

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第32卷 第4期 Vol.32 No.4 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



生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 32 卷 第 4 期 2012 年 2 月 (半月刊)

中国科学院科学出版基金资助出版

目 次

固垦对南汇东滩湿地大型底栖动物的影响·····	马长安,徐霖林,田伟,等	(1007)
基于 ArcView-WOE 的下辽河平原地下水生态系统健康评价·····	孙才志,杨磊	(1016)
京郊典型集约化“农田-畜牧”生产系统氮素流动特征·····	侯勇,高志岭,马文奇,等	(1028)
不同辐射条件下苹果叶片净光合速率模拟·····	高照全,冯社章,张显川,等	(1037)
藏北高原典型植被样区物候变化及其对气候变化的响应·····	宋春桥,游松财,柯灵红,等	(1045)
祁连山中段林草交错带土壤水热特征及其对气象要素的响应·····	唐振兴,何志斌,刘鹄	(1056)
祁连山青海云杉林冠生态水文效应及其影响因素·····	田风霞,赵传燕,冯兆东,等	(1066)
呼伦贝尔沙地樟子松年轮生长对气候变化的响应·····	尚建勋,时忠杰,高吉喜,等	(1077)
结合激光雷达分析上海地区一次连续浮尘天气过程·····	马井会,顾松强,陈敏,等	(1085)
福建中部近海浮游动物数量分布与水团变化的关系·····	田丰歌,徐兆礼	(1097)
香港巨牡蛎和长牡蛎幼虫及稚贝的表型性状·····	张跃环,王昭萍,闫喜武,等	(1105)
东海原甲藻与中肋骨条藻的种间竞争特征·····	李慧,王江涛	(1115)
起始生物量比对 3 种海洋微藻种间竞争的影响·····	魏杰,赵文,杨为东,等	(1124)
不同磷条件下塔玛亚历山大藻氮的生态幅·····	文世勇,宋琍琍,龙华,等	(1133)
秦岭天然次生油松林冠层降雨再分配特征及延滞效应·····	陈书军,陈存根,邹伯才,等	(1142)
伊犁河谷北坡垂直分布格局及其与环境的关系——一种特殊的双峰分布格局·····	田中平,庄丽,李建贵	(1151)
濒危种四合木与其近缘种霸王水分关系参数和光合特性的比较·····	石松利,王迎春,周红兵,等	(1163)
干旱胁迫下黄土高原 4 种乡土禾草抗氧化特性·····	单长卷,韩蕊莲,梁宗锁	(1174)
施加角担子菌 B6 对连作西瓜土壤微环境和西瓜生长的影响·····	肖逸,王兴祥,王宏伟,等	(1185)
内蒙古典型草原区芨芨草群落适生境·····	张翼飞,王炜,梁存柱,等	(1193)
盐渍化灌区土壤盐分的时空变异特征及其与地下水埋深的关系·····	管孝艳,王少丽,高占义,等	(1202)
黄土高原水蚀风蚀交错区坡地土壤剖面饱和导水率空间异质性·····	刘春利,胡伟,贾宏福,等	(1211)
松嫩平原玉米带农田土壤氮密度时空格局·····	张春华,王宗明,居为民,等	(1220)
小麦冬性强弱评价体系的建立·····	王鹏,张春庆,陈化榜,等	(1230)
唐家河自然保护区高山姬鼠和中华姬鼠夏季生境选择的比较·····	黎运喜,张泽钧,孙宜然,等	(1241)
西花蓟马在 6 种蔬菜寄主上的实验种群生命表·····	曹宇,鄧军锐,孔译贤	(1249)
同位素富集-稀释法研究食性转变对鱼类不同组织 N 同位素转化率的影响·····	曾庆飞,谷孝鸿,毛志刚,等	(1257)
基于生态网络分析的南京主城区重要生态斑块识别·····	许文雯,孙翔,朱晓东,等	(1264)
珠三角城市绿地 CO ₂ 通量的季节特征·····	孙春健,王春林,申双和,等	(1273)
污染场地地下水渗流场模拟与评价——以柘城县为例·····	吴以中,朱沁园,刘宁,等	(1283)
专论与综述		
湿地退化研究进展·····	韩大勇,杨永兴,杨杨,等	(1293)
绿洲农田氮素积累与淋溶研究述评·····	杨荣,苏永中,王雪峰	(1308)
问题讨论		
抗辐射菌 <i>Deinococcus radiodurans</i> 的多样性·····	屠振力,方俐晶,王家刚	(1318)
平茬措施对柠条生理特征及土壤水分的影响·····	杨永胜,卜崇峰,高国雄	(1327)
研究简报		
祁连山典型灌丛降雨截留特征·····	刘章文,陈仁升,宋耀选,等	(1337)
野生鸭儿芹种子休眠特性及破除方法·····	喻梅,周守标,吴晓艳,等	(1347)



封面图说: 遗鸥群飞来——遗鸥意即“遗落之鸥”(几乎是最后才发现的新鸥种,因此得名)。1931年,瑞典动物学家隆伯格撰文记述在中国额济纳采到了标本。1987年,中国的鸟类学家在鄂尔多斯的桃力庙获得了一对遗鸥的标本。1990年春夏之交,发现了湖心各岛上大量的遗鸥种群。近年来的每年夏季,大约全球 90% 以上的遗鸥都会到陕西省神木县境内的沙漠淡水湖-红碱淖上聚集。遗鸥——国家一级重点保护、CITES 附录一物种。

彩图提供: 陈建伟教授 国家林业局 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201011231661

曾庆飞, 谷孝鸿, 毛志刚, 周露洪. 同位素富集-稀释法研究食性转变对鱼类不同组织 N 同位素转化率的影响. 生态学报, 2012, 32(4): 1257-1263.
Zeng Q F, Gu X H, Mao Z G, Zhou L H. Effect of diet switch on turnover rates of tissue nitrogen stable isotopes in fish based on the enrichment-dilution approach. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(4): 1257-1263.

