

ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q

# 生态学报

## Acta Ecologica Sinica



第 33 卷 第 15 期 Vol.33 No.15 **2013**

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 33 卷 第 15 期 2013 年 8 月 (半月刊)

## 目 次

### 前沿理论与学科综述

- 红树林生态系统遥感监测研究进展..... 孙永光,赵冬至,郭文永,等 (4523)
- 基于能值分析方法的都市代谢过程研究——理论与方法 ..... 刘耕源,杨志峰,陈 彬 (4539)
- 关于生态文明建设与评价的理论思考 ..... 赵景柱 (4552)

### 个体与基础生态

- 长江口及邻近海域秋冬季小型底栖动物类群组成与分布..... 于婷婷,徐奎栋 (4556)
- 灌河口邻近海域春季浮游植物的生态分布及其营养盐限制..... 方 涛,贺心然,冯志华,等 (4567)
- 春季海南岛近岸海域尿素与浮游生物的脲酶活性..... 黄凯旋,张云,欧林坚,等 (4575)
- 模拟酸雨对蒙古栎幼苗生长和根系伤流量的影响..... 梁晓琴,刘 建,丁文娟,等 (4583)
- 有机酸类化感物质对甜瓜的化感效应..... 张志忠,孙志浩,陈文辉,等 (4591)
- 稻田土壤氧化态有机碳组分变化及其与甲烷排放的关联性..... 吴家梅,纪雄辉,霍莲杰,等 (4599)
- 双氰胺单次配施和连续配施的土壤氮素形态和蔬菜硝酸盐累积变化..... 王煌平,张 青,翁伯琦,等 (4608)
- 不同类型土壤中分枝杆菌噬菌体分离率的比较..... 徐凤宇,苏胜兵,马红霞,等 (4616)
- 模拟酸雨对小麦产量及籽粒蛋白质和淀粉含量及组分的影响 ..... 卞雅姣,黄 洁,孙其松,等 (4623)
- 麻花秦艽种子休眠机理及其破除方法 ..... 李兵兵,魏小红,徐 严 (4631)
- 4 种金色叶树木对 SO<sub>2</sub> 胁迫的生理响应 ..... 种培芳,苏世平 (4639)
- 硫丹及其主要代谢产物对紫色土中酶活性的影响..... 熊佰炼,张进忠,代 娟,等 (4649)

### 种群、群落和生态系统

- 群落水平食物网能流季节演替特征..... 徐 军,周 琼,温周瑞,等 (4658)
- 千岛湖岛屿社鼠的种群数量动态特征..... 张 旭,鲍毅新,刘 军,等 (4665)
- 黄土丘陵沟壑区不同植被区土壤生态化学计量特征..... 朱秋莲,邢肖毅,张 宏,等 (4674)
- 青藏高原高寒草甸退化与人工恢复过程中植物群落的繁殖适应对策..... 李媛媛,董世魁,朱 磊,等 (4683)
- 杉木人工林土壤质量演变过程中土壤微生物群落结构变化..... 刘 丽,徐明恺,汪思龙,等 (4692)
- 不同玉米品种(系)对玉米蚜生长发育和种群增长的影响 ..... 赵 曼,郭线茹,李为争,等 (4707)
- 伏牛山自然保护区森林冠层结构对林下植被特征的影响..... 卢训令,丁圣彦,游 莉,等 (4715)
- 内蒙古武川县农田退耕还草对粪金龟子群落的影响 ..... 刘 伟,门丽娜,刘新民 (4724)
- 铜和营养缺失对海州香薷两个种群生长、耐性及矿质营养吸收的差异影响 .....  
..... 柯文山,陈世俭,熊治廷,等 (4737)
- 新疆喀纳斯国家自然保护区植被叶面积指数观测与遥感估算..... 咎 梅,李登秋,居为民,等 (4744)

## 景观、区域和全球生态

- 基于 LUCC 的生态系统服务空间化研究——以张掖市甘州区为例…… 梁友嘉,徐中民,钟方雷,等 (4758)
- 人工管理和自然驱动下盐城海滨湿地互花米草沼泽演变及空间差异 …… 张华兵,刘红玉,侯明行 (4767)
- 基于 PCA 的滇西北高原纳帕海湿地退化过程分析及其评价 …… 尚文,杨永兴,韩大勇 (4776)
- 基于遥感和地理信息系统的图们江地区生态安全评价…… 南颖,吉喆,冯恒栋,等 (4790)
- 呼中林区森林景观的历史变域模拟及评价…… 吴志丰,李月辉,布仁仓,等 (4799)
- 降水时间对内蒙古温带草原地上净初级生产力的影响…… 郭群,胡中民,李轩然,等 (4808)

## 研究简报

- 我国中东部不同气候带成熟林凋落物生产和分解及其与环境因子的关系……  
…… 王健健,王永吉,来利明,等 (4818)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q \* 1981 \* m \* 16 \* 304 \* zh \* P \* ¥90.00 \* 1510 \* 32 \* 2013-08



**封面图说:**石质山区的退耕还林——桂西北地区是我国喀斯特集中分布的地区之一,这里的石漠化不仅造成土地退化、土壤资源逐步消失、干旱缺水和土地生产力下降,而且还导致生态系统退化和植被消亡。桂西北严重的地质生态环境问题,威胁着当地居民的基本生存,严重制约了当地社会经济的发展。增加植被覆盖是防治石漠化的重要举措。随着国家退耕还林、生态移民等治理措施的实施,区域植被碳密度显著增加,生态环境有所好转。图为喀斯特地区农民见缝插针用来耕种的鸡窝地(指小、碎、分散的土地),已经退耕还林了。

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



DOI: 10.5846/stxb201205130700

徐军,周琼,温周瑞,谢平. 群落水平食物网能流季节演替特征. 生态学报, 2013, 33(15): 4658-4664.

Xu J, Zhou Q, Wen Z R, Xie P. Seasonal dynamics of food web energy pathways at the community-level. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(15): 4658-4664.

