用于其食性和营养级的分析。采集的鱼类样品主要来自于除千岛湖中心湖区(该区域为资源保护区,除鲢鳙外其他鱼类不允许捕捞)以外的其他湖区。同时,用于营养级和食物网分析还要采集千岛湖当地的蚌螺、浮游生物等相关食物源生物。蚌螺是每个季度雇佣当地渔民采集,浮游植物和浮游动物是用 13 号和 25 号浮游生物网,都是自水底至水表垂直拖网采样,颗粒有机物(POM)取的是千岛湖温跃层以上 0 m,4 m,8 m,12 m,16 m 的混合水样,用真空抽滤

泵收集至玻璃纤维膜上,所用的滤膜事先经马弗炉 450 °C 高温灼烧 3 h 去除有机碳杂质的影响。另外,收集了一些附着于湖岸岩石和湖中船体下的附着藻类。

1.2 样品的处理

所采集的鱼类样本经解剖后记录体长体重等基本数据,取其背部白色肌肉,烘干至恒重,磨粉,-20 °C 冷冻保存。蚌、螺带回实验室,静养 24 h 后,去壳取肌肉部分,经 1 mol/L HCL 酸化后,烘干至恒重,磨粉,-20 °C 冷冻保存。浮游植物和浮游动物用真空抽滤泵收集至玻璃纤维膜后,烘干至恒重,磨粉,-20 °C 冷冻保存。POM 和附着藻类样品同样烘干至恒重,磨粉,-20 °C 冷冻保存。

上述所有样品经过初步处理后,全部送至上海交通大学分析测试中心用 Vario EL III 元素分析同位素质谱联用仪(德国 Elementar 公司生产)进行碳氮同位素分析。稳定 C、N 同位素的自然丰度表示为:

$$\delta R = \frac{X_{\text{样品}} - X_{\text{标准}}}{X_{\text{标准}}} \times 10^3 (\text{‰}) \quad (1)$$

式中: R 代表 ^{13}C 或 ^{15}N , X 代表 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 或 $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ 。每个样品分析 2 次。样品分析重现精度约为 $\pm 0.2\text{‰}$ 。

1.3 数据分析

营养分馏作用导致消费者和食物之间的 $\delta^{15}\text{N}$ 值出现差异,伴随着营养级增加 $\delta^{15}\text{N}$ 值也不断增加^[12]。稳定同位素法营养级计算公式为:

$$\text{TL} = (\delta^{15}\text{N}_{\text{consumer}} - \delta^{15}\text{N}_{\text{baseline}}) / 3.4 + 2 \quad (2)$$

式中:TL 为营养级, $\delta^{15}\text{N}_{\text{consumer}}$ 为消费者的氮同位素值, $\delta^{15}\text{N}_{\text{baseline}}$ 为该生态系统中的同位素基准物的氮同位素值,本研究中选取铜锈环棱螺(*Bellamya aeruginosa*)作为基准物。3.4‰ 为消费者与其饵料间的同位素营养富集度^[13]。

数据处理用 SPSS 17.0 进行。

2 结果与分析

2.1 食物源和消费者的稳定同位素特征

在本研究中,有以下几种主要的基础食物源可用于动物的消费:水体中的颗粒有机物、浮游植物、沿岸石头和湖中浮木表面的附着藻类,其碳、氮稳定同位素测定结果如表 1 所示。各食物源的 $\delta^{13}\text{C}$ 值跨度范围较大,数值范围从 -29.7‰

到 $-23.9‰$ (图 1), 其中浮游植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值最高, 颗粒有机物(POM)的 $\delta^{13}\text{C}$ 值最低。食物源的 $\delta^{15}\text{N}$ 值变化范围较小, 以浮游植物最高($8.5‰$), 颗粒有机物最低($5.1‰$)。

主要消费者(3 种无脊椎动物和 12 种鱼类)的碳、氮稳定同位素测定结果如表 1 和图 1 所示。消费者间的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值差异明显。与食物源的同位素值分布趋势相反, 消费者的 $\delta^{13}\text{C}$ 值浮动范围相对较小($-29.7‰ \sim -21.6‰$), 而 $\delta^{15}\text{N}$