同位素富集-稀释法研究食性转变对鱼类 不同组织 N 同位素转化率的影响

曾庆飞^{1,*}, 谷孝鸿¹, 毛志刚^{1,2}, 周露洪^{1,2}

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 稳定同位素技术广泛地用于描绘生态系统中食物网的食物来源和营养级关系, 但是消费者不同组织转化率的研究相对较少。通过锦鲤摄食人工添加¹⁵N 蓝藻的食性转化实验, 研究不同组织 N 同位素转化率的差异, 探讨组织生长和代谢对同位素转化的相对贡献, 为不同时间尺度的稳定同位素研究取样奠定基础。结果表明, 通过 42d 的加富蓝藻饲喂, 各组织的 N 稳定同位素发生显著变化。肝的 $\delta^{15}\text{N}$ 为 $(19.3 \pm 1.4)\text{‰}$, 显著高于其它组织, 其次为鱼鳍 $(15.6 \pm 1.0)\text{‰}$ 和血液 $(12.6 \pm 0.4)\text{‰}$, 肌肉的 $\delta^{15}\text{N}$ 最低, 为 $(9.9 \pm 0.7)\text{‰}$ 。在随后的同位素稀释实验中, 锦鲤的体重增加, 相对生长速率为 0.011d^{-1} , 鳍肉的转化率最快, 达到 $11.4\%/d$, 半衰期仅为 6.1d, 其次是血液和肝, 肌肉的转化率最低, 仅有 $3.8\%/d$, 半衰期最长, 为 18.4d。代谢衰减指数 c 和 -1 不存在显著差异, 表明锦鲤各组织的 N 同位素转化主要由组织生长引起。结论显示, 同位素富集-稀释法可以有效评价鱼类食性转变对不同组织同位素转化的差异, 鳍肉和血液同位素分析可以作为锦鲤食性转变快速追踪的手段。

关键词: 稳定同位素; 同位素富集-稀释法; 食性转变; 同位素转化率

Effect of diet switch on turnover rates of tissue nitrogen stable isotopes in fish based on the enrichment-dilution approach

ZENG Qingfei^{1,*}, GU Xiaohong¹, MAO Zhigang^{1,2}, ZHOU Luhong^{1,2}

1 State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China

2 Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Nitrogen stable isotopes are widely used in ecological studies to estimate trophic position and determine movement patterns, but turnover rates of isotopes in animal tissues remain poorly understood. Here, we report nitrogen isotope turnover rates in different tissues of golden carp (*Cryprinus carpioid*). Turnover rate was estimated from the dilution of a ¹⁵N label introduced into consumer tissues by feeding of ¹⁵N-enriched cyanobacteria. The $\delta^{15}\text{N}$ values of the four tissues varied significantly after a ¹⁵N enrichment diet feeding. Liver $(19.3 \pm 1.4)\text{‰}$ was significantly enriched in ¹⁵N relative to fin $(15.6 \pm 1.0)\text{‰}$ and blood $(12.6 \pm 0.4)\text{‰}$ tissues, and muscle $(9.9 \pm 0.7)\text{‰}$ had the most depleted ¹⁵N. Muscle tissue had the slowest turnover rates $(3.8\%/d)$, with half-lives of approximately 18.4d following a return to a diet with no ¹⁵N-enriched cyanobacteria addition, while the shortest half-life value for $\delta^{15}\text{N}$ was in fin tissue (6.1 d). The exponent of metabolic decay, c wasn't significantly different from -1 for $\delta^{15}\text{N}$ in all the tissues, demonstrating that growth accelerated the rate of isotopic change and caused tissue specific turnover rates. The results support that the enrichment-dilution

基金项目: 国家自然科学基金项目(30900207); 江苏省自然科学基金项目(SBK201021370); 国家重点基础研究发展计划资助项目(2008CB418104)

收稿日期: 2010-11-23; 修订日期: 2011-11-15

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zq-fly@sohu.com

approach can be properly used to assess the dietary shifts on isotopic turnover rate, and further show that fin and blood stable isotope analysis is a quick approach to track dietary switch in golden carp.

Key Words: stable isotope; the enrichment-dilution approach; diet switch; isotopic turnover rate

稳定同位素技术相对于胃含物分析可以反映鱼类等生物长时间尺度的食物来源、迁徙状况及营养级关系^[1],其原理在于所研究动物的组织同位素比值可以反映它们的食物来源。但是,同位素比值受到同位素分馏和食物在所取组织中转化率的影响^[2]。当动物的食性发生改变,特别是当两种食物的同位素比值差异较大时,必定引起动物肌体同位素比值的改变。事实上,这个变化是由两个过程引起的:对于生长速率快的动物,同位素转化率的变化主要由生长组织对原有组织同位素比值的稀释作用;对于生长较慢的生物,主要是由于摄食了新食物而引起原有组织代谢引起的^[3]。

同位素转化率受到多种因素的影响,比如鱼类种类、个体大小、食物质量、环境温度、取样时间以及同一个体不同器官组织。Guelinckx 等人通过室内食性转变实验研究了刺鳍鱼肝、心和肌肉的 C、N 同位素转化率随时间的变化,发现肌肉组织的转化率最低,C、N 稳定同位素的半衰期分别为 25d 和 28d,基本由组织生长引起的;而肝和心脏的半衰期较短,仅为 3—6d^[3]。McIntyre 和 Flecker 研究了螺、蝌蚪和鲶鱼食性转变后的 N 同位素转化率,发现鲶鱼肌肉的 N 同位素转化率随个体大小的增加而减少,鳍的转化率远远高于血液和肌肉^[4]。一般来说,肝的组织代谢速率高于肌肉和心脏^[5],仔鱼的半衰期不到一个星期,而大鱼可能要几个月^[6-7],所以不同组织的 C、N 同位素比值可以反映不同时间尺度的食性和洄游行为^[8]。

目前,国内稳定同位素技术在生态系统中的应用多表现在食物网结构的构建和关键物种食性分析。万炜等人^[9]和蔡德陵等人^[10]分别利用稳定性碳氮同位素比值构建了渤海湾和黄东海食物网营养结构图。徐军通过测定不同体长的湖鲚和邻近水域的附着藻类、螺类、河蚬的碳氮稳定同位素来研究湖鲚个体发育过程中的食性转变^[11]。王玉玉等人分析了鄱阳湖 4 个点位 95 条鱼和其他食物网成分样品的稳定同位素比值,构建了鄱阳湖枯水末期水生食物网^[12]。而同一生物不同组织同位素比值的差异,以及同位素转化率的影响因素研究还未见报道。

本文以锦鲤为研究对象,通过投饵质量的变化,探讨食性转变条件下锦鲤不同组织稳定性 N 同位素转化率的差异,判断同位素变化的原因是由组织生长引起还是由代谢引起?