## 群落水平食物网能流季节演替特征

徐 军<sup>1,\*</sup>, 周 琼<sup>2</sup>, 温周瑞<sup>3</sup>, 谢 平<sup>1</sup>

(1. 中国科学院水生生物研究所, 武汉 430072; 2. 华中农业大学水产学院, 武汉 430070;  
3. 湖北省水产科学研究所, 武汉 430071)

**摘要:** 稳定碳、氮同位素比值分析技术是研究生态系统中物质循环与能量流动的有效技术。 $\delta^{13}\text{C}$  可以用来判断食物网中不同生物的能量来源; $\delta^{15}\text{N}$  主要用于确定生物在食物网中所处的营养位置。通常用  $\delta^{13}\text{C}$ — $\delta^{15}\text{N}$  图来表征某一特定时间或空间的食物网结构,但是这种方法在比较不同时间和空间食物网结构中功效较差。同时这种定性描述食物网结构也无法满足食物网复杂变化下的假说验证。应用环形统计方法,以太湖梅梁湾鱼类群落为例,定量评价了群落水平食物网能流季节演替特征。结果表明太湖梅梁湾鱼类营养生态位移动的季节特征明显。进一步物种水平分析结果表明,各种鱼类角度和幅度随季节均有变化。Rayleigh 检验结果表明,群落中不同种类在秋冬、冬春和夏秋均有显著的一致方向变化;而春夏期间不显著。Watson-William 检验结果表明,群落水平的鱼类营养生态位移动在秋冬和冬春季节转换中有显著差异。引起鱼类群落水平营养生态位在食物网空间中季节性移动的主要因素为可利用资源稳定同位素的季节变化和不同鱼类种群自身的食性季节性转变。同时,由于梅梁湾食物网鱼类群落杂食性水平高,季节性浮游初级生产力成为食物网能量流动的重要驱动作用。因此,在富营养化生态系统中,食物网群落水平营养生态位季节波动也暗示了系统稳定性的下降。定量评价食物网变化有助于认识和理解食物网结构与功能在生态学和生态系统管理等方面的重要。

**关键词:** 群落水平;食物网;营养生态位;摄食策略;稳定同位素;富营养化水域

## Seasonal dynamics of food web energy pathways at the community-level

XU Jun<sup>1,\*</sup>, ZHOU Qiong<sup>2</sup>, WEN Zhou Rui<sup>3</sup>, XIE Ping<sup>1</sup>

1 Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China

2 College of Fisheries, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

3 Hubei Fishery Science Institute, Wuhan 430071, China

**Abstract:** Stable isotopes analysis, especially carbon and nitrogen, are now commonly used to study material circulation and energy flow within ecosystems. Carbon isotope ratios ( $\delta^{13}\text{C}$ ) are used to trace food sources of consumers, while nitrogen isotope ratios ( $\delta^{15}\text{N}$ ) are mainly used to quantify trophic levels of organisms. Traditionally,  $\delta^{13}\text{C}$  vs.  $\delta^{15}\text{N}$  bi-plots have been used to describe food web structure for a single time period or ecosystem, but this method show less power in comparisons of food webs across time and space. Meanwhile, simple qualitative descriptions of food webs cannot test hypotheses regarding food web complex changes. Here we present statistical methodologies for quantitatively comparing stable isotope food web data. We demonstrate the utility of circular statistics and hypothesis tests for quantifying directional food web differences using a case study, a freshwater fish community from Meiliang Bay, Lake Taihu, over seasons. We used arrow diagrams for angle of change for fishes along a gradient of seasons, in which each arrow represents a single species and the direction in trophic niche space the species moved. The length of the arrow represents the magnitude of change for that particular species. Concentric circles correspond to magnitude of change. The straight line is the mean

基金项目:国家自然科学基金资助项目(31170439);国家科技重大专项资助项目(2012ZX07101-001-04)

收稿日期:2012-05-13; 修订日期:2012-10-23

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xujun@ihb.ac.cn

vector of change among all species; the curved line on the rim indicates the 95% confidence interval around the mean vector of change. Directional change (magnitude and angle) and statistics quantifying change in isotope niche space for fish communities were also calculated. Based on these results, we found that most species from the freshwater fish community showed statistically significant shift in the same direction in food web space toward more pelagic-based production except summer to autumn seasons. In support of these patterns, the Rayleigh's test indicated significant pattern of consistent change among species in autumn to winter, winter to spring and spring to summer seasons. The Watson-William's test for comparison of the community in different time indicated that significant difference between the directional change in the fish community between autumn to winter and winter to spring seasons. Seasonal dynamics of food web energy pathways at the community-level in the current study was attributed to seasonal dynamics of stable isotope composition of available resources and foraging shifts of fish species. Meanwhile, because of the high omnivory in fish community in the current system, temporal variations in pelagic primary productivity strongly drive the energy flows in local food web. Therefore, seasonal dynamics of food web energy pathways at the community-level in eutrophic ecosystem may imply the decrease of food web stability in this eutrophic system with the dynamics of resource availability. As an understanding of food web structure and functioning is of growing importance in ecology theory and ecosystem management, our study demonstrate the quantifying food web differences from the standard stable isotope analysis.

