

中国百种杰出学术期刊
中国精品科技期刊
中国科协优秀期刊
中国科学院优秀科技期刊
新中国 60 年有影响力的期刊
国家期刊奖

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica

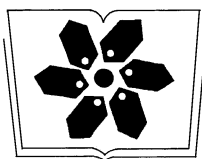
(Shengtai Xuebao)

第 30 卷 第 24 期
Vol.30 No.24
2010



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)

中国科学院科学出版基金资助出版

第 30 卷 第 24 期 2010 年 12 月 (半月刊)

目 次

三江平原残存湿地斑块特征及其对物种多样性的影响	施建敏, 马克明, 赵景柱, 等 (6683)
叶片碳同位素对城市大气污染的指示作用	赵德华, 安树青 (6691)
土地利用对崇明岛围垦区土壤有机碳库和土壤呼吸的影响	张容娟, 布乃顺, 崔 军, 等 (6698)
缓/控释复合肥料对土壤氮素库的调控作用	董 燕, 王正银 (6707)
北京海淀公园绿地二氧化碳通量	李 霞, 孙 睿, 李 远, 等 (6715)
三峡库区消落带生态环境脆弱性评价	周永娟, 仇江啸, 王 姣, 等 (6726)
应用碳、氮稳定同位素研究稻田多个物种共存的食物网结构和营养级关系	张 丹, 闵庆文, 成升魁, 等 (6734)
基于弹性系数的江苏省能源生态足迹影响因素分析	杨足膺, 赵 媛, 付伍明 (6741)
中国土地利用多功能性动态的区域分析	甄 霖, 魏云洁, 谢高地, 等 (6749)
遮荫处理对东北铁线莲生长发育和光合特性的影响	王云贺, 韩忠明, 韩 梅, 等 (6762)
臭氧胁迫对冬小麦光响应能力及 PS II 光能吸收与利用的影响	郑有飞, 赵 泽, 吴荣军, 等 (6771)
地表覆草和覆膜对西北旱地土壤有机碳氮和生物活性的影响	谢驾阳, 王朝辉, 李生秀 (6781)
喀斯特峰丛洼地旱季土壤水分的空间变化及主要影响因子	彭晚霞, 宋同清, 曾馥平, 等 (6787)
极干旱区深埋潜水蒸发量的测定	李红寿, 汪万福, 张国彬, 等 (6798)
灌木林土壤古菌群落结构对地表野火的快速响应	徐赢华, 张 涛, 李 智, 等 (6804)
稻田免耕和稻草还田对土壤腐殖质和微生物活性的影响	区惠平, 何明菊, 黄 景, 等 (6812)
造纸废水灌溉对黄河三角洲盐碱地土壤酶活性的影响	董丽洁, 陆兆华, 贾 琼, 等 (6821)
神农宫扁角菌蚊幼虫种群分布及其与环境因子的相关性	顾永征, 李学珍, 牛长缨 (6828)
三亚珊瑚礁水域纤毛虫种类组成和数量分布及与环境因子的关系	谭烨辉, 黄良民, 黄小平, 等 (6835)
淞江鲈在中国地理分布的历史变迁及其原因	王金秋, 成 功 (6845)
黄海中南部小黄鱼生物学特征的变化	张国政, 李显森, 金显仕, 等 (6854)
甲基溴消毒对番茄温室土壤食物网的抑制	陈云峰, 曹志平 (6862)
离子树脂法测定森林穿透雨氮素湿沉降通量——以千烟洲人工针叶林为例	盛文萍, 于贵瑞, 方华军, 等 (6872)
乡土植物芦苇对外来入侵植物加拿大一枝黄花的抑制作用	李愈哲, 尹 昕, 魏 维, 等 (6881)
遂渝铁路边坡草本植物多样性季节动态和空间分布特征	王 倩, 艾应伟, 裴 娟, 等 (6892)
古尔班通古特沙漠原生梭梭树干液流及耗水量	孙鹏飞, 周宏飞, 李 彦, 等 (6901)
碟果虫实种子萌发对策及生态适应性	刘有军, 刘世增, 纪永福, 等 (6910)
原始兴安落叶松林生长季净生态系统 CO ₂ 交换及其光响应特征	周丽艳, 贾丙瑞, 曾 伟, 等 (6919)
五种红树植物通气组织对人工非潮汐生境的响应	伍卡兰, 彭逸生, 郑康振, 等 (6927)
亚高寒草甸不同生境植物群落物种多度分布格局的拟合	刘梦雪, 刘佳佳, 杜晓光, 等 (6935)
内蒙古荒漠草原地表反照率变化特征	张 果, 周广胜, 阳伏林 (6943)
中国沙棘克隆生长对灌水强度的响应	李甜江, 李根前, 徐德兵, 等 (6952)
增温与放牧对矮蒿草甸 4 种植物气孔密度和气孔长度的影响	张立荣, 牛海山, 汪诗平, 等 (6961)
基于 ORYZA2000 模型的北京地区早稻适宜播种期分析	薛昌颖, 杨晓光, 陈怀亮, 等 (6970)
专论与综述	
区域生态安全格局研究进展	刘 洋, 蒙古军, 朱利凯 (6980)
植物功能性状与湿地生态系统土壤碳汇功能	王 平, 盛连喜, 燕 红, 等 (6990)
农田水氮关系及其协同管理	王小彬, 代 快, 赵全胜, 等 (7001)
虫害诱导挥发物的生态调控功能	王国昌, 孙晓玲, 董文霞, 等 (7016)
土壤微生物资源管理、应用技术与学科展望	林先贵, 陈瑞蕊, 胡君利 (7029)
问题讨论	
从演化的角度评价北京市经济系统可持续发展趋势	黄茹莉, 徐中民 (7038)
基于植物多样性特征的武汉市城市湖泊湿地植被分类保护和恢复	郑忠明, 宋广莹, 周志翔, 等 (7045)
濒危兰科植物再引入技术及其应用	陈宝玲, 宋希强, 余文刚, 等 (7055)
研究简报	
实验条件下华北落叶松和白杆苗期生长策略的差异比较	张芸香, 李海波, 郭晋平 (7064)
基于源-库互反馈的温室青椒坐果时空动态模拟	马韞韬, 朱晋宇, 胡包钢, 等 (7072)
西双版纳小磨公路及其周边道路对蛇类活动的影响	孙 戈, 张 立 (7079)
温度变化对藻类光合电子传递与光合放氧关系的影响	张 曼, 曾 波, 张 怡, 等 (7087)
黄土区六种植物凋落物与不同形态氮素对土壤微生物量碳氮含量的影响	王春阳, 周建斌, 董燕婕, 等 (7092)
食细菌线虫 <i>Caenorhabditis elegans</i> 的取食偏好性	肖海峰, 焦加国, 胡 锋, 等 (7101)