值的浮动范围相对较大($5.1‰ \sim 14.8‰$)。其中软体动物中的三角帆蚌的 $\delta^{13}\text{C}$ 最高, 颗粒有机物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值最低(图 1)。无脊椎动物 $\delta^{15}\text{N}$ 值的变化范围为 $8.8‰ \sim 10.7‰$ 。鱼类 $\delta^{15}\text{N}$ 值变化范围为 $10.1‰ \sim 14.8‰$, 其中鱼虾食性鱼类较高(表 1)。总体而言, 鱼类的 $\delta^{15}\text{N}$ 值高于无脊椎动物, 与以前文献报道的较高营养级生物的 $\delta^{15}\text{N}$ 值高于低营养级生物的结论是一致的。

表 1 千岛湖基础食物源及消费者的稳定同位素值($\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$)

Tab. 1 Stable isotope signatures ($\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$) for basal food sources and consumers in Qiandao Lake

| 种类 | $\delta^{13}\text{C}$ | | $\delta^{15}\text{N}$ | | 营养级 |
|--------------------------------------|-----------------------|-------|-----------------------|------|-----|
| | 平均值 | SD | 平均值 | SD | |
| 食物源 | | | | | |
| 颗粒有机物 POM | -29.7 | 1.7 | 5.1 | 0.7 | |
| 浮游植物 Phytoplankton | -23.9 | 0.3 | 8.5 | 0.9 | |
| 附着藻类 Periphyton | -28.4 | 0.7 | 6.8 | | |
| 无脊椎动物 | | | | | |
| 浮游动物 Zooplankton | 0.3 | -26.6 | 0.7 | 10.7 | 0.5 |
| 铜锈环棱螺 <i>Bellamya aeruginosa</i> | -22.9 | 0.1 | 9.3 | 0.1 | |
| 三角帆蚌 <i>Hyriopsis cumingii</i> | -21.6 | 0.5 | 8.8 | 1.7 | 1.9 |
| 鱼类 | | | | | |
| 鱼虾食性鱼类 | | | | | |
| 蒙古鲃 <i>Culter mongolicus</i> | -25.2 | 1.1 | 14.8 | 0.5 | 3.6 |
| 翘嘴鲃 <i>C. alburnus</i> | -24.1 | 1.1 | 14.1 | 0.8 | 3.4 |
| 青梢鲃 <i>C. dabryi</i> | -22.9 | 1.1 | 12.6 | 0.6 | 3.0 |
| 草食性鱼类 | | | | | |
| 团头鲂 <i>Megalobrama amblycephala</i> | -25.2 | | 14.1 | | 3.4 |
| 周丛生物食性鱼类 | | | | | |
| 细鳞鲴 <i>Xenocypris microlepis</i> | -25.5 | 1.6 | 11.8 | 1.6 | 2.7 |
| 黄尾鲴 <i>X. davidi</i> | -21.7 | 1.2 | 11.1 | 0.5 | 2.5 |
| 杂食性鱼类 I | | | | | |
| 大眼华鳊 <i>Sinibrama macrops</i> | -25.6 | 0.9 | 12.6 | 1.3 | 3.0 |
| 杂食性鱼类 II | | | | | |
| 斑点叉尾鲴 <i>Ictalurus punctatus</i> | -23.6 | 0.4 | 12.6 | 0.9 | 3.0 |
| 飘鱼 <i>Pseudolaubuca sinensis</i> | -24.0 | | 12.5 | | 2.9 |
| 伍氏半餐 <i>Hemiculterella</i> | -24.0 | 0.6 | 10.1 | 0.8 | 2.2 |
| 浮游生物食性鱼类 | | | | | |
| 鲢 <i>Hypophthalmichthys molitrix</i> | -24.7 | 0.5 | 10.9 | 0.1 | 2.5 |
| 鳊 <i>Aristichthys nobilis</i> | -23.9 | 0.6 | 11.6 | 0.5 | 2.7 |