1 材料与方法

1.1 实验用鱼和饲喂样品

实验用锦鲤(*Cyprinus carpio*)购自南京夫子庙观赏鱼市场,体表无伤,体质健壮,规格大小一致(体重 (10.5 ± 0.2) g,体长 (6.9 ± 0.1) cm)。蓝藻取自太湖梅梁湾,经显微镜观察,99% 为微囊藻(*Microcystis*),人工添加¹⁵N 标记的 NH₄Cl(99% ¹⁵N)无机盐,利用藻类的光合作用,对蓝藻进行 24h 培养,达到对蓝藻进行¹⁵N 标记的目的。蓝藻标记完成后,清洗,过滤,60℃ 烘干研磨备用。锦鲤饲喂的面粉购自苏果超市金陵家用面粉(南京金陵面粉有限公司)。为了便于锦鲤摄食,减少蓝藻损失,将 36g 标记蓝藻与一定量面粉均匀混合,团成锦鲤可以整口吞食的颗粒,每条锦鲤每天投饲量以占体重的 5% 为标准。

1.2 实验设计

实验开始前,锦鲤暂养在水族箱(尺寸:60cm(长)×40cm(宽)×50cm(高),水面高度距上端 15cm)2 周以适应环境,暂养期间饲喂团状面粉,投放量以正巧摄食为宜。实验设置 3 个重复和 1 个对照组,即 4 个水族箱,每个水族箱有锦鲤 12 条。实验期间部分换水,持续充氧,水源为经曝气去氯处理后的自来水,时间持续 85d,前 42d 饲喂混有加富蓝藻的面粉团,以提高锦鲤各组织的稳定性 N 同位素比值,随后饲喂纯面粉团,对照组一直饲喂纯面粉团,实验过程无锦鲤死亡。

把第 42 天作为第 0 天,分别在第 0,10,21,31 和 43 天向每个水族箱各取锦鲤 1 条解剖,取背部肌肉、肝

脏、血液和尾鳍,用去离子水清洗干净,60℃低温烘干研磨。所有样品经 Flash EA1112 元素分析仪燃烧,所得的 N₂ 气体分别送入 Finnigan MAT 公司的 Delta^{plus} advantage 型稳定同位素比值质谱计上测定,氮同位素以大气氮为参考标准,实验室的测定精度是 0.1‰。

1.3 数据处理

1.3.1 随时间变化的转化率模型

锦鲤肌肉氮稳定同位素随时间的转化率模型遵循 Tieszen 等人指数模型^[13]:

$$\delta_t = \delta_f + (\delta_i - \delta_f) \exp(-vt)$$

式中, δ_t 代表 t 时刻的各组织的同位素比值; δ_f 代表各组织同新食物达到平衡的最终同位素比值、 δ_i 代表食性转变前初始同位素比值, v 代表转化率, t 代表食性转变实验开始后的时间。

半衰期:

$$t_{1/2} = \ln(0.5) / v$$

1.3.2 随组织生长的转化率模型

锦鲤组织氮稳定同位素随组织生长的转化率模型遵循 Fry 和 Arnold^[14] 指数模型:

$$\delta_t = \delta_f + (\delta_i - \delta_f) (w_t / w_i)^c$$

式中, δ_t 代表 t 时刻的各组织的同位素比值; δ_f 代表各组织同新食物达到平衡的最终同位素比值、 δ_i 代表食性转变前初始同位素比值, w_t 代表 t 时刻锦鲤体重, w_i 代表初始锦鲤体重, c 代表代谢衰减指数。当 $c = -1$, 表明同位素转化率是由组织生长引起的; 当 $c < -1$, 表明同位素转化率是由组织代谢引起的。

相对生长速率:

$$\text{SGR} = \ln(w_t / w_i) / t$$

采用 SPSS 13.0 统计软件包中的 Compare Means 对实验数据进行单因素方差分析, 差异显著性用 post hoc Tukey's HSD 法进行多重比较; 采用 Sigma Plot 11.0 软件进行生长曲线拟合。

2 结果与分析

锦鲤肌肉、肝、鳍和血液实验前后 N 稳定同位素比值变化如表 1 所示。对照组一直饲喂纯面粉, 锦鲤各个组织 $\delta^{15}\text{N}$ 不存在显著差异, 平均为 6.5‰, 同位素分馏为 4.7‰, 略高于文献报道的 3.4‰。通过 42d 的加富蓝藻饲喂, 锦鲤各组织的 N 稳定同位素发生显著变化。肝的 $\delta^{15}\text{N}$ 为 (19.3±1.4)‰, 显著高于其它组织, 其次为鱼鳍 ((15.6±1.0)‰) 和血液 ((12.6±0.4)‰), 肌肉的 $\delta^{15}\text{N}$ ‰ 最低, 为 (9.9±0.7)‰。第 85 天实验结束时, 各组织的 $\delta^{15}\text{N}$ 没有降到和对照组一致的水平, 但是肝、鳍和血液之间的 $\delta^{15}\text{N}$ ‰ 差异不显著, 并显著高于肌肉组织 ((8.3±1.6)‰)。

表 1 同位素加富-稀释实验开始前后(月-日)锦鲤各组织同位素比值变化

Table 1 $\delta^{15}\text{N}$ values of diet, muscle, liver, fin and blood tissue in the ^{15}N enrichment-dilution experiment

组织 Tissue	锦鲤 golden carp/ $\delta^{15}\text{N}$ ‰		
	11-04	12-17	对照 CK
肌肉 Muscle	9.9±0.7D	8.3±1.6b	6.2±0.7a
肝 Liver	19.3±1.4A	11.3±1.0a	6.9±0.9a
鳍 Fin	15.6±1.0B	10.4±0.6a	6.6±0.3a
血 Blood	12.6±0.4C	10.1±1.7a	6.3±0.8a
食物 Pellet diet	47.6	1.7	1.7