期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 424 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 48 * 2010-12

应用碳、氮稳定同位素研究稻田多个物种共存的食物网结构和营养级关系

张 丹^{1,2}, 闵庆文^{1,*}, 成升魁¹, 王玉玉^{1,2}, 杨海龙^{1,2}, 何 露^{1,2}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

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。 $\delta^{13}\text{C}$ 值常用来分析消费者食物来源, $\delta^{15}\text{N}$ 值常用来确定生物在食物网中的营养位置。应用稳定同位素技术分析了稻-鱼(R-F)和稻-鱼-鸭(R-F-D)两种稻作方式下, 稻田多个物种共存的食物网结构和营养级关系。结果表明, R-F 中 SOM 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 $(-27.7 \pm 0.3)\text{‰}$, 与 R-F-D $(-27.4 \pm 0.4)\text{‰}$, 相差不大; R-F 中 POM 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 $(-27.4 \pm 0.8)\text{‰}$, 低于稻鱼鸭共生田 $(-26.7 \pm 0.5)\text{‰}$; $\delta^{15}\text{N}$ 值计算发现 R-F 内浮游动物的营养级位置在 2.24 ± 0.16 , 鱼的营养级位置在 3.07 ± 0.26 , 均高于其在 R-F-D 内的营养级。在 R-F-D 内, 由于鸭的引入, 和 R-F 相比, 鱼的营养级降低为 2.63 ± 0.13 。

关键词: 稳定同位素; $\delta^{13}\text{C}$; $\delta^{15}\text{N}$; 食物网; 稻田多个物种共存

Ecological studies on the food web structures and trophic relationships of multiple species coexistence in paddy fields using stable carbon and nitrogen isotopes

ZHANG Dan^{1,2}, MIN Qingwen^{1,*}, CHENG Shengkui¹, WANG Yuyu^{1,2}, YANG Hailong^{1,2}, HE Lu^{1,2}

1 Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

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

Abstract: The structure and trophic relationship of food webs are fundamental research topics in modern ecology. Food webs are important for the understanding of patterns and processes of an ecosystem. Inventory of the stable isotopes of carbon and nitrogen in organisms has been increasingly used as a powerful approach to study the structure and dynamics of food webs and trophic relationships in the studies in a wide variety of 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. By using stable isotopes analysis, the food web structures and trophic relationships of multiple species coexisted in different farming systems: (1) rice-fish culture (R-F); (2) rice-fish-duck culture (R-F-D) were examined in this paper. The results showed that a weak positive relativity existed between the $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ values and the body length and weight of fishes. Compared with the $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ values in *Anas platyrhynchos domestic* wing muscles, the ones in leg muscles were not different, while the ones in livers were significantly different. The $\delta^{13}\text{C}$ values of sedimentary organic matter (SOM) showed no difference between R-F and R-F-D. The $\delta^{13}\text{C}$ values of particulate organic matter (POM) in R-F $(-27.4 \pm 0.8)\text{‰}$ lower than that in R-F-D $(-26.7 \pm 0.5)\text{‰}$. The $\delta^{13}\text{C}$ values of macrophytes in R-F ranged from -31.9‰ — -26.1‰ , and were not significantly different from that in R-F-D $(-31.3\text{‰}$ — $-28.5\text{‰})$. The $\delta^{13}\text{C}$ was significantly higher in the submersed macrophytes than that in other macrophytes, while the $\delta^{15}\text{N}$ was significantly higher in the emergent macrophytes than that in other macrophytes. The similar $\delta^{13}\text{C}$ values in *Spirogyra* spp. and fish indicated that phytoplankton was the major food source for the fish. The similar $\delta^{13}\text{C}$ values in *Anodonta* spp, *Macrobrachium* spp. zooplankton, SOM and POM indicated that POM and demersal algae were the major food source for the

基金项目: 联合国-西班牙千年发展目标基金项目 (UNJP/CPR/040/SPA); GEF 项目 (GCP/GLO/212/GEF); 农业部国际合作交流项目资助

收稿日期: 2009-10-25; **修订日期:** 2010-09-19

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: minqw@igsrr.ac.cn

most zooplankton and zoobenthos. The $\delta^{15}\text{N}$ values indicated that *Anas platyrhynchos domestic* was at the highest trophic level. The $\delta^{15}\text{N}$ values in fish under R-F were similar to that in fish under R-F-D. This indicated adding ducks had little effects on the major food source for fish. The $\delta^{15}\text{N}$ values of POM in R-F, $(-4.4 \pm 1.1)\text{‰}$ were significantly lower than that in R-F-D $(-3.5 \pm 0.6)\text{‰}$. The $\delta^{15}\text{N}$ values of macrophytes in R-F ranged from 0.8‰ — 5.6‰ and were not significantly different from that in R-F-D $(0.5$ — $5.2)\text{‰}$. According to the calculation of $\delta^{15}\text{N}$ values, the relative trophic levels of both zooplankton and fish in R-F, were higher than that in R-F-D. Compared with R-F, the relative trophic levels of fish in R-F-D decreased.