**Key Words:** community-level; food web; trophic niche; feeding strategy; stable isotope; eutrophic aquatic ecosystem

水域生态系统中的物质循环和能量流动过程一直是生态学研究中的热点问题<sup>[1-3]</sup>。在自然群落中,食物网研究主要用于描述消费者之间,及其与初级消费者的营养关系<sup>[1]</sup>。但是,消费者之间的营养关系常因一些因素的影响而变得错综复杂,例如资源可利用性<sup>[2]</sup>、种内与种间竞争<sup>[3]</sup>,以及生境改变<sup>[4]</sup>等。因此,研究食物网结构与功能,能够揭示群落内部生物之间的竞争关系,可以评估和预测消费者、资源和食物网结构的生态效应<sup>[1]</sup>。

生物体内天然存在的碳( $\delta^{13}\text{C}$ )、氮( $\delta^{15}\text{N}$ )稳定同位素比值变化可反映生物长期消化吸收的食物来源、营养位置和食物网结构<sup>[5]</sup>。许多研究表明, $\delta^{13}\text{C}$ 在食性相同或者相近的物种间差异小于1‰<sup>[6-7]</sup>。因此, $\delta^{13}\text{C}$ 可以用来判断食物网中不同生物的能量来源。 $\delta^{15}\text{N}$ 的富集普遍存在于动物中,包括脊椎动物和无脊椎动物;每增加一个营养级, $\delta^{15}\text{N}$ 的值相应增加3‰—4‰。因此, $\delta^{15}\text{N}$ 主要用于确定生物在食物网中所处的营养位置<sup>[6-7]</sup>。因此,稳定同位素分析技术可以定量研究如生物杂食性、外源物质输入、物种入侵、人类活动导致的污染物排放等问题对食物网结构与功能的影响<sup>[8-11]</sup>。

随着稳定同位素技术在生态领域的广泛应用,其它的一些研究方法也与稳定同位素技术结合起来探讨和分析淡水生态系统中的一系列问题。稳定同位素分析与肠含物分析结合揭示水体食物网中消费者的食物源与营养关系<sup>[12]</sup>;与C/N比、脂肪酸分析<sup>[13-14]</sup>结合解决水生生态系统中有机的来源以及能量的流动;与混合模型<sup>[15-16]</sup>结合解决水体消费者的各种食物源对消费者的贡献以及不同来源的有机物对食物网的能量贡献。此外,也有学者探讨了利用稳定同位素研究群落水平生态位宽幅的可行性,提出了 $\delta^{15}\text{N}$ 区间、 $\delta^{13}\text{C}$ 区间、生态位总面积等一系列概念<sup>[17-18]</sup>。

目前,国内有关研究大多是针对单个物种,且采用的多是传统的肠含物分析方法,缺少对群落水平食物网能流季节演替特征的比较研究。本研究利用碳、氮稳定同位素技术,结合Schmidt等人提出的环形统计分析方法<sup>[19]</sup>,以太湖梅梁湾鱼类群落为研究对象,探讨群落水平食物网能流季节演替特征,为从生态系统水平解释食物网物质循环与能量流动提供理论与方法支撑。

## 1 研究地点与方法

### 1.1 研究区概况

太湖位于经济发达的长江三角洲上,是我国的三大淡水湖泊,跨江苏无锡苏州和浙江湖州等城市(30°

56'—31°56' N, 119°54'—120°36' E), 面积为 2338 km<sup>2</sup>, 平均深度 1.89 m, 最大水深不超过 3 m。梅梁湾(31°31'—325'N, 120°09'—340'E)位于太湖的北部。近 10 年以来, 由于该湖湾周边地区工农业的发展和城市人口的剧增, 导致湖湾每年 5—9 月份蓝藻水华的频繁暴发, 该湖湾已成为太湖污染最严重的水域之一<sup>[20]</sup>。

### 1.2 鱼类样品采集与测定概述

本研究所用数据中鱼类消费者为 2004 年到 2005 年秋、冬、春、夏的周年采集样品。用于稳定同位素分析的肌肉组织取自鱼类背部, 因为背部肌肉可代表整个鱼类个体的稳定同位素值<sup>[20]</sup>。肌肉组织样品于烘箱中 60℃ 条件下烘至恒重, 并研磨至均匀细粉。分析所用的仪器为中国科学院水生生物研究所 Carlo Erba EA-1110 元素分析仪与 Delta Plus Finnigan 同位素比率质谱连用仪; 样品分析精度为 0.3‰<sup>[20]</sup>。

### 1.3 同位素数据的环形统计

依据角度数据计算<sup>[21]</sup>, 本研究计算了季节变化过程中, 鱼类群落稳定同位素比值在食物网空间中变化的幅度与方向。由于生物地球化学循环过程, 会影响稳定同位素对生物营养生态位的指示作用, 因此许多研究采用了稳定同位素基准校正消费者稳定同位素<sup>[22-25]</sup>。太湖梅梁湾系统富营养化严重, 因此同位素基准季节性变异大。但由于本研究中没有各季节统一的基准生物, 因此本研究在环形统计中, 未对鱼类群落直接进行校正; 而是在讨论对其潜在影响进行分析。本研究计算了碳氮两种稳定同位素属性季节变化的方向(角度)和幅度。对鱼类群落水平的平均变化特征, 本研究计算了所有种类变化的平均特征。角度变化的标准差用于反映相关特征的离散程度。上述统计指标主要用于反映种类或群落在营养生态位空间中的季节变化。

在群落水平上, 用直观的箭头图评价了角度和幅度的季节变化。箭头图显示了太湖梅梁湾鱼类营养生态位移动的角度和幅度。Rayleigh 检验用于评价角度分布的均一性, 其零假设为分布均一。生态学意义为群落中各消费者营养生态位移动的角度在所有方向上相同, 也就是说没有特定的变化。如果检验结果为显著水平, 则说明群落水平的营养生态位移动不是随机的, 而是在食物网生态位空间里有方向性的。Watson-William 双样本检验用于评价不同时间(如季节)或空间(如栖息地)角度变化的差异。该检验的零假设为两组样本角度无差异。本研究中, Watson-William 双样本检验可以用于说明群落水平的营养生态位在食物网生态位空间里的移动在季节是否有显著变化。本研究与环形统计有关的计算、做图和统计检验均在 R 软件中完成(Package 'circular')<sup>[26]</sup>。