平均值±标准方差($n=3$); 不同的小写字母代表差异显著($P<0.05$), 不同的大写字母代表差异极显著($P<0.01$)

锦鲤食性改变后, 各组织 N 同位素比值随时间变化如图 1 所示, 曲线拟合方程见表 2。鳍肉的 N 同位素转化率最高, 半衰期只有 6.1d, 其次是血液和肝, 分别为 13.2d 和 15.9d, 肌肉的 N 同位素转化率最低, 半衰期达到 18.4d。通过 43d 的饲喂, 锦鲤的体重增加到 1.4 倍(图 2), 相对生长率为 0.011/d。锦鲤 $\delta^{15}\text{N}$ 随组织生长呈现良好的指数关系, 判定系数 $R^2 > 0.8677$ 。由表 3 和图 3 可见, 代谢衰减指数 c 和 -1 不存在显著差异, 说明各组织的 N 同位素转化率主要由生长引起的。

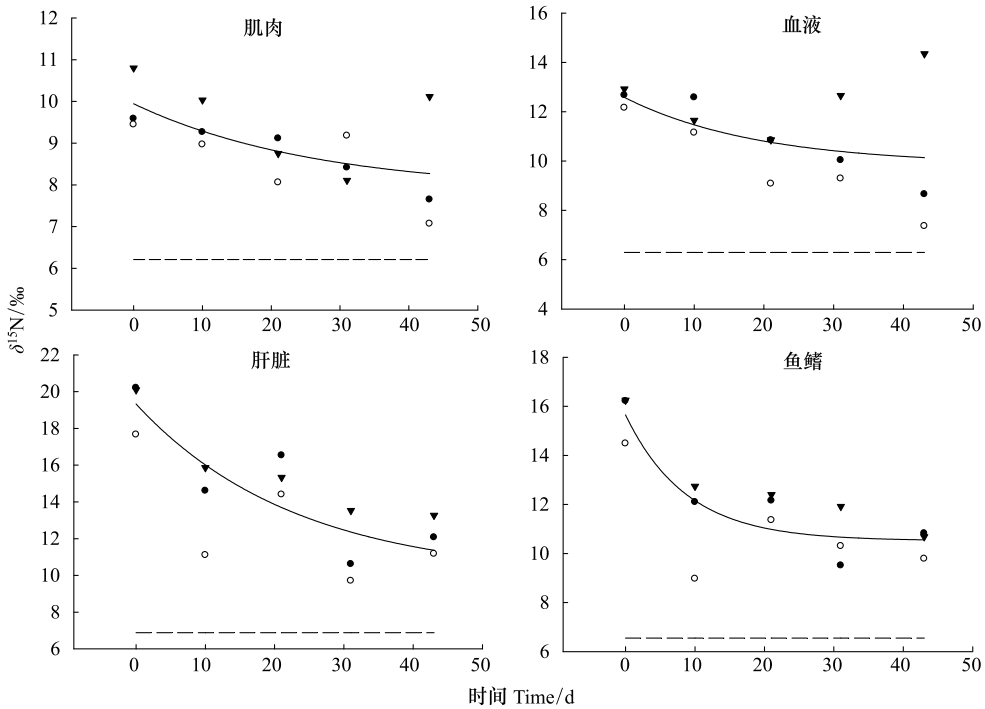


图1 锦鲤肌肉、肝、鳍和血液 $\delta^{15}\text{N}$ 随时间的变化

Fig. 1 Changes in $\delta^{15}\text{N}$ as a function of time (t) for muscle, liver, fin and blood

实线代表 $\delta_t = \delta_f + (\delta_i - \delta_f) \exp(-\lambda t)$ 拟合方程曲线, 虚线代表锦鲤各组织与所摄食物达到同位素平衡的比值

表2 锦鲤各组织 $\delta^{15}\text{N}$ 随时间的拟合方程及同位素转化半衰期

Table 2 Exponential turnover models describing tissue ^{15}N data as a function of time (t)

组织 Tissue	拟合方程 Equation for $\delta^{15}\text{N}(t)$	判定系数 R^2	半衰期 $t_{1/2}$
肌肉 muscle	$7.584 + 2.0901^{-0.0376t}$	0.9746	18.4
肝脏 liver	$9.9044 + 9.4241^{-0.0434t}$	0.9777	15.9
鱼鳍 fin	$10.520 + 5.1291^{-0.1143t}$	0.9891	6.1
血液 blood	$9.584 + 2.7291^{-0.0525t}$	0.9057	13.2

3 讨论

动物各组织的同位素比值反映的是肌体代谢、生长、蛋白质物质组成、同位素路径和食物来源共同作用的结果。所以,高代谢率的组织较低代谢率的组织更能较快的反映同位素比值的变化,从而反馈出动物近期的摄食状况。Tieszen 等人第一次用同位素转化率来解释不同组织同位素比值的差异,认为长爪沙鼠不同组织碳同位素比值的差异与其转化率不同有关^[13]。Hobson 和 Clark 的鸟类摄食实验也证实了这一观点^[15]。所以,普遍认为恒温动物不同组织和器官的同位素转化率差异很大,而对于冷血动物却没有明确的定论。Hesslein 等人的研究结果显示宽鼻白鲑肝脏和肌肉的 C、N、S 转化率相似,所以他认为鱼类不会像恒温动物一样存在各组织转化率的显著差异^[16]。这个观点得到 Herzka 和

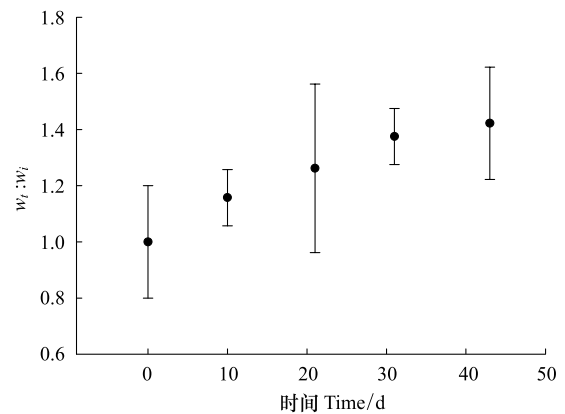


图2 同位素加富-稀释实验锦鲤 $w_t:w_i$ 随时间的变化

Fig. 2 Average (\pm SD) change in biomass, expressed as $w_t:w_i$ for fish following a return to a diet with no ^{15}N -enriched cyanobacteria addition on experiment day 0