注:上述分类主要参考刘其根等^[14]《千岛湖鱼类资源》,其中杂食性鱼类 I 指以水生昆虫为主要食物,兼食着生藻类、浮游动物、环节动物及软体动物等;杂食性鱼类 II 指以水草、藻类、摇蚊幼虫、水生昆虫、浮游动物、螺、湖沼股蛤、虾、小鱼为主要食物的鱼类。

2.2 消费者营养级分析

本研究以铜锈环棱螺的 $\delta^{15}\text{N}$ 值作为千岛湖生态系统中的同位素基准物进行计算, $3.4‰$ 为 $\delta^{15}\text{N}$ 营养富集度, 计算该生态系统中各消费者的营养级关系(表 1)。结果显示, 消费者的营养级从 1.9 到 3.6, 分属于 3 个营养等级, 其中以肉食

性鱼类蒙古鲃(*Culter mongolicus*) 营养级最高(3.6), 植食性软体动物三角帆蚌营养级最低(1.9)。鱼类的营养级全部分布在第 3 到第 4 营养级之间, 且与其食性特征有较好的一致性, 例如鱼虾食性的蒙古鲃营养级最高, 而主要以滤食浮游生物为主的鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)

营养级较低。值得关注的是,千岛湖中的两种最主要的浮游生物食性鱼类鲢鳙的营养级相差并不大,鳙比鲢营养级仅高了 0.2,且均在 3.0 以下,而草食性鱼类团头鲂的营养级却高达 3.4。而外来种斑点叉尾鲴的营养级为 3.0(表 1)。

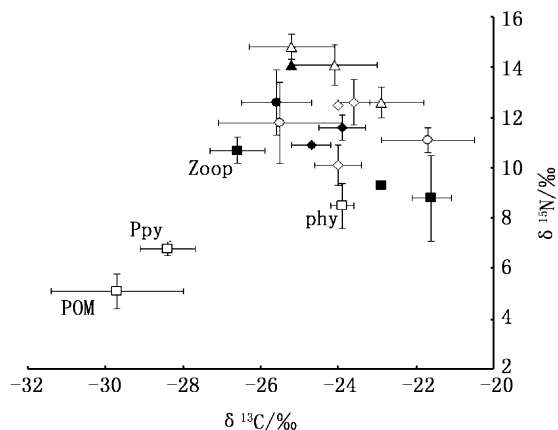


图 1 千岛湖水域生态系统中基础食物源,无脊椎动物和夏秋季主要鱼类的碳、氮稳定同位素值

Fig. 1 Stable isotope signatures ($\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$) for basal food sources, invertebrates and the summer-autumn fish samples in lake Qiandao ecosystem

■表示无脊椎动物;△表示鱼虾食性鱼类;▲表示草食性鱼类;○表示周丛生物食性鱼类;●表示杂食性鱼类 I;◇表示杂食性鱼类 II;◆表示浮游生物食性鱼类;Zoop. 浮游动物;Phy. 浮游植物;POM. 颗粒有机物;Ppy. 附着藻类。

3 讨论

3.1 千岛湖生态系统的碳稳定同位素特征分析

不同生物具有不同的同位素比值,生物的同位素比值由其食物源决定,食物源不同同位素比值也不同,从生物体不同组织器官的同位素比值也可判定该生物在长期和短期内的主要食物^[15]。湖泊水生生态系统的碳源丰富,既包括水体中的藻类、水生大型植物等,也包括河流带来的外源物质如陆地植物碎屑等。千岛湖生态系统属于中营养型深水湖泊,大型水生植物稀少,其碳源主要包括 POM、浮游植物和附着藻类(图 1)。

湖泊中的 POM 是由数量庞大、种类繁多的藻类、细菌、原生动物等生物以及底泥悬浮物和陆源颗粒物等构成的复杂混合物^[16]。3 种潜在食物源中,POM 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值最低(-29.7‰),而浮游植物(Phy)的 $\delta^{13}\text{C}$ 值最高(-23.9‰),后者比前者高出 5.8‰,表明 $\delta^{13}\text{C}$ 值更低的陆源有机物质对 POM 的组成影响较大^[17]。附着藻类和 POM 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值仅相差 1.3‰,反而与同为水生藻