## 2 结果

本研究共涉及到太湖梅梁湾沿岸带收集的 18 种鱼类的稳定同位素。研究区间包括 4 个季节: 2004 年到 2005 年秋、冬、春、夏。秋季鱼类  $\delta^{13}\text{C}$  与  $\delta^{15}\text{N}$  值主要集中在  $(-27.5 \pm 0.6)\text{‰}$ — $(-25.0 \pm 0.5)\text{‰}$  ( $\delta^{13}\text{C}$ ) 和  $(13.8 \pm 0.9)\text{‰}$ — $(20.7 \pm 1.3)\text{‰}$  ( $\delta^{15}\text{N}$ ) 区间。冬季鱼类稳定同位素主要集中在  $(-28.8 \pm 1.3)\text{‰}$ — $(-25.3 \pm 0.4)\text{‰}$  ( $\delta^{13}\text{C}$ ) 和  $14.9\text{‰}$ — $(20.4 \pm 0.8)\text{‰}$  ( $\delta^{15}\text{N}$ ) 的区间变化。春季鱼类消费者稳定同位素主要在  $-28.1\text{‰}$ — $(-25.8 \pm 1.4)\text{‰}$  ( $\delta^{13}\text{C}$ ) 和  $(13.5 \pm 1.9)\text{‰}$ — $(19.7 \pm 0.9)\text{‰}$  ( $\delta^{15}\text{N}$ ) 区间变化。夏季鱼类消费者稳定同位素主要在  $(-28.3 \pm 0.3)\text{‰}$ — $(-25.1 \pm 0.9)\text{‰}$  ( $\delta^{13}\text{C}$ ) 和  $(11.8 \pm 2.2)\text{‰}$ — $(18.2 \pm 0.9)\text{‰}$  ( $\delta^{15}\text{N}$ ) 的区间变化(图 1), 详细描述参见 Zhou 等<sup>[20]</sup>。

在群落水平上, 我们用直观的箭头图评价了角度和幅度的季节变化(图 2)。与  $\delta^{13}\text{C}$ — $\delta^{15}\text{N}$  图(图 1)的模糊特征相比, 箭头图清晰显示了太湖梅梁湾鱼类营养生

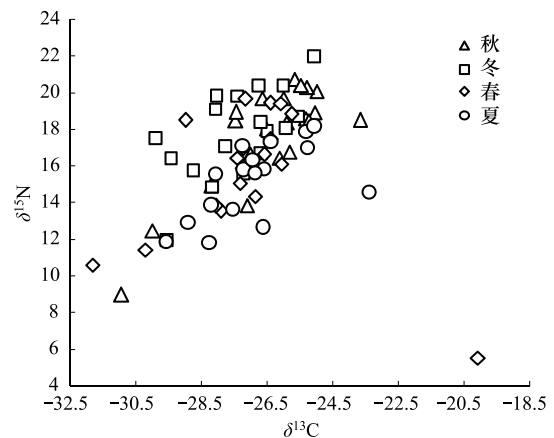


图 1 太湖梅梁湾鱼类群落稳定同位素食物网特征(数据来源<sup>[20]</sup>)

Fig. 1 Stable isotope food web diagram for all seasonal types of the fish community in Meiliang Bay, Lake Taihu

图中各点位为不同季节鱼类碳氮稳定同位素均值; 便于直观, 各数据点标准差未在图中标注

态位移动的角度和幅度。结果表明太湖梅梁湾鱼类营养生态位移动的季节特征明显。进一步物种水平分析结果表明,各种鱼类角度和幅度随季节均有变化(表 1)。Rayleigh 检验结果表明,群落中不同种类在秋冬、冬春和夏秋均有显著的一致方向变化;而春夏期间不显著(表 2)。Watson-William 检验结果表明,群落水平的鱼类营养生态位秋冬动在秋冬和春冬季节转换中有显著差异(表 2)。