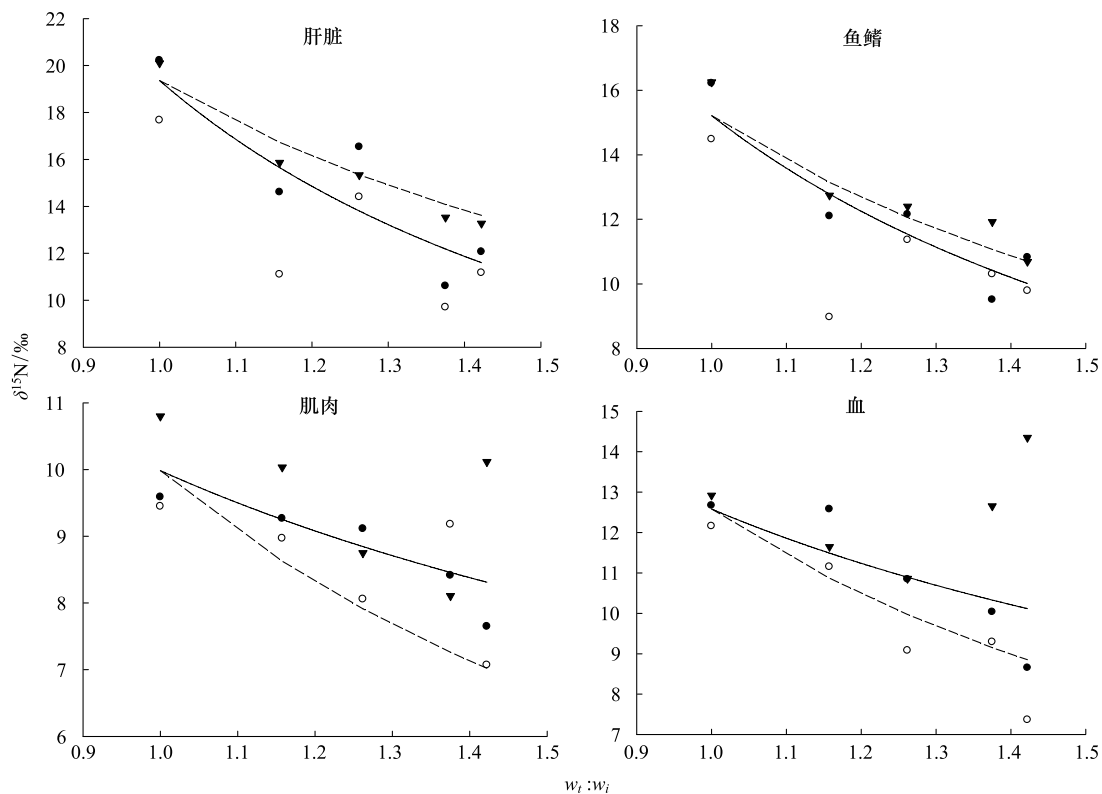


图3 锦鲤肌肉、肝、鳍和血液 $\delta^{15}\text{N}$ 随 $w_i:w_i$ 的变化

Fig. 3 Changes in $\delta^{15}\text{N}$ as a function of biomass ($w_i:w_i$) for muscle, liver, fin and blood

实线: $\delta_i = \delta_f + (\delta_i - \delta_f) (w_i/w_i)^c$ 拟合方程曲线, 虚线: 当代谢衰减指数为-1 时锦鲤各组织 $\delta^{15}\text{N}$ 随 $w_i:w_i$ 的拟合曲线变化

Holt 的支持,他认为恒温动物较冷血动物有较高的基础代谢,从而导致较高的组织转化率,而这种情况在冷血动物没有发现^[17]。但近年来随着研究的深入,MacNeil 等人发现黄豹鱼不同组织同位素水平的差异是由各组织转化率不同引起的,认为肝脏 $\delta^{15}\text{N}$ 转化率是肌肉的两倍,软骨组织最低^[18]。Logan 等人通过盐沼底鳉的食性转化实验发现,由于组织代谢的差异,肝脏的转化率显著高于肌肉,建议据此研究不同时间尺度上鱼类的迁徙和营养级^[8]。通过本研究的同位素加富-稀释实验,发现锦鲤各组织 N 同位素转化率的大小为:鳍>血>肝>肌肉,其中鱼鳍的最高,这可能与粘膜较强的再生能力有关^[19]。

表3 锦鲤各组织 $\delta^{15}\text{N}$ 随 $w_i:w_i$ 的拟合方程及同位素代谢衰减指数

Table 3 Exponential turnover models describing tissue ^{15}N data as a function of $w_i:w_i$

组织 Tissue	拟合曲线 Equation for $\delta^{15}\text{N}(w_i:w_i)$	判定系数 R^2	代谢衰减指数 c
肌肉 Muscle	$9.98 (w_i/w_i)^{-0.5206}$	0.9550	- 0.5206
肝脏 Liver	$- 21.42 + 40.75 (w_i/w_i)^{-0.6105}$	0.9893	- 0.6105
鱼鳍 Fin	$- 8.79 \times 10^{-8} + 15.65 (w_i/w_i)^{-1.2921}$	0.9278	- 1.2921
血液 Blood	$- 7.14 \times 10^{-10} + 12.58 (w_i/w_i)^{-0.6188}$	0.8677	- 0.6188