Key Words: stable isotopes; $\delta^{13}\text{C}$; $\delta^{15}\text{N}$; food web structure; multiple species coexistence in paddy fields

现代农业的集约化以及农业生物多样性简单化带来的农业系统不稳定性越来越受到关注^[1-4],增加农业生物的遗传多样性和物种多样性,减少农用化学品投入成为农业生态系统研究的热点^[5-8]。作物的间作、套作、多个品种混合种植、农田引入其他物种(如鱼、鸭、蟹等)是增加农业生物多样性的有效途径^[9]。

农业生态系统中物质和能量的流动以及生物与生物、生物与环境间的相互作用对于理解生态系统的特征和过程以及环境对生态系统的影响有着重要的意义。稳定同位素技术已经成为研究生态系统食物网结构和营养关系及其动态变化的重要手段。近年来,稳定性碳、氮同位素技术已广泛被应用于海洋、湖泊及河口的营养层间营养流动的研究上^[10-13],并描绘出该生态系统的食物链及营养流动关系。在国内,稳定性碳、氮稳定同位素技术已经被应用于海洋、湖泊等生态系统的结构分析上^[14-17]并取得了理想的结果。然而,稳定同位素技术较少的应用到农田生态系统的研究。因此,本文以稻鱼共生和稻鱼鸭共生为例,应用氮、碳稳定同位素技术,研究稻田多个物种共存的食物网和营养级,为农业生物多样性的合理构建提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

从江县位于贵州省东南部, $108^{\circ}05'$ — $109^{\circ}12'E$, $25^{\circ}16'$ — $26^{\circ}05'N$ 。地处中亚热带温暖湿润季风气候区,年均温 16 — 18°C 以上,降水量 1050 — 1250mm ,秋收作物生长季降雨量(4—9 月份)占全年降雨量的 71% — 84% , $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温为 5949.7°C ,无霜期 300 — 320d ,全年日照 1215.3h 。土壤以黄壤、红壤为主,为高氮、高钾、少磷、富有有机质的土壤类型,pH 值在 4.5 — 6.5 之间。

2008 年选择地势较平坦、排灌方便、海拔高度相似、相邻的 2 块坝子田作为主要研究对象。按照当地现有的耕作模式,设计糯稻-鱼($R_{\text{g}}\text{F}$)、糯稻-鱼-鸭($R_{\text{g}}\text{FD}$)2 个处理。糯稻品种为地方传统品种红毛禾,鱼为当地养殖的田鲤鱼(*Cyprinus carpio* spp.),鸭(*Anas platyrhynchos domestic*)为从江水鸭。糯稻 6 月 8 日移栽,人工栽插,密度 $35\text{cm} \times 35\text{cm}$;养鱼田一部分鱼为往年过冬鱼,另一部分鱼花于 6 月初放入田中,放养密度为 0.155 条/ m^2 。稻田养鸭为传统模式,早放晚收,圈牧结合,鸭子体重 100 — 300g 时,每公顷放鸭 120 — 240 只;鸭子体重 300 — 1000g 时,每公顷放鸭 50 — 100 只。为防止鸭子逃逸及妨碍其他设置结果,在养鸭小区周围用竹栅栏相隔。除上述处理之外,其他农业生产措施均相同并按当地传统耕作方式进行。

1.2 样品采集与处理

采样期间为 2008 年 10 月。底泥中的有机物质(SOM)用手采集,用铝箔纸包裹,放入聚乙烯封口袋内。颗粒有机物(POM)样品是将稻田水用 13 号浮游生物网($112\mu\text{m}$)过滤后,真空抽滤到预烧的玻璃纤维滤膜上(Whatman GFC)获得,滤膜用铝箔纸包裹,放入聚乙烯封口袋内。浮游动物样品用 13 号浮游动物网采集($112\mu\text{m}$),放入塑料瓶内。鱼、河蚌(*Anodonta* spp.),河虾(*Macrobrachium* spp.)主要通过从稻田中捕取获得,鸭从稻田户主家买取。稻田植物用手采集,除漂浮植物采集全株外,其他浮叶、沉水及挺水植物采集茎叶及花果实,用大量清水冲洗植物表面上附着的淤泥、碎屑。

为避免近期摄入的食物对样品同位素分析产生影响^[18],将浮游动物放置于纯净水中几个小时,底栖动物放置于纯净水中过夜,排空肠含物。之后,将浮游动物冷冻保存,将河蚌去壳,仅取其肌肉部分作为稳定性同

位素分析的样品,冷冻保存。这是因为生物壳中 ^{13}C 的含量较高,不能真实反映其捕食者的实际吸收^[19]。鱼捕于10月13日和15日,取其背部肌肉,至冰箱冷冻保存。Fry证明了肌肉样品的 $\delta^{13}\text{C}$ 与整鱼的 $\delta^{13}\text{C}$ 相近,可以代表整鱼的 $\delta^{13}\text{C}$ ^[20]。鸭买于10月20日,取翅膀、腿上的肌肉以及小块肝脏,至冰箱冷冻保存。

全部样品用移动冰箱带回实验室。底泥中的有机物质(SOM)在实验室使用1mol/L盐酸酸化去除碳酸盐的影响,后用去离子水冲洗烘干,用研钵充分磨碎,放入干燥器中保存。用于 $\delta^{15}\text{N}$ 分析的沉积物样品不经酸化处理,防治酸化对 $\delta^{15}\text{N}$ 分析的影响。其他样品均在55℃下烘干至恒重,用研钵研磨成均匀粉末,放入干燥器中(干燥剂为硅胶)保存待测。