类的浮游植物相差很大(4.5‰),这可能是因为在采样过程中不慎刮取到了无机碎屑等陆源性物质有关,从而导致附着藻类的 $\delta^{13}\text{C}$ 值较低。

本研究分析了 3 种无脊椎动物和 12 种鱼类的稳定同位素值,基本涵盖了千岛湖秋季主要渔具刺网上所能采取的主要渔获样品,从分析结果看,它们分布在 3 个营养级的范围,能较好地代表整个水域生态系统的生物群落组成。

从图 1 中可以看出,本研究中大多数物种均聚集在基础食物源浮游植物附近,表明浮游植物是千岛湖水体生态系统中重要的组成部分,而外源有机质对水体的食物链贡献较小。其次,该集聚也表明了以浮游植物作为食物源基础,以浮游生物食性鱼类鲢、鳙和杂食性鱼类餐条等作为中间营养层,最终将碳源传递到水体顶级营养级的翘嘴鲌等,是千岛湖食物网的主要路径,而该食物链恰恰是整个水体生态系统中最短的一条,既提高了生态效率,同时也为在该水库开展以鲢鳙为主的生物操纵(保水渔业)提供了重要的理论依据;值得注意的是,千岛湖浮游动物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值较低(-26.6‰),表明其不仅摄食了一定量的 $\delta^{13}\text{C}$ 值较高的浮游植物,可能同时也摄食了 $\delta^{13}\text{C}$ 值更低的外来有机质;同时,浮游动物分别与大眼华鳊和细鳞鲴的 $\delta^{13}\text{C}$ 值相差 1‰、1.1‰,表明其在千岛湖中可能是大眼华鳊和细鳞鲴的主要食物源^[2]。但总体而言,因为在第 1 营养级浮游植物和第 3 营养级浮游生物食性鱼类、杂食性鱼类之间没有以无脊椎动物为主的第 2 营养级生物参与碳源传递,表明了千岛湖的鲢、鳙鱼起到了最重要的中间营养连接作用。铜锈环棱螺的 $\delta^{13}\text{C}$ 值(-22.9‰)与斑点叉尾鲴和青梢鲌的 $\delta^{13}\text{C}$ 值十分接近(<1‰),可见,以底栖生物为食的斑点叉尾鲴摄食了大量铜锈环棱螺。而鱼虾食性的青梢鲌很可能与铜锈环棱螺利用了相同的食物源。三角帆蚌(*Hyriopsis cumingii*)的 $\delta^{13}\text{C}$ 值相对较高(-21.6‰),表明其很有可能以浮游植物为食。同时,周丛生物食性的黄尾鲴 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 -21.7‰,与三角帆蚌的 $\delta^{13}\text{C}$ 值十分接近,表明三角帆蚌和黄尾鲴的确都以浮游植物作为食物源。从中可以清楚地看出,过去通常认为细鳞鲴与黄尾鲴生态位相似,但本研究首次揭示了两者在千岛湖中出现了明显的生态位分化。

3.2 氮稳定同位素特征和营养级关系

蔡德陵等^[18]对崂山湾的水体生态系统食物网进行了碳稳定同位素的研究,发现从处于食物网底部的浮游植物到最高等级的肉食性鱼类存在重要的¹³C 富集作用,由同位素推断的生物营养层次位置与食性分析的结果基本一致。然而,周丛生物食性的黄尾鲮 $\delta^{13}\text{C}$ 值最高(-21.7‰),反而比鱼虾食性的蒙古鲌 $\delta^{13}\text{C}$ 值高出 3.5‰。因此,本研究不能运用 $\delta^{13}\text{C}$ 值来计算各鱼类的营养级。