锦鲤摄食加富的蓝藻后,各组织 N 同位素比值存在显著差异,其中肝脏最高。各组织 $\delta^{15}\text{N}$ 的差异多半是由于氨基酸相对含量不同引起的,肝脏所含的必需氨基酸较多。事实上,必需氨基酸被吸收和同化基本很少引起 N 同位素比值的变化。但是,当氨基酸重新分解或合成,根据物质转化路径的差异就会引起 $\delta^{15}\text{N}$ 不同程度的变化,即通常所说的二次分馏^[20]。另一方面,不同组织同位素比值的差异可以反映同位素路径的不同,也就是说食物的营养物质随着不同的路径被分配到特定的组织。所以,组织同位素比值反映的是它所合成的物质的同位素特征,而不是整个食物^[21]。新吸收的营养被用于有机体的合成代谢或是替代退化组织,从而引

起机体生长和组织代谢^[22]。生长快的组织较生长慢的具有较高的碳氮转化率和低的半衰期,但会随着不同的生长阶段而变化^[5]。血浆有较快的周转速率,所以通常认为有较快的转化率^[23]。但在 McIntyre 和 Flecker 的研究中,实验小鱼血液和肌肉的 N 转化率差异不大,他认为可能与食物来源的氮在整个血液复杂的运行路径有关^[4]。事实上,同位素转化率的变化主要由组织生长和代谢活动两种原因引起。Guelinckx 等人认为对于生长较快或者发育早期的鱼类,代谢活动对同位素转化率的影响可以忽略^[3]。本实验中,锦鲤通过 43d 的饲喂,其体重增加到 1.4 倍,代谢衰减指数 c 和 -1 不存在显著差异,可见锦鲤各组织的 N 同位素转化主要由组织生长引起,代谢活动可以忽略。

相当的研究用标记的初级生产者来追踪初级消费者的摄食行为^[4, 24],或者再进一步追踪次级消费者^[25]。短期的同位素富集可以使摄食者快速标记从而缩短同位素平衡的时间,这种方法有利于转化率较慢生物的研究^[4]。自然丰度食物转变需要很长的时间达到同位素平衡^[16],或者是利用假设的同位素分馏来估算消费者在摄食新食物后的同位素比值^[26]。本文用加富的蓝藻饲喂锦鲤,放大各组织 N 同位素比值的差异。研究发现,经过 42d 的摄食,各组织的 N 同位素比值存在显著差异。随后停止饲喂蓝藻,改为纯面粉,由此研究锦鲤食性改变所引起的各个组织同位素转化率的差异。这样极大缩短了蓝藻来源的 N 在面粉-藻-面粉食性转变过程中平衡所需要的时间。

用这种方法测定的同位素转化率最大的挑战就是获得加富一致的实验动物。McIntyre 和 Flecker^[4]用加富的附着藻类饲喂鲶鱼,发现不同体长的鲶鱼经过一定时间的摄食其肌肉的同位素比值存在差异,所以他指出需要通过增加重复来减少因体长差异而产生的影响。在本研究中,尽量选择规格大小一致的鱼类,体重差异不大于 0.2g,体长差异不大于 0.1cm。除了体长,摄食或吸收率的差异均会放大同种生物短期的加富结果。同时,作为被加富的初级生产者由于组成复杂而引起的同位素比值差异同样会增加初级消费者加富结果的差异。消除这一影响,需要保证个体获得比例一致的加富食物,或者是延长加富时间,减少短期随机摄食的差异^[4]。在本研究中,标记的蓝藻经研磨和面粉均匀混合,减少了标记食物的差异。另一方面,为了消除摄食后个体同位素比值的差异,可以通过个体连续非致命取样来实现。从而描绘出个体水平的稀释曲线从而计算转化率,不同个体的平行取样又可以统计出群体水平的转化率。鳍和血液适合鱼类的连续取样,肌肉也可以用于非致命的活体取样^[27]。但是,连续的肌肉取样对于螺、蜗牛和小鱼等小型动物是不适合的。

通过同位素富集-稀释法得到的转化率和由传统食性转变计算出来的略有不同^[4],以天然食物和摄食效率为基础的转化率较实验室人为条件更能反映真实情况。但是,同位素富集-稀释法让我们了解到鱼类各个组织转化率的差异,在今后的食物网研究中,单纯的肌肉取样是有待商榷的。特别是短期的食性转变,例如蓝藻爆发,对于滤食性鱼类会被动摄食。如果还是传统的 2—3 个月肌肉取样,可能错过鱼类短期的食性变化。通常肝脏、血液和鳍的半衰期较短,最短的不到 10d。如果适时地合理取样,就可能最大限度的掌握鱼类摄食行为动态,提高稳定同位素分析的精确性^[18]。

References:

- [1] Peterson B J, Fry B. Stable isotopes in ecosystem studies. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1987, 18: 293-320.
- [2] MacAvoy S E, Macko S A, Garman G C. Isotopic turnover in aquatic predators: quantifying the exploitation of migratory prey. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2001, 58(5): 923-932.
- [3] Guelinckx J, Maes J, van Den Driessche P, Geysen B, Dehairs F, Ollevier F. Changes in $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ in different tissues of juvenile sand goby *Pomatoschistus minutus*: a laboratory diet-switch experiment. *Marine Ecology Progress Series*, 2007, 341: 205-215.
- [4] McIntyre P B, Flecker A S. Rapid turnover of tissue nitrogen of primary consumers in tropical freshwaters. *Oecologia*, 2006, 148(1): 12-21.
- [5] MacAvoy S E, Macko S A, Arneson L S. Growth versus metabolic tissue replacement in mouse tissues determined by stable carbon and nitrogen isotope analysis. *Canadian Journal of Zoology*, 2005, 83(5): 631-641.
- [6] Harvey C J, Hanson P C, Essington T E, Brown P B, Kitchell J F. Using bioenergetics models to predict stable isotope ratios in fishes. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2002, 59(1): 115-124.
- [7] Witting D A, Chambers R C, Bosley K L, Wainright S C. Experimental evaluation of ontogenetic diet transitions in summer flounder (*Paralichthys*