1.3 稳定同位素分析

实验样品的稳定同位素分析在中国科学院地理科学与资源研究所同位素分析实验室进行,用美国Thermo公司生产的MAT 253稳定同位素比值分析仪进行测定,碳氮稳定同位素比值以国际通用的 δ 值形式表达,定义为:

$$\delta X(\text{‰}) = \left(\frac{R_{\text{sample}}}{R} - 1 \right) \times 1000$$

式中, X 是 ^{13}C 或 ^{15}N ; R_{sample} 代表所测得的同位素比值,碳同位素是 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$,氮的同位素是 $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$, R 是国际通用标准物的重轻同位素丰度之比, δ 值越小表示样品重同位素(^{13}C 或 ^{15}N)含量越低,越大表示样品重同位素(^{13}C 或 ^{15}N)含量越高。碳稳定同位素测定的标准物质采用美洲拟箭石(PDB),氮稳定同位素分析的标准物质是纯化的大气中的 N_2 。为保持实验结果的准确性和仪器的稳定性,每测试10个样品后插入测定1个标准样品,个别样品则进行2—3次复测,重复样品的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 的标准偏差分别为 $\pm 0.2\text{‰}$ 和 $\pm 0.3\text{‰}$ 。仪器误差 $\delta^{13}\text{C}$ 0.11‰, $\delta^{15}\text{N}$ 0.32‰。

1.4 确定营养位置

营养级关系是群落内各生物成员之间最重要的联系,是群落赖以生存的基础,也是了解生态系统能量流动的核心。消费者和食物间的 $\delta^{15}\text{N}$ 差异就是营养分馏,随着营养级增加 $\delta^{15}\text{N}$ 值不断增加,不同营养级间的 ^{15}N 富集值的平均值为3.4‰^[11-12,21]。

营养级计算公式:

$$\text{Trophic position} = \frac{\delta^{15}\text{N}_{\text{consumer}} - \delta^{15}\text{N}_{\text{baseline}}}{\Delta\delta^{15}\text{N}} + \lambda$$

式中, $\delta^{15}\text{N}_{\text{baseline}}$ 为生态系统食物网的初级生产者或初级消费者的氮稳定性同位素比率(即 $\lambda = 1$ 时, $\delta^{15}\text{N}_{\text{baseline}}$ 为初级生产者 $\delta^{15}\text{N}$,而 $\lambda = 2$ 时, $\delta^{15}\text{N}_{\text{baseline}}$ 为初级消费者;当消费者营养级大于2时营养级一般为非整数)^[22], $\delta^{15}\text{N}_{\text{consumer}}$ 为消费者氮同位素比率, $\Delta\delta^{15}\text{N}$ 营养级传递过程中的富集值(平均值为3.4‰)

2 结果与分析

2.1 样品分析

在采样稻田出现的植物共有12科15种。总体而言,稻鱼鸭共生田的杂草密度和种类都低于稻鱼共生田。本次采样共采集鸭1种6只,鱼类1种10只,底栖动物河蚌1种7只,节肢动物虾1种,稻田植物8科9种。共测定样品110个,其中底泥中的有机物质(SOM)样品9个,颗粒有机物(POM)样品11个。

本次研究分析了鱼的体长和体重与碳氮稳定同位素的关系(图1和图2),结果表明田鱼的体长与体重和碳氮稳定同位素之间有弱的线性正相关性,说明它具有较明显的杂食性特征。同种生物由于所处生命阶段不同或者所处的生态环境的差异,其饲料的来源会有所不同,从而引起体内碳、氮稳定同位素值的差异,因此,动物同位素组成的变化有可能反馈其所处生态环境的信息,在营养动力学研究中也非常重要。

同位素分馏是生物组织间同位素组成差异的主要影响因素之一。本次研究分别测定了从江水鸭翅膀和腿上的肌肉以及肝脏不同部位的碳、氮稳定同位素值(表1),研究生物不同组织间稳定同位素的差异。结果表明,肌肉的碳、氮稳定同位素值比较相近,无显著性差异;肌肉与肝脏的差异性显著($P > 0.05$)。