利用氮稳定同位素计算各生物种的营养级已经得到公认。同位素研究中,通常要选取某种生物作为“基准”(baseline),用来评价生态系统中高营养级生物功能。基准物的选择以及基准同位素的准确性对于分析不同层次与尺度的生态学问题至关重要^[19]。本文研究的千岛湖生态系统是一个典型的半封闭性深水湖泊(水库),每年的外源性注入量很大,水体流动性相对较强,理论上对于作为初级生产者的浮游植物和初级消费者的浮游动物影响很大,计算营养位置时不采用这两者作为基准物。本研究采用千岛湖中常年存在、食性简单的底栖动物铜锈环棱螺作为基准物,实验测得铜锈环棱螺的 $\delta^{15}\text{N}$ 值为 9.3‰。营养级富集度会随着不同的环境条件变化而变化,国外文献报道不同营养级间的¹⁵N 富集度平均值为 3.4‰。本研究中,浮游动物的 $\delta^{15}\text{N}$ 值为 10.7‰,与铜锈环棱螺的 $\delta^{15}\text{N}$ 值相差 3.4‰,正好印证了 3.4‰作为千岛湖生态系统不同营养级富集度的合理性。在此基础上计算得出千岛湖中 12 种主要鱼类的营养级(表 1)。蒙古鲌、翘嘴鲌和青梢鲌属于鱼虾食性鱼类,营养等级分别为 3.6、3.4 和 3.0 处于该生态系统的高营养等级。而草食性鱼类团头鲂的营养等级也高达 3.4,表明在千岛湖生态系统中,团头鲂的主要食物源并不是水生植物,这与刘其根等^[14]肠道解剖观察到的其以湖沼股蛤为食的结果相印证。同时杂食性鱼类斑点叉尾鲷的营养级为 3.0,表明其作为外来种,目前营养级较低,主要以营养级处于 2 的底栖动物如螺类或植食性生物如虾类等为食,还没有摄食较多营养级更高的鱼类。鲢和鳙营养级分别为 2.5 和 2.7,差别不大,表明其营养生态位较接近,两者均未达 3,但又都大于 2,表明两者均同时摄食浮游动植物,且不难推断浮游动物

对鲢、鳙的食物贡献率分别在 50% 和 70%,而浮游植物对鲢鳙的贡献率分别达到 50% 和 30%。

本研究的初步结果证明利用稳定同位素方法研究千岛湖这样的中营养、开放型深水水库是有效的。同时,在外来入侵种的食性变化、有毒有害物质的生物富集、不同营养层间能量转化效率和微食物网与传统(主)食物网的耦合等一系列生态学研究前沿问题上,该方法具有相当大的潜力。随着当地生活污水、上游外源性物质的不断注入等情况的影响,千岛湖水体富营养化情况势必会越来越严重,因此,通过稳定同位素方法研究水体基础食物源、确定生物营养级以及食物链乃至食物网结构的构建对于解决千岛湖的环境问题具有重要意义。

参考文献:

- [1] PINNEGAR J K, POLUNIN N V C. Differential fractionation of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ among fish tissues: implications for the study of trophic interactions[J]. *Functional Ecology*, 1999, 13(2): 225 - 231.
- [2] POST D M. Using stable isotopes to estimate trophic position: models, methods, and assumptions[J]. *Ecology*, 2002, 83(3): 703 - 718.
- [3] Van der ZANDEN M J, RASMUSSEN J. Variation in $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{13}\text{C}$ trophic fractionation: implications for aquatic food web studies [J]. *Limnology and oceanography*, 2001, 46(8): 2061 - 2066.
- [4] SORENSEN P W, HOBSON K A. Stable isotope analysis of amphidromous Hawaiian gobies suggests their larvae spend a substantial period of time in freshwater river plumes[J]. *Environmental biology of fishes*, 2005, 74(1): 31 - 42.
- [5] ZHOU Q, XIE P, XU J, et al. Seasonal variations in stable isotope ratios of two biomanipulation fishes and seston in a large pen culture in hypereutrophic Meiliang Bay, Lake Taihu[J]. *Ecological Engineering*, 2009, 35(11): 1603 - 1609.
- [6] 李忠义, 左涛, 戴芳群, 等. 运用稳定同位素技术研究长江口及南黄海海域春季拖网渔获物的营养级[J]. *中国水产科学*, 2010, 17(1): 103 - 109.
- [7] 晁敏, 全为民, 李纯厚, 等. 东海区海洋捕捞渔获物的营养级变化研究[J]. *海洋科学*, 2005(9): 53 - 57.
- [8] HOBSON K A, HUGHES K D, EWINS P J. Using stable-isotope analysis to identify endogenous and exogenous sources of nutrients in eggs of migratory