- dentatus), using stable isotopes as diet tracers. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2005, 61(11): 2069-2084.
- [8] Logan J M, Haas H L, Deegan L A, Gaines E F. Turnover rates of nitrogen stable isotopes in the salt marsh mummichog, *Fundulus heteroclitus*, following a laboratory diet switch. *Oecologia*, 2006, 147(3): 391-395.
- [9] Wan W, Hu J Y, An L H, An W, Yang M, Ito G M, Hattori D Y, 伊藤光明, 服部达也, Tao S. Food web structure in Bohai Bay revealed by stable isotope. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(7): 708-712.
- [10] Cai D L, Li H Y, Tang Q S, Sun Y. Food web structure in Yellow Sea and East China Sea: a stable isotope approach. *Science in China Series C: Life Sciences*, 2005, 35(2): 123-130.
- [11] Xu J. *Ecological Studies on the Food Web Structures and Trophic Relationships of Freshwater Lakes in China Using Stable Carbon and Nitrogen Isotopes*. Wuhan: Institute of Hydrobiology, CAS, 2005: 49-56.
- [12] Wang Y Y, Yu X B, Zhang L, Xu J. Food web structure of Poyang Lake during the dry season by stable carbon and nitrogen isotopes analysis. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(3): 1181-1188.
- [13] Tieszen L L, Boutton T W, Tesdahl K G, Slade N A. Fractionation and turnover of stable carbon isotopes in animal tissues: implications for $\delta^{13}\text{C}$ analysis of diet. *Oecologia*, 1983, 57(1/2): 32-37.
- [14] Fry B, Arnold C. Rapid $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ turnover during growth of brown shrimp (*Penaeus aztecus*). *Oecologia*, 1982, 54(2): 200-204.
- [15] Hobson K A, Clark R G. Assessing avian diets using stable isotopes 1. Turnover of ^{13}C in tissues. *Condor*, 1992, 94(1): 181-188.
- [16] Hesslein R H, Hallard K A, Ramlal P. Replacement of sulfur, carbon and nitrogen in tissue of growing broad whitefish (*Coregonus nasus*) in response to a change in diet traced by $\delta^{34}\text{S}$, $\delta^{13}\text{C}$, and $\delta^{15}\text{N}$. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1993, 50(10): 2071-2076.
- [17] Herzka S Z, Holt G J. Changes in isotopic composition of red drum (*Sciaenops ocellatus*) larvae in response to dietary shifts: potential applications to settlement studies. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2000, 57(1): 137-147.
- [18] MacNeil M A, Skomal G B, Fisk A T. Stable isotopes from multiple tissues reveal diet switching in sharks. *Marine Ecology Progress Series*, 2005, 302: 199-206.
- [19] Schmidt O, Scrimgeour C M, Curry J P. Carbon and nitrogen stable isotope ratios in body tissue and mucus of feeding and fasting earthworms. *Oecologia*, 1999, 118(1): 9-15.
- [20] 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. *Functional Ecology*, 1999, 13(2): 225-231.
- [21] Gannes L Z C, O'Brien D M, Martínez Del Rio C. Stable isotopes in animal ecology: assumptions, caveats, and a call for more laboratory experiments. *Ecology*, 1997, 78(4): 1271-1276.
- [22] Gamboa-Delgado J, Cañavate J P, Zerolo R, Le Vay L. Natural carbon stable isotope ratios as indicators of the relative contribution of live and inert diets to growth in larval Senegalese sole (*Solea senegalensis*). *Aquaculture*, 2008, 280(1/4): 190-197.
- [23] Pearson S F, Levey D J, Greenberg C H, Martínez del Rio C. Effects of elemental composition on the incorporation of dietary nitrogen and carbon signatures in an omnivorous songbird. *Oecologia*, 2003, 135(4): 516-523.
- [24] Kemp P F, Newell S Y, Hopkinson C S. Importance of grazing on the salt-marsh grass *Spartina alterniflora* to nitrogen turnover in a macrofaunal consumer, *Littorina irrorata*, and to decomposition of standing-dead *Spartina*. *Marine Biology*, 1990, 104(2): 311-319.
- [25] Steffan S A, Daane K M, Mahr D L. ^{15}N -enrichment of plant tissue to mark phytophagous insects, parasitoids, and flower-visiting entomophaga. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 2001, 98(2): 173-180.
- [26] Frazer T K, Ross R M, Quetin L B, Montoya J P. Turnover of carbon and nitrogen during growth of larval krill, *Euphausia superba* Dana: a stable isotope approach. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 1997, 212(2): 259-275.
- [27] Baker R F, Blanchfield P J, Paterson M J, Flett R J, Wesson L. Evaluation of nonlethal methods for the analysis of mercury in fish tissue. *Transactions of American Fisheries Society*, 2004, 133(3): 568-576.

参考文献:

- [9] 万炜, 胡建英, 安立会, 安伟, 杨敏, 伊藤光明, 服部达也, 陶澍. 利用稳定氮和碳同位素分析渤海湾食物网主要生物种的营养层次. *科学通报*, 2005, 50(7): 708-712.
- [10] 蔡德陵, 李红燕, 唐启升, 孙耀. 黄东海生态系统食物网连续营养谱的建立: 来自碳氮稳定同位素方法的结果. *中国科学 C 辑: 生命科学*, 2005, 35(2): 123-130.
- [11] 徐军. 应用碳、氮稳定性同位素探讨淡水湖泊的食物网结构和营养级关系. 武汉: 中科院水生生物研究所, 2005: 49-56.
- [12] 王玉玉, 于秀波, 张亮, 徐军. 应用碳、氮稳定性同位素研究鄱阳湖枯水末期水生食物网结构. *生态学报*, 2009, 29(3): 1181-1188.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 32, No. 4 February, 2012 (Semimonthly)
CONTENTS