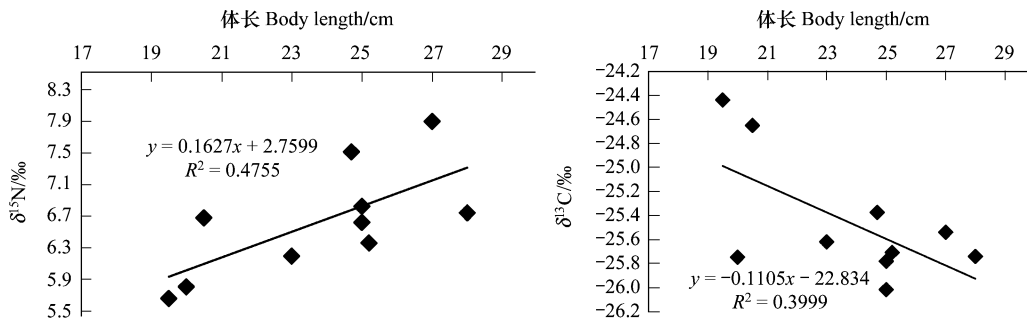


图1 稳定同位素与田鱼体重的关系

Fig.1 The relationship between stable isotopes and the weight of the fish

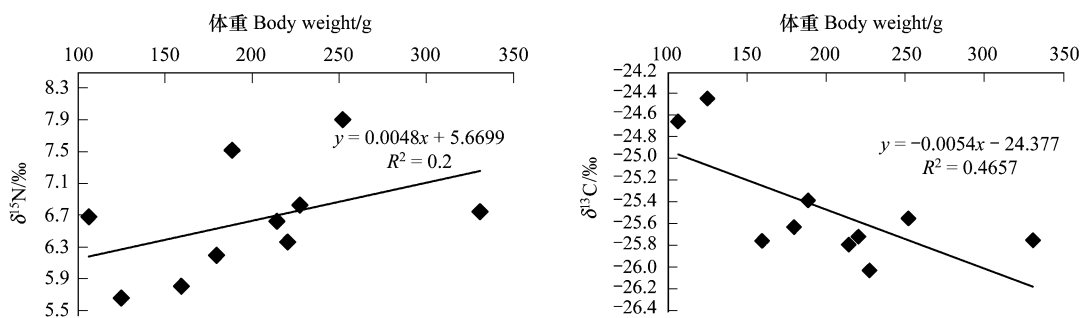


图2 稳定同位素与田鱼体长的关系

Fig. 2 The relationship between Stable isotopes and the length of the fish

2.3 碳稳定同位素值分析

已有研究表明,不同有机物来源的物质的碳稳定性同位素比率($\delta^{13}\text{C}$)存在一定差异;消费者的 $\delta^{13}\text{C}$ 可以反应其消化吸收的食物的 $\delta^{13}\text{C}$,之间的差异在 $0-1\text{‰}$,因此, $\delta^{13}\text{C}$ 常被用来分析生态系统中消费者的食物来源^[11-12]。本研究中,稻鱼共生田内SOM值为 $(-27.7 \pm 0.3)\text{‰}$,稻鱼鸭共生田内为 $(-27.4 \pm 0.4)\text{‰}$ (表1),无显著性差异。稻鱼共生田内POM值为 $(-27.4 \pm 0.8)\text{‰}$,低于稻鱼鸭共生田 $(-26.7 \pm 0.5)\text{‰}$,但差异不显著。

稻鱼共生田内河蚌值为 $(-28.7 \pm 0.8)\text{‰}$,河虾的值为 $(-28.7 \pm 0.5)\text{‰}$,浮游动物的值为 $(-28.0 \pm 0.3)\text{‰}$ 与SOM、POM的 $\delta^{13}\text{C}$ 相近,说明颗粒有机物、底栖藻类等是稻鱼共生田中大多数浮游性和底栖性生物的主要碳源;而稻鱼鸭共生田内河蚌值为 $(-30.0 \pm 0.5)\text{‰}$,低于SOM、POM的 $\delta^{13}\text{C}$,但与水生植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 相近。

稻鱼及稻鱼鸭共生田内各种植物样品的 $\delta^{13}\text{C}$ 值相差不大。稻鱼共生田内植物样品的 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围为 $-31.9\text{‰}-26.1\text{‰}$,稻鱼鸭共生田内植物样品的 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围为 $-31.3\text{‰}-28.5\text{‰}$ 。但植物样品之间的 $\delta^{13}\text{C}$ 差异很大,与浮叶植物(眼子菜、荇)、挺水植物(糯稻、长瓣慈姑、矮慈姑)和漂浮植物(槐叶萍、满江红)相比,沉水植物(黑藻)的 $\delta^{13}\text{C}$ 最大(图3),主要原因可能是沉水植物在吸收叶片系统周围水环境中的无机碳源时所发生的缓慢扩散现象增加了对 ^{13}C 的吸收^[23-24]。

稻鱼共生田内鱼的 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 $(-25.1 \pm 0.6)\text{‰}$ 与浮游植物水绵相近,说明鱼食物来源主要来自于浮游层。研究发现,鱼并未直接利用水生高等植物(或其碎屑)。但是这有可能说明水生高等植物(或其碎屑)作为碳源是通过其他方式进入食物网。鸭的食物来源比较复杂,可能来自于植物、可也来自于鱼类或昆虫,主要来自于浮游层,但无法明确。

表 1 稻田多物种生物的稳定同位素组成

Table 1 Stable carbon and nitrogen isotope compositions of multiple species coexistence in rice paddies

样品 Sample name	RF Mean ± SD			RFD Mean ± SD		
	$\delta^{13}\text{C}^{①}/\text{‰}$	$\delta^{15}\text{N}^{②}/\text{‰}$	N	$\delta^{13}\text{C}^{①}/\text{‰}$	$\delta^{15}\text{N}^{②}/\text{‰}$	N
SOM	-27.7 ± 0.3a	0.6 ± 0.3c	3	-27.4 ± 0.4a	0.9 ± 0.2c	6
POM	-27.4 ± 0.8a	-4.4 ± 1.1c	5	-26.7 ± 0.5a	-3.5 ± 0.6d	6
浮游动物 Zooplankton	-28.0 ± 0.3a	3.5 ± 0.6c	5	-27.6 ± 0.7a	2.7 ± 0.2d	5
植物 Plant						
本地糯稻 <i>Oryza sativa</i> L. var glutinous Matsum	-27.3 ± 0.4a	2.5 ± 0.6c	3	-28.5 ± 0.9a	2.3 ± 0.8c	4
长瓣慈姑 <i>Sagittaria sagittifolia</i> L.	-28.7 ± 0.5a	4.1 ± 1.0c	4	-29.3 ± 0.3a	3.9 ± 0.9c	3
矮慈姑 <i>Sagittaria pygmaea</i> Miq.	-31.9 ± 0.5a	4.3 ± 1.7c	3	-30.9 ± 1.1a	5.2 ± 0.6c	3
眼子菜 <i>Potamogeton distinctus</i> A. Benn	-30.2 ± 0.2a	1.8 ± 0.5c	3	-30.6 ± 0.0a	0.5 ± 0.0d	2
黑藻 <i>Hydrilla verticillata</i> (Linn. f.) Royle	-30.8 ± 1.1a	0.8 ± 0.8c	3	-29.4 ± 0.5a	1.6 ± 0.3c	3
槐叶萍 <i>Salvinia natans</i> (L.) All.	-31.7 ± 0.3a	0.9 ± 0.3c	3	-30.1 ± 0.3b	1.5 ± 0.9d	3
满江红 <i>Azolla imbricata</i> (Roxb.) Nakai	-31.1 ± 0.2a	1.3 ± 2.2c	3	-31.3 ± 0.1a	0.8 ± 0.8c	3
苹 <i>Marsilea quadrifolia</i> L.	-28.8 ± 0.7	5.2 ± 0.3	2	-	-	-
水绵 <i>Spirogyra</i> spp.	-26.1	2.6	1	-	-	-
底栖动物 Zoobenthos						
河蚌 <i>Anodonta</i> spp.	-28.7 ± 0.8a	3.18 ± 0.3c	3	-30.0 ± 0.5b	4.3 ± 0.4d	4
节肢动物 Arthropod						
河虾 <i>Macrobrachium</i> spp.	-28.7 ± 0.5	3.8 ± 0.8	3	-	-	-
鱼类 Fish						
田鲤鱼 <i>Cyprinus carpio</i> spp.	-25.1 ± 0.6a	6.8 ± 0.9c	5	-25.8 ± 0.1b	6.4 ± 0.4c	5
鸭子 Duck						
从江水鸭 <i>Anas platyrhynchos domestic</i> 翅	-	-	-	-26.4 ± 0.4a	7.8 ± 0.1a	6
从江水鸭 <i>Anas platyrhynchos domestic</i> 腿	-	-	-	-26.7 ± 0.4a	7.9 ± 0.1a	6
从江水鸭 <i>Anas platyrhynchos domestic</i> 肝	-	-	-	-28.1 ± 0.4b	8.5 ± 0.2b	6