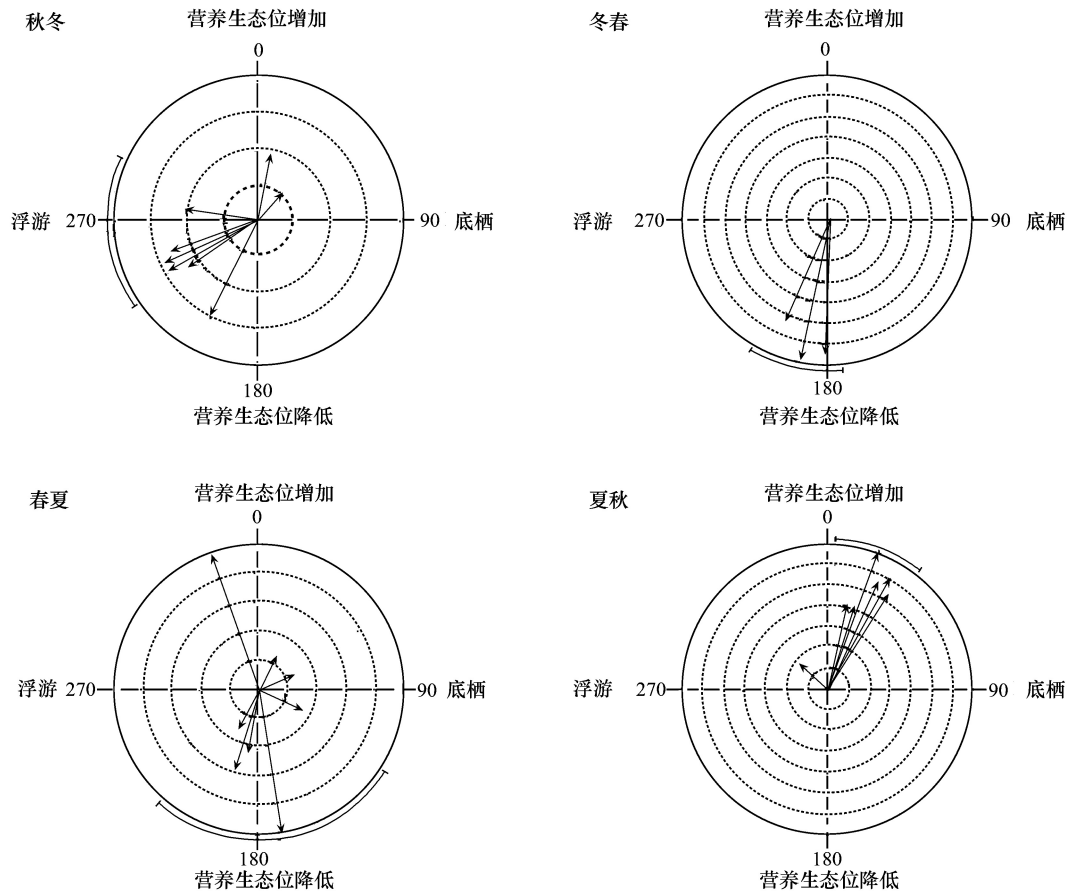


图 2 鱼类稳定同位素角度季节变化特征

Fig. 2 Arrow diagrams for angle of change for fishes along a gradient of seasons

箭头方向指示物种在营养生态位空间上的移动方向;箭头大小指示物种移动幅度;同心环指示幅度的大小;图中直线指示群落水平的移动方向,而外缘弧线指示群落移动角度的 95% 置信区间

表 1 太湖梅梁湾鱼类群落各种类随季节的方向(幅度与角度)变化特征

Table 1 Directional change (magnitude and angle) for each species across all time steps in Meiliang Bay, Lake Taihu, fish community

种类 Species	秋冬 Autumn to winter		冬春 Winter to spring		春夏 Spring to summer		夏秋 Summer to autumn	
	角度 Angle	幅度 Magnitude	角度 Angle	幅度 Magnitude	角度 Angle	幅度 Magnitude	角度 Angle	幅度 Magnitude
红鳍原鲌 <i>Cultrichthys erythropterus</i>	357.30	1.91	203.185	5.461	63.197	2.151	8.505	2.164
翘嘴鲌 <i>Culter dabryi</i>					199.359	5.49	25.772	5.819
黄颡 <i>Pelteobagrus fulvidraco</i>	240.01	1.42	200.493	2.114				
刀鲚 <i>Coilia nasus</i>	249.65	2.56	214.274	1.634	113.305	2.831	12.095	3.436
大银鱼 <i>Protosalanx hyalocranius</i>	206.05	3.01						
银鱼 <i>Salangichthys tankahkeii</i>	239.93	2.85	182.717	6.117				
餐条 <i>Hemiculter leucisculus</i>	265.40	0.87	201.329	3.382	125.022	1.551	11.417	4.193
鳊鱼 <i>Rhodeus ocellatus</i>	277.79	1.92	190.229	2.703	25.56	2.295	76.645	1.429



续表

种类 Species	秋冬 Autumn to Winter		冬春 Winter to Spring		春夏 Spring to Summer		夏秋 Summer to Autumn	
	角度 Angle	幅度 Magnitude	角度 Angle	幅度 Magnitude	角度 Angle	幅度 Magnitude	角度 Angle	幅度 Magnitude
棒花鱼 <i>Abbottina rivularis</i>	273.84	1.49	207.79	0.836	193.005	4.177	30.91	5.49
麦穗鱼 <i>Pseudorasbora parva</i>	276.83	1.43	179.834	3.45	163.811	0.646	17.504	4.089
黑鳍鳈 <i>Sarcocheilichthys nigripinnis</i>	244.76	2.91	80.647	1.723				
鲤 <i>Cyprinus carpio</i>	239.04	0.82	217.476	0.756	188.691	1.588	28.393	2.944
鲫 <i>Carassius auratus</i>	10.05	1.78	190.381	3.385	216.027	1.496	22.925	3.029
子陵吻鰕虎 <i>Rhinogobius giurinus</i>	40.13	0.92	188.471	3.801				
鲢 <i>Silurus asotus</i>					161.492	2.489	308.603	1.587
油鲈 <i>Hemiculter bleekeri</i>					209.545	2.839	25.201	5.073
草鱼 <i>Ctenopharyngodon idellus</i>						339.866	9.703	

表2 太湖梅梁湾鱼类群落在同位素生态位空间中方向季节变化特征的统计结果

Table 2 Directional statistics quantifying change in isotope niche space for fish communities in Meiliang Bay, Lake Taihu, over seasons; P values in boldface type are significant at the  $\alpha = 0.05$  level

时间 Time	种类数 No. species	平均值 Mean vector		标准差 Circular SD	Rayleigh's test		Watson-William's test	
		方向 Direction	长度 Length		Z	P	F	P
秋冬 Autumn to winter	14	265.099	0.638	54.303	5.702	0.002	16.679	<0.001
冬春 Winter to spring	13	192.202	0.872	29.973	9.880	<0.0001	0.246	0.625
春夏 Spring to summer	13	172.016	0.457	71.679	2.718	0.063	0.512	0.481
夏秋 Summer to autumn	12	20.488	0.898	26.578	9.677	<0.0001		

### 3 讨论

#### 3.1 群落水平食物网能流季节演替

已有研究多关注食物资源和消费者稳定同位素值特征;然而,消费者营养生态位变化,尤其是高营养级消费者的变化在维持水生态系统的稳定性中扮演重要角色,决定了食物链长度和物质能量传递效率<sup>[27]</sup>。太湖富营养化问题严重,生态健康状况逐年退化,关注太湖鱼类消费者种群与群落水平的食物网动力学特征具有重要意义<sup>[20, 28-29]</sup>。

太湖初级生产者(例如悬浮颗粒有机物和附着藻类)稳定同位素有显著季节变化<sup>[20, 28-29]</sup>;而本研究结果也表明消费者稳定同位素特征也随季节波动,这说明食物网中可利用资源的稳定同位素值时间变化会通过食物链传递到高营养级消费者<sup>[8-9, 30]</sup>。此外鱼类在生活史过程中食性转变现象普遍<sup>[23, 31]</sup>。在太湖梅梁湾,肠含物分析表明,许多鱼类为泛食性消费者(例如红鳍原鲃、湖鲚和餐条),其食物来源随着时间而发生改变<sup>[32]</sup>。因此,引起鱼类群落水平营养生态位在食物网空间中季节性移动的主要因素为可利用资源的季节变化和不同鱼类种群自身的食性季节性转变。结合基准校正的稳定同位素混合模型结果也表明太湖梅梁湾食物网底层可利用资源(例如颗粒有机物)和初级消费者(如浮游动物)的稳定同位素的季节变化显著,且鱼类底栖与浮游能量来源比例季节变化显著<sup>[20]</sup>。