- The influence of a reclamation project on the macrobenthos of an East Nanhui tidal flat MA Changan, XU Linlin, TIAN Wei, et al (1007)
- Ecological health assessment of groundwater in the lower Liaohe River Plain using an ArcView-WOE technique SUN Caizhi, YANG Lei (1016)
- Nitrogen flows in intensive “crop-livestock” production systems typically for the peri-urban area of Beijing HOU Yong, GAO Zhiling, MA Wenqi, et al (1028)
- The simulation of leaf net photosynthetic rates in different radiation in apple canopy GAO Zhaoquan, FENG Shezhang, ZHANG Xianchuan, et al (1037)
- Phenological variation of typical vegetation types in northern Tibet and its response to climate changes SONG Chunqiao, YOU Songcai, KE Linghong, et al (1045)
- Soil moisture and temperature characteristics of forest-grassland ecotone in middle Qilian Mountains and the responses to meteorological factors TANG Zhenxing, HE Zhibin, LIU Hu (1056)
- Eco-hydrological effects of Qinghai spruce (*Picea crassifolia*) canopy and its influence factors in the Qilian Mountains TIAN Fengxia, ZHAO Chuanyan, FENG Zhaodong, et al (1066)
- Response of tree-ring width of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* to climate change in Hulunbuir sand land, China SHANG Jianxun, SHI Zhongjie, GAO Jixi, et al (1077)
- Analysis of a dust case using lidar in Shanghai MA Jinghui, GU Songqiang, CHEN Min, et al (1085)
- Relating the distribution of zooplankton abundance in the coastal waters of central Fujian Province to the seasonal variation of water masses TIAN Fengge, XU Zhaoli (1097)
- Phenotypic traits of both larvae and juvenile *Crasstrea hongkongensis* and *C. gigas* ZHANG Yuehuan, WANG Zhaoping, YAN Xiwu, et al (1105)
- Inter-specific competition between *Prorocentrum donghaiense* and *Skeletonema costatum* LI Hui, WANG Jiangtao (1115)
- Effects of initial biomass ratio on the interspecific competition outcome between three marine microalgae species WEI Jie, ZHAO Wen, YANG Weidong, et al (1124)
- On the ecological amplitude of nitrate of *Alexandrium tamarense* at different initial phosphate concentrations in laboratory cultures WEN Shiyong, SONG Lili, LONG Hua, et al (1133)
- Time lag effects and rainfall redistribution traits of the canopy of natural secondary *Pinus tabulaeformis* on precipitation in the Qinling Mountains, China CHEN Shujun, CHEN Cungen, ZOU Bocai, et al (1142)
- The vertical distribution of vegetation patterns and its relationship with environment factors at the northern slope of Ili River Valley: a bimodal distribution pattern TIAN Zhongping, ZHUANG Li, LI Jianguo (1151)
- Comparative analysis of water related parameters and photosynthetic characteristics in the endangered plant *Tetraena mongolica* Maxim. and the closely related *Zygophyllum xanthoxylon* (Bunge) Maxim. SHI Songli, WANG Yingchun, ZHOU Hongbing, et al (1163)
- Antioxidant properties of four native grasses in Loess Plateau under drought stress SHAN Changjuan, HAN Ruilian, LIANG Zongsuo (1174)
- The effects of the addition of *Ceratobasidium stevensii* B6 and its growth on the soil microflora at a continuously cropped water-melon (*Citrullus lanatus*) site in China XIAO Yi, WANG Xingxiang, WANG Hongwei, et al (1185)
- Suitable habitat for the *Achnatherum splendens* community in typical steppe region of Inner Mongolia ZHANG Yifei, WANG Wei, LIANG Cunzhu, et al (1193)
- Spatio-temporal variability of soil salinity and its relationship with the depth to groundwater in salinization irrigation district GUAN Xiaoyan, WANG Shaoli, GAO Zhanyi, et al (1202)
- Spatial heterogeneity of soil saturated hydraulic conductivity on a slope of the wind-water erosion crisscross region on the Loess Plateau LIU Chunli, HU Wei, JIA Hongfu, et al (1211)
- Spatial and temporal variations of total nitrogen density in agricultural soils of the Songnen Plain Maize Belt ZHANG Chunhua, WANG Zongming, JU Weimin, et al (1220)
- The evaluation system of strength of winteriness in wheat WANG Peng, ZHANG Chunqing, CHEN Huabang, et al (1230)
- A comparison of summer habitats selected by sympatric *Apodemus chevrieri* and *Apodemus draco* in Tiangjiahe Nature Reserve, China LI Yunxi, ZHANG Zejun, SUN Yiran, et al (1241)
- Life tables for experimental populations of *Frankliniella occidentalis* on 6 vegetable host plants CAO Yu, ZHI Junrui, KONG Yixian (1249)
- Effect of diet switch on turnover rates of tissue nitrogen stable isotopes in fish based on the enrichment-dilution approach ZENG Qingfei, GU Xiaohong, MAO Zhigang, et al (1257)
- Recognition of important ecological nodes based on ecological networks analysis: A case study of urban district of Nanjing XU Wenwen, SUN Xiang, ZHU Xiaodong, et al (1264)
- Seasonal characteristics of CO₂ fluxes above urban green space in the Pearl River Delta, China SUN Chunjian, WANG Chunlin, SHEN Shuanghe, et al (1273)
- Simulation and evaluation of groundwater seepage in contaminated sites: case study of TuoCheng County WU Yizhong, ZHU Qinyuan, LIU Ning, LU Genfa, DAI Mingzhoet al (1283)
- Review and Monograph**
- Recent advances in wetland degradation research HAN Dayong, YANG Yongxing, YANG Yang, LI Ke (1293)
- A review concerning nitrogen accumulation and leaching in agro-ecosystems of oasis YANG Rong, SU Yongzhong, WANG Xuefeng (1308)
- Discussion**
- The diversity of the radio-resistant bacteria *Deinococcus radiodurans* TU Zhenli, FANG Lijing, WANG Jiagang (1318)
- Effect of pruning measure on physiology character and soil waters of *Caragana korshinskii* YANG Yongsheng, BU Chongfeng, GAO Guoxiong (1327)
- Scientific Note**
- Characteristics of rainfall interception for four typical shrubs in Qilian Mountain LIU Zhangwen, CHEN Rensheng, SONG Yaoxuan, et al (1337)
- Dormancy break approaches and property of dormant seeds of wild *Cryptotaenia japonica* YU Mei, ZHOU Shoubiao, WU Xiaoyan, et al (1347)

《生态学报》2012 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的自然科学高级学术期刊,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,280 页,国内定价 70 元/册,全年定价 1680 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 4 期 (2012 年 2 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 4 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:100071	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:100071 电话:(010)64034563 E-mail: journal@espg.net	Distributed by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel: (010)64034563 E-mail: journal@espg.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