① $\delta^{13}\text{C}$ vs. PDB; ② $\delta^{15}\text{N}$ vs. atmospheric nitrogen; 同一行(列)之后含相同字母表示在 0.05 水平上差异不显著

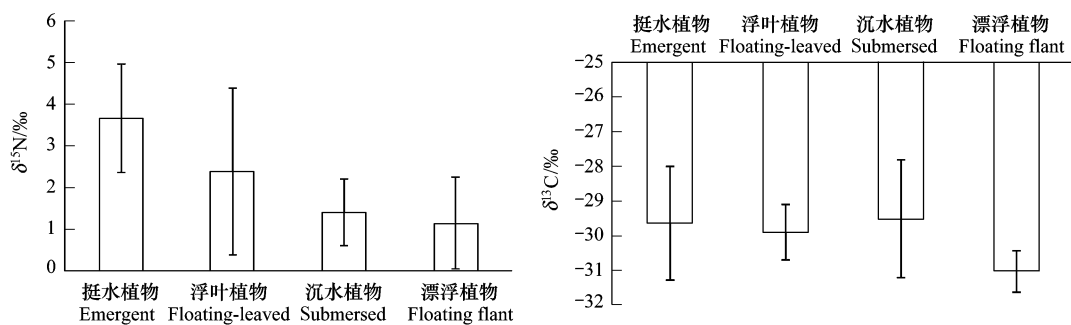


图 3 浮叶植物、挺水植物、漂浮植物以及沉水植物 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 的差异

Fig. 3 Differences of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ between floating-leaved, emergent, floating plant and submersed macrophytes

2.4 氮稳定同位素值分析

稻鱼共生和稻鱼鸭共生稻田生物的 $\delta^{15}\text{N}$ 值,分别在 $(-4.4 \pm 1.1)\text{‰}$ — $(6.8 \pm 0.9)\text{‰}$ 和 $(-3.5 \pm 0.6)\text{‰}$ — $(8.5 \pm 0.2)\text{‰}$ 之间变化,并且从初级生产者到高级消费者逐渐增加(表 1),这说明 $\delta^{15}\text{N}$ 在食物的消化和吸收过程中产生富集^[15]。比较稻鱼和稻鱼鸭的结果可以看出,鸭的 $\delta^{15}\text{N}$ 值高于鱼类和其他动物,说明在该系统中其占据了最高营养位置。稻鱼共生田内鱼的 $\delta^{15}\text{N}$ 为 $(6.8 \pm 0.9)\text{‰}$ 与稻鱼鸭共生田内鱼的 $\delta^{15}\text{N}$ 值 $(6.4 \pm 0.4)\text{‰}$ 无显著性差异,说明鸭的引入并未对鱼的取食习惯造成大的影响,鸭对鱼的营养位置影响不大。稻鱼共生田内 POM 的 $\delta^{15}\text{N}$ 值 $(-4.4 \pm 1.1)\text{‰}$,低于稻鱼鸭共生田内 $(-3.5 \pm 0.6)\text{‰}$,且差异显著,这有可能是

因为鸭的粪便增加了田内的有机质,而鸭的踩水活动,增加了水中的含氧量,由此加快了物质循环的速度。稻鱼共生田内植物的 $\delta^{15}\text{N}$ 在 0.8‰—5.6‰ 之间变化,与稻鱼鸭共生田内植物的 $\delta^{15}\text{N}$ (0.5‰—5.2‰) 相差不大。与浮叶植物、沉水植物和漂浮植物相比,挺水植物的 $\delta^{15}\text{N}$ 最大(图 3)。

2.5 营养位置

由于初级生产者 $\delta^{15}\text{N}$ 的变化可以影响到对食物网中高级生物营养级的判断,一般采用生态系统中常年存在、食性简单的初级消费者作为基线生物^[25],其值是浮游有机物 $\delta^{15}\text{N}$ 的数月或数年的平均值。河蚌 (*Anodonta* spp.) 符合此要求,故本文采用河蚌的氮稳定同位素比值作为计算营养级的基线值,计算稻鱼共生田和稻鱼鸭共生田内的营养级关系(表 2),发现稻鱼共生田内浮游动物的营养级位置在 2.24 ± 0.16 , 鱼的营养级位置在 3.07 ± 0.26 , 均高于其在稻鱼鸭共生田内的营养级。在稻鱼鸭共生田内,由于鸭的引入,和稻鱼共生田相比,鱼的营养级降低为 2.63 ± 0.13 。这主要是因为鱼和鸭有部分生态位重合,并且鸭还可以捕食小鱼。