本研究表明,群落中不同种类在秋冬、冬春和夏秋均有显著的一致方向变化。与附着藻类与水生植物相比,浮游初级生产者是梅梁湾食物网重要可利用资源。碳同位素特征也表明悬浮颗粒有机物在支持梅梁湾食物网碳源驱动中的重要性<sup>[20]</sup>。同时,由于梅梁湾食物网鱼类群落杂食性水平高,因此鱼类群落水平的营养生态位移动的一致性可以归因于季节性浮游初级生产力对食物网能量流动的驱动作用。此外,梅梁湾春末、夏季、秋季浮游植物快速繁殖与生长是季节性驱动食物网能量流动的另一个特征。因此,群落水平的鱼类营养生态位移动仅在秋冬和冬春季节转换中有显著差异也在一定程度上进一步支持了本结论。富营养化生态系统中,食物网群落水平营养生态位季节波动也暗示了系统稳定性的下降<sup>[20]</sup>。



### 3.2 环形统计效果评价

在群落水平上,本研究用直观的箭头图评价了角度和幅度的季节变化(图2)。与 $\delta^{13}\text{C}$ — $\delta^{15}\text{N}$ 图(图1)的模糊特征相比,箭头图清晰显示了太湖梅梁湾鱼类营养生态位移动的角度和幅度。应用稳定同位素研究群落水平的营养关系是近年来一个关注的焦点,因此应用定量评价技术手段分析群落同位素数据显得尤为重要<sup>[33-35]</sup>。Schmidt等应用环形统计分析手段定量评价了两个生态系统中节肢动物群落空间梯度和鱼类群落时间梯度下的食物网能流特征,并对解释数据的生态学意义进一步提升<sup>[19]</sup>。本研究结果也表明环形统计在分析富营养湖泊鱼类群落相对复杂的季节性食物网变化特征方面有很大优势。与 $\delta^{13}\text{C}$ — $\delta^{15}\text{N}$ 图的趋势特征相比<sup>[20]</sup>,环形统计给出了定量评价季节性食物网能流变化的结果;这也为进一步探究生态系统稳定性、抗干扰能力和恢复力提供了定量判别手段。

不同时空中生物与非生物因子均会影响生态系统生物地球化学循环特征,进而生物的稳定同位素比值。因此,近年来同位素生态学研究,通常根据所研究的生态系统自身特征,选择基准生物来评价食物网<sup>[6]</sup>。基于以下两个因素,本研究未对鱼类群落的稳定同位素进行基准校正。第一,由于梅梁湾食物网鱼类群落杂食性水平高,许多种类食物来源在两个营养级以上,评价鱼类群落水平的营养生态位移动不能简单确定唯一同位素营养级富集指数<sup>[11]</sup>。第二,由于梅梁湾富营养化严重,同位素生物地球化学循环季节变化剧烈;在缺乏不同季节同一物种作为基准的情况下,也不便于用不同同位素周转特征的食物网底层生物作为校正基准<sup>[37]</sup>。综上,为进一步提升食物网定量统计分析的精度,仍需进行基准校正下的食物网营养生态位定量研究。

#### References:

- [ 1 ] Post D M. Using stable isotopes to estimate trophic position; models, methods, and assumptions. *Ecology*, 2002, 83: 703-718.
- [ 2 ] Zimmerman M S, Schmidt S N, Krueger C C, Vander Zanden M J, Eshenroder R L. Ontogenetic niche shifts and resource partitioning of lake trout morphotypes. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2009, 66: 1007-1018.
- [ 3 ] López-Bao J, Palomares F, Rodríguez A, Ferreras P. Intraspecific interference influences the use of prey hotspots. *Oikos*, 2011, 120: 1489-1496.
- [ 4 ] Schindler D E, Scheuerell M D. Habitat coupling in lake ecosystems. *Oikos*, 2002, 98: 177-189.
- [ 5 ] Xu J. Ecological studies on the food web structures and trophic relationships of freshwater lakes in China using stable carbon and nitrogen isotopes. PhD thesis. Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences. 2005.
- [ 6 ] Xu J, Zhang M, Xie P. Variability of stable isotopic baselines and its consequence for trophic modeling. *Journal of Lake Sciences*, 2010, 22: 10-23.
- [ 7 ] Xu J, Zhou Q, Zeng Q, Zhang M, Zhang L, Wen Z, Wang, Y. Stable carbon and nitrogen isotopes in aquatic ecology: Theories and applications//Duan, C. (ed.) *Advances in Ecological Sciences*. Higher Education Press, 2010: 35-80.
- [ 8 ] Xu J, Xie P, Zhang M, Yang H. Variation in stable isotope signatures of seston and a zooplanktivorous fish in a eutrophic Chinese lake. *Hydrobiologia*, 2005, 541: 215-220.
- [ 9 ] Xu J, Xie P, Zhang M, Zhou Q, Zhang L, Wen Z, Cao T. Icefish (*Salangidae*) as an indicator of anthropogenic pollution in freshwater systems using nitrogen isotope analysis. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2007, 79: 323-326.
- [ 10 ] Xu J, Zhang M, Xie P. Stable carbon isotope variations in surface bloom scum and subsurface seston among shallow eutrophic lakes. *Harmful Algae*, 2007, 6: 679-685.
- [ 11 ] Xu J, Zhang M, Xie P. Primary consumers as bioindicator of nitrogen pollution in lake planktonic and benthic food webs. *Ecological Indicators*, 2011, 14: 189-196.
- [ 12 ] Rudnick D, Resh V. Stable isotopes, mesocosms and gut content analysis demonstrate trophic differences in two invasive decapod crustacea. *Freshwater Biology*, 2005, 50: 1323-1336.
- [ 13 ] Logan J, Jardine T, Miller T, Bunn S, Cunjak R, Lutcavage M. Lipid corrections in carbon and nitrogen stable isotope analyses: comparison of chemical extraction and modelling methods. *Journal of Animal Ecology*, 2008, 77: 838-846.
- [ 14 ] Van den Meersche K, Van Rijswijk P, Soetaert K, Middelburg J J. Autochthonous and allochthonous contributions to mesozooplankton diet in a tidal river and estuary: Integrating carbon isotope and fatty acid constraints. *Limnology and Oceanography*, 2009, 54: 62-74.