- birds: applications to Great Lakes contaminants research[J]. *The Auk*, 1997, 114(31): 467 – 478.
- [9] HUTCHISON C E. A treatise of limnology. Vol. 1 Geography, Physics and Chemistry [M]. Wiley, New York, USA. 1957.
- [10] BAXTER R M. Environmental effects of dams and impoundments[J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1977, 8: 255 – 283.
- [11] 刘其根, 王钰博, 陈立侨, 等. 保水渔业对千岛湖食物网结构及其相互作用的影响[J]. *生态学报*, 2010, 30(10): 2774 – 2783.
- [12] MINAGAWA M, WADA E. Stepwise enrichment of $\delta^{15}\text{N}$ along food chains: Further evidence and the relation between $\delta^{15}\text{N}$ and animal age [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1984, 48(5): 1135 – 1140.
- [13] POST D M, PACE M L, HAIRSTON N G. Ecosystem size determines food-chain length in lakes [J]. *Nature*, 2000, 405(6790): 1047 – 1049.
- [14] 刘其根, 汪建敏, 何光喜, 等. 千岛湖鱼类资源 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2011.
- [15] 李忠义, 金显仕, 庄志猛, 等. 稳定同位素技术在水域生态系统研究中的应用[J]. *生态学报*, 2005, 25(11): 260 – 268.
- [16] LUNVEN M, GUILLAUD J F O, YOU N A S, et al. Nutrient and phytoplankton distribution in the Loire River plume (Bay of Biscay, France) resolved by a new Fine Scale Sampler[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2005, 65(1): 94 – 108.
- [17] KAEHLER S, PAKHOMOV E A, MCQUAID C D. Trophic structure of the marine food web at the Prince Edward Islands (Southern Ocean) determined by d^{13}C and d^{15}N analysis[J]. *Mar Ecol Prog Ser*, 2000, 208: 13 – 20.
- [18] 蔡德陵, 洪旭光, 毛兴华, 等. 崂山湾潮间带食物网结构的碳稳定同位素初步研究[J]. *海洋学报: 中文版*, 2001, 23(4): 41 – 47.
- [19] 徐军, 张敏, 谢平. 氮稳定同位素基准的可变性及对营养级评价的影响[J]. *湖泊科学*, 2010, 22(1): 8 – 20.

Study on the feeding habits and trophic levels of the gillnet catches of Qiandao Lake in autumn by stable isotope technology

SONG Gu, HU Meng-hong, LIU Qi-gen

(Key Laboratory of Aquatic Genetic Resources and Utilization, Ministry of Agriculture, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: By using stable isotope techniques, the food sources and trophic levels of catches from gillnets were analyzed from September to November, 2011 in Qiandao Lake. Results showed that $\delta^{13}\text{C}$ values of each food sources varied between -29.7‰ – -23.9‰ , among which, the highest $\delta^{13}\text{C}$ values was seen in phytoplankton, with the lowest in particulate organic matter (POM). The food sources of $\delta^{15}\text{N}$ value range is small, with the highest phytoplankton (8.5‰), the lowest particulate organic matter the lowest (5.1‰). In contrast to isotope value distribution trend of food sources, consumers of $\delta^{13}\text{C}$ values range was relatively small (-29.7‰ – -21.6‰), and then $\delta^{15}\text{N}$ range was relatively large (5.1‰ – 14.8‰). Consumers of trophic level from 1.9 to 3.6, belong to the three nutrition levels, the trophic level of fishes all distributed between the third to the fourth trophic level having good consistency with the feeding characteristics. But as an invasive species, herbivores fish *Megalobrama amblycephala* and omnivorous fish *Ictalurus punctatus* trophic level as high as 3.4 and 3.0, which indicated that feeding habits changed greatly in Qiandao Lake. Isotope tracer method research results also showed that the carbon source primarily is phytoplankton in Qiandao Lake water ecosystem.

Key words: Qiandao Lake; stable isotope; food source; trophic level