3 讨论

本文应用碳氮稳定同位素的方法,初步研究了稻鱼、稻鱼鸭多物种共存的食物网结构和营养级关系。研究结果表明,在稻鱼鸭系统中,鱼和鸭部分生态位重叠,引起竞争和互斥。若想减弱此影响,或调整鱼、鸭在稻田活动时间(如,鸭在稻封行前,鱼在稻封行后),构成超体积生态位差异,使鱼鸭之间不仅不存在生态位重叠而引起竞争和其他互斥作用,反而能互相补充地对水稻发挥长效生物防治作用;或在稻田中放养大于一定长度的鱼,以防被鸭伤害。

研究生态系统食物网的传统方法主要是食性分析,即,通过生物在被捕捞前所摄食物即消化道内未被消化的食物来确定生物的食性。其优点是比较直观,而缺点是测量的是捕食者的瞬时摄食情况,存在一定的偶然性,必须增加样品分析数量减少误差,工作量巨大^[26];另外,它不能区分对所摄取食物消化吸收的难易程度^[27],只能通过消化吸收校正以消除该方法本身所带来的误差^[28-29]。稳定同位素分析技术所取的样品是生物身体的一部分或是全部,通过其稳定同位素组成来确定其食性和食物来源,所得到的数据反映的是生物长期生命活动的结果^[30]。将常规的胃含物分析和新技术结合起来可以提供食物来源的综合全面信息。

现代农业的集约化以及农业生物多样性简单化带来的农业系统不稳定性越来越受到关注,增加农业生物的遗传多样性和物种多样性,减少农用化学品投入成为农业生态研究的热点。稻田系统中,水稻与其他湿生作物间种或在稻田中引入鱼、鸭、蟹等其他物种是增加稻田生物多样性的途径。大量研究表明,水稻与其他物种共存可以有效降低杂草生物量,使杂草群落的物种多样性降低,改变杂草的群落结构,有利于限制杂草的发生危害^[31-33]。一般认为,稻鱼共生系统抑制草害的机理,主要是由于鱼对田间杂草的直接取食、掘根、践踏及中耕混水等活动。然而,本次研究中所涉及的 8 科 9 种植物中,作为鱼的食物的植物只有一种,意味着,鱼活动对杂草的抑制作用要大于其直接取食。受数据的影响,本文未能探讨稻鱼鸭系统中鸭的食性及对不同碳源对鸭能量来源的贡献做定量评价。

References:

- [1] Li W H. Agro-Ecological Farming Systems in China. Paris; UNESCO and USA & UK: Parthenon Publishing Group, 2001.
- [2] Evenson R E, Gollan D. Assessing the impact of the Green Revolution, 1960 to 2000. Science, 2003, 300: 758-762.
- [3] Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and Human Well-being: Biodiversity Synthesis. Washington, DC: World Resources Institute, 2005.
- [4] Mooney H A, Cooper A, Reid W. Confronting the human dilemma. Science, 2005, 434: 561-562.

表 2 稻田物种多样性生物相对营养位置

Table 2 Relative trophic level of selective organism

样品 Sample name	营养位置 Trophic level $\pm$ SD	
	RF	RDF
浮游动物 Zooplankton	2.24 ± 0.16	1.52 ± 0.06
底栖动物 Zoobenthos		
河蚌 <i>Anodonta</i> spp.	2.00 ± 0.09	2.00 ± 0.11
节肢动物 Arthropod		
河虾 <i>Macrobrachium</i> spp.	2.18 ± 0.11	—
鱼类 Fish		
田鲤鱼 <i>Cyprinus carpio</i> spp.	3.07 ± 0.26	2.63 ± 0.13
鸭子 Duck		
从江水鸭 <i>Anas platyrhynchos domestic</i>	—	3.11 ± 0.09