- [15] Phillips D L, Gregg J W. Uncertainty in source partitioning using stable isotopes. *Oecologia*, 2001, 127: 171-179.
- [16] Parnell A C, Inger R, Bearhop S, Jackson A L. Source partitioning using stable isotopes: coping with too much variation. *PLoS One*, 2010, 5: e9672.
- [17] Newsome S D, Martinez del Rio C, Bearhop S, Phillips D L. A niche for isotopic ecology. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2007, 5: 429-436.
- [18] Layman C A, Arrington D A, Montaña C G, Post D M. Can stable isotope ratios provide for community-wide measures of trophic structure?. *Ecology*, 2007, 88: 42-48.
- [19] Schmidt S N, Olden J D, Solomon C T, Vander Zanden M J. Quantitative approaches to the analysis of stable isotope food web data. *Ecology*, 2007, 88: 2793-2802.
- [20] Zhou Q, Xie P, Xu J, Liang X, Qin J, Cao T, Chen F. Seasonal trophic shift of littoral consumers in eutrophic Lake Taihu (China) revealed by a two-source mixing model. *The Scientific World Journal*, 2011, DOI 10.1100/tsw.2011.134.
- [21] Batschelet E. *Circular statistics in biology*. New York, USA: Academic Press New York, 1981.
- [22] Vander Zanden M J, Vadeboncoeur Y. Fishes as integrators of benthic and pelagic food webs in lakes. *Ecology*, 2002, 83: 2152-2161.
- [23] Xu J, Zhang M, Xie P. Size-related shifts in reliance on benthic and pelagic food webs by lake anchovy. *Ecoscience*, 2007, 14: 170-177.
- [24] Xu J, Zhang M, Xie P. Stable isotope changes in freshwater shrimps (*Exopalaemon modestus* and *Macrobrachium nipponensis*): trophic pattern implications. *Hydrobiologia*, 2008, 605: 45-54.
- [25] Xu J, Zhang M, Xie P. Sympatric variability of isotopic baselines influences modeling of fish trophic patterns. *Limnology*, 2011, 12: 107-115.
- [26] R Development Core Team. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2009, <http://www.R-project.org>.
- [27] Vander Zanden M J, Fetzer W W. Global patterns of aquatic food chain length. *Oikos*, 2007, 116: 1378-1388.
- [28] Zhou Q, Xie P, Xu J, Ke Z, Guo L. Growth and food availability of silver and bighead carps: evidence from stable isotope and gut content analysis. *Aquaculture Research*, 2009, 40: 1616-1625.
- [29] Zhou Q, Xie P, Xu J, Ke Z, Guo L, Cao T. Seasonal variations in stable isotope ratios of two biomanipulation fishes and seston in a large pen culture in hypereutrophic Meiliang Bay, Lake Taihu. *Ecological Engineering*, 2009, 35: 1603-1609.
- [30] Zhang L, Xu J, Xie P, Zang X, Qiu G, Zeng J. Stable isotope variations in particulate organic matter and a planktivorous fish in the Yangtze River. *Journal of Freshwater Ecology*, 2007, 22: 383-386.
- [31] Wang Y, Yu X, Xu J. Decreased trophic position as a function of increasing body size of a benthic omnivorous fish from the largest freshwater lake in China. *Environmental Biology of Fishes*, 2011, 91: 505-512.
- [32] Jialin Ye. Community assembly and feeding ecology of littoral fish in Meiliang Bay, Lake Taihu. Master thesis. Huazhong Agricultural University, 2006.
- [33] Schmidt S N, Vander Zanden M J, Kitchell J F. Long-term food web change in Lake Superior. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2009, 66: 2118-2129.
- [34] Vander Zanden M J, Chandra S, Allen B C, Reuter J E, Goldman C R. Historical food web structure and restoration of native aquatic communities in the Lake Tahoe (California-Nevada) basin. *Ecosystems*, 2003, 6: 274-288.
- [35] Solomon C T, Carpenter S R, Rusak J A, Vander Zanden M J. Long-term variation in isotopic baselines and implications for estimating consumer trophic niches. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2008, 65: 2191-2200.
- [37] Xu J, Zhang M, Xie P. Sympatric variability of isotopic baselines influences modeling of fish trophic patterns. *Limnology*, 2011, 12: 107-115.

#### 参考文献:

- [5] 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. 2005. 中国科学院水生生物研究所.
- [6] 徐军, 张敏, 谢平. 氮稳定同位素基准的变异性及对营养级评价的影响. *湖泊科学*, 2010, 22: 10-23.
- [7] 徐军, 周琼, 曾庆飞, 张敏, 张亮, 温周瑞, 王玉玉. 碳、氮稳定同位素技术及其在水域生态学研究中的应用. *生态科学进展*第五卷. 北京: 高等教育出版社, 2010: 35-80.
- [32] 叶佳林. 太湖梅梁湾沿岸带鱼类组成和摄食生态研究. 华中农业大学硕士论文, 2006.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 33, No. 15 Aug. ,2013 (Semimonthly)  
CONTENTS

**Frontiers and Comprehensive Review**

- A review on the application of remote sensing in mangrove ecosystem monitoring .....  
..... SUN Yongguang, ZHAO Dongzhi, GUO Wenyong, et al (4523)
- Urban metabolism process based on emergy synthesis: Theory and method ..... LIU Gengyuan, YANG Zhifeng, CHEN Bin (4539)
- Theoretical considerations on ecological civilization development and assessment ..... ZHAO Jingzhu (4552)

**Autecology & Fundamentals**

- Assemblage composition and distribution of meiobenthos in the Yangtze Estuary and its adjacent waters in autumn-winter season .....  
..... Yu Tingting, XU Kuidong (4556)
- Ecological distribution and nutrient limitation of phytoplankton in adjacent sea of Guanhe Estuary in spring .....  
..... FANG Tao, HE Xinran, FENG Zhihua, et al (4567)
- The distribution of urea concentrations and urease activities in the coastal waters of Hainan Island during the spring .....  
..... HUANG Kaixuan, ZHANG Yun, OU Linjian, et al (4575)
- Effects of simulated acid rain on growth and bleeding sap amount of root in *Quercus mongolica* .....  
..... LIANG Xiaoqin, LIU Jian, DING Wenjuan, et al (4583)
- Allelopathic effects of organic acid allelochemicals on melon ..... ZHANG Zhizhong, SUN Zhihao, CHEN Wenhui, et al (4591)
- Fraction changes of oxidation organic carbon in paddy soil and its correlation with CH<sub>4</sub> emission fluxes .....  
..... WU Jiamei, JI Xionghui, HUO Lianjie, et al (4599)
- Changes of soil nitrogen types and nitrate accumulation in vegetables with single or multiple application of dicyandiamide .....  
..... WANG Huangping, ZHANG Qing, WENG Boqi, et al (4608)
- Comparison of isolation rate of mycobacteriophage in the different type soils .....  
..... XU Fengyu, SU Shengbing, MA Hongxia, et al (4616)
- Effects of different acidity acid rain on yield, protein and starch content and components in two wheat cultivars .....  
..... BIAN Yajiao, HUANG Jie, SUN Qisong, et al (4623)
- The causes of *Gentiana straminea* Maxim. seeds dormancy and the methods for its breaking .....  
..... LI Bingbing, WEI Xiaohong, XU Yan (4631)
- Physiological responses of four golden-leaf trees to SO<sub>2</sub> stress ..... CHONG Peifang, SU Shiping (4639)
- Influence of endosulfan and its metabolites on enzyme activities in purple soil .....  
..... XIONG Bailian, ZHANG Jinzhong, DAI Juan, et al (4649)

**Population, Community and Ecosystem**

- Seasonal dynamics of food web energy pathways at the community-level ..... XU Jun, ZHOU Qiong, WEN Zhouhui, et al (4658)
- Population dynamics of *Niviventer confucianus* in Thousand Island Lake ..... ZHANG Xu, BAO Yixin, LIU Jun, et al (4665)
- Soil ecological stoichiometry under different vegetation area on loess hilly-gully region .....  
..... ZHU Qiulian, XING Xiaoyi, ZHANG Hong, et al (4674)
- Adaptation strategies of reproduction of plant community in response to grassland degradation and artificial restoration .....  
..... LI Yuanyuan, DONG Shikui, ZHU Lei, et al (4683)
- Effect of different *Cunninghamia lanceolata* plantation soil qualities on soil microbial community structure .....  
..... LIU Li, XU Mingkai, WANG Silong, et al (4692)
- Effects of different maize hybrids (inbreds) on the growth, development and population dynamics of *Rhopalosiphum maidis* Fitch ...  
..... ZHAO Man, GUO Xianru, LI Weizheng, et al (4707)
- Effects of forest canopy structure on understory vegetation characteristics of Funiu Mountain Nature Reserve .....  
..... LU Xunling, DING Shengyan, YOU Li, et al (4715)

- Influence of restoring cropland to grassland on dung beetle assemblages in Wuchuan County, Inner Mongolia, China ..... LIU Wei, MEN Lina, LIU Xinmin (4724)
- Cu and nutrient deficiency on different effects of growth, tolerance and mineral elements accumulation between two *Elsholtzia haichouensis* populations ..... KE Wenshan, CHEN Shijian, XIONG Zhiting, et al (4737)
- Measurement and retrieval of leaf area index using remote sensing data in Kanas National Nature Reserve, Xinjiang ..... ZAN Mei, LI Dengqiu, JU Weimin, et al (4744)
- Landscape, Regional and Global Ecology**
- An spatial ecosystem services approach based on LUCC: a case study of Ganzhou district of Zhangye City ..... LIANG Youjia, XU Zhongmin, ZHONG Fanglei, et al (4758)
- Spatiotemporal characteristics of *Spartina alterniflora* marsh change in the coastal wetlands of Yancheng caused by natural processes and human activities ..... ZHANG Huabing, LIU Hongyu, Hou Minghang (4767)
- Process analysis and evaluation of wetlands degradation based on PCA in the lakeside of Napahai, Northwest Yunnan Plateau ..... SHANG Wen, YANG Yongxing, HAN Dayong (4776)
- On eco-security evaluation in the Tumen River region based on RS&GIS ..... NAN Ying, JI Zhe, FENG Hengdong, et al (4790)
- Evaluation and simulation of historical range of variability of forest landscape pattern in Huzhong area ..... WU Zhifeng, LI Yuehui, BU Rencang, et al (4799)
- Effects of precipitation timing on aboveground net primary productivity in inner mongolia temperate steppe ..... GUO Qun, HU Zhongmin, LI Xuanran, et al (4808)
- Research Notes**
- Litter production and decomposition of different forest ecosystems and their relations to environmental factors in different climatic zones of mid and eastern China ..... WANG Jianjian, WANG Yongji, LAI Liming, et al (4818)



# 《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于1981年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的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;新书评价和学术、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

本期责任副主编 赵景柱 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)

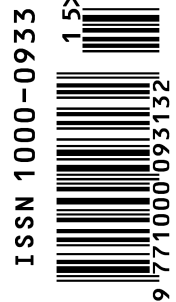
第33卷 第15期 (2013年8月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 15 (August, 2013)

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	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
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:100717	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@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 90.00 元