- [5] Zhu Y Y, Chen H, Fan J, Wang Y Y, Li Y, Chen J B, Fan J X, Yang S S, Hu L P, Leung H, Mew T W, Teng P S, Wang Z H, Mundt C C. Genetic diversity and disease control in rice. *Nature*, 2000, 406: 718-722.
- [6] Leung H, Zhu Y Y, Revilla-Molina I, Fan J X, Chen H R, Pangga I, Vera Cruz C, Mew T W. Using genetic diversity to achieve sustainable rice diseases management. *Plant Disease*, 2003, 87(10): 1156-1169.
- [7] Jackson L E, Ramirez I, Yokota R, Fennimore S A, Koike S T, Henderson D M, Chaney W E, Calder n, Klonsky K. On-farm assessment of organic matter and tillage management on vegetable yield, soil, weeds, pests, and economics in California, Agriculture. *Ecosystems & Environment*. 2004. 103: 443-463.
- [8] Mäder P, Bach A F, Dubois D, Gunst L, Fried P, Niggli U. Soil fertility and biodiversity in organic farming. *Science*, 2002, 296: 1694-1697.
- [9] Wang H, Tang J J, Xie J, Chen X. Controlling effects of multiple species coexistence on rice diseases, pests and weeds in paddy field ecosystem. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(5): 1132-1136.
- [10] Peterson B J, Howarth R W, Garritt R H. Multiple stable isotopes used to trace the flow of organic matters in estuarine food webs. *Science*, 1985, 227: 1361-1363.
- [11] Vander Zanden J M, Rasmussen B J. Primary consumer $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ and the trophic position of aquatic consumers. *Ecology*, 1999, 80(4): 1395-1404.
- [12] Vander Zanden J M, Casselman M J, Rasmussen B J. Stable isotope evidence for the food web consequences of species invasions in lakes. *Nature*, 1999, 401: 464-467.
- [13] Post D M, Pace L M, Hairston G N Jr. Ecosystem size determines food-chain length in lakes. *Nature*, 2000, 405: 1047-1049.
- [14] Cai D L, Wang R, Bi H S. Trophic relationships in the Bohai ecosystem: preliminary investigation from $\delta^{13}\text{C}$ analysis. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(8): 1354-1358.
- [15] Xu J, Xie P. Studies on the food web structure of Lake Donghu using stable carbon and nitrogen isotope ratios. *Journal of Freshwater Ecology*, 2004, 19(4): 645-650.
- [16] Zhang L, Xu J, Xie P, Zang X P, Qiu G S, Zeng J F. Stable isotope variations in particulate organic matter and a planktivorous fish in the Yangtze River. *Journal of Freshwater Ecology*, 2007, 22(3): 82-86.
- [17] Wang Y Y, Yu X B, Zhang L X 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.
- [18] Junger, M, Planas, D. Quantitative use of stable carbon isotope analysis to determine the trophic base of invertebrate communities in a boreal forest lotic system. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1994, 51, 52-61.
- [19] Mitchell M J, Mills E L, Idrisi N, Michener R. Stable isotopes of nitrogen and carbon in an aquatic food web recently invaded by *Dreissena polymorpha* (Pallas). *Can. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1996, 53: 1445-1450.
- [20] Fry B. Stable Carbon Isotope Ratios — A Tool for Tracing Food Chains. Austin: University of Texas, 1977.
- [21] Post D M. Using stable isotopes to estimate trophic position: models, methods, and assumptions. *Ecology*, 2002, 83(3): 703-718.
- [22] Vander Zanden J M, Cabana G, Rasmussen B J. Comparing trophic position of freshwater fish calculated using stable nitrogen isotope ratios ($\delta^{15}\text{N}$) and literature dietary data. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1997, 54: 1142-1158.
- [23] LaZerte B D, Szalados J E. Stable carbon isotope ratio of submerged freshwater macrophytes. *Limnology and Oceanography*, 1982, 27: 413-418.
- [24] Yoshioka T, Wada E A, Yatsuka S. Isotopic Characterization of Lake Kizaki and Lake Suwa. *Japanese Journal of Limnology*, 1988, 49: 119-128.
- [25] Cabana G, Rasmussen J B. Comparison of aquatic food chains using nitrogen isotopes. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1996, 93: 10844-10847.
- [26] Beaudoin C P, Tom W M, Prepas E E, Wassenaar L I. Individuals specialization and trophic adaptability of northern pike (*Esox lucius*): an isotope dietary analysis. *Oecologia*, 1999, 120: 386-396.
- [27] Hobson K A, Piatt J F, Pitocchelli J. Using stable isotopes to determine seabird trophic relationships. *Journal of Animal Ecology*, 1994, 63: 786-798.
- [28] Kling G W, Fry B O'brien W J. Stable isotopes and planktonic structure in arctic lakes. *Ecology*, 1992, 73(2): 561-566.
- [29] Yoshioka T, Wada E A. Stable isotope study on seasonal food web dynamics in a eutrophic lake. *Ecology*, 1994, 75(3): 835-846.
- [30] Hill A M, Sinars D M, Lodge D M. Invasion of an occupied niche by the crayfish *Orconectes rusticus*: potential importance of growth and mortality. *Oecologia*, 1993, 94: 303-306.
- [31] Wang Y, Lei W C. Studies on ecological effect of planting breeding models in the rice field. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(2): 311-316.
- [32] Yang Z P, Liu X Y, Huang H, Liu D Z, Hu L D, Su W, Tan S Q. A study on the influence of rice-duck intergrowth on spider, rice diseases, insect and weeds in rice-duck complex ecosystem. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(12): 2756-2760.
- [33] Wei S H, Qiang S, Ma B, Wei J G, Chen J W, Wu J Q, Xie T Z, Shen X K. Influence of long-term rice-duck farming systems on the composition and diversity of weed communities in paddy fields. *Journal of Plant Ecology*, 2006, 30(1): 9-16.

参考文献:

- [9] 王寒, 唐建军, 谢坚, 陈欣. 稻田生态系统多个物种共存对病虫草害的控制. *应用生态学报*, 2007, 18(5): 1132-1136.
- [14] 蔡德陵, 王荣, 毕洪生. 渤海生态系统的营养关系: 碳同位素研究的初步结果. *生态学报*, 2001, 21(8): 1354-1358.
- [17] 王玉玉, 于秀波, 张亮, 徐军. 应用碳、氮稳定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.
- [31] 王纘, 雷慰慈. 稻田种养模式生态效益研究. *生态学报*, 2000, 20(2): 311-316.
- [32] 杨治平, 刘小燕, 黄璜, 刘大志, 胡立冬, 苏伟, 谭泗桥. 稻田养鸭对稻鸭复合系统中病、虫、草害及蜘蛛的影响. *生态学报*, 2004, 24(12): 2756-2760.
- [33] 魏守辉, 强胜, 马波, 韦继光, 陈建卫, 吴建强, 谢桐洲, 沈晓昆. 长期稻鸭共作对稻田杂草群落组成及物种多样性的影响. *植物生态学报*, 2006, 30(1): 9-16.

2009 年度生物学科总被引频次和影响因子前 10 名期刊*

(源于 2010 年版 CSTPCD 数据库)

排序 Order	期刊 Journal	总被引频次 Total citation	排序 Order	期刊 Journal	影响因子 Impact factor
1	生态学报	11764	1	生态学报	1.812
2	应用生态学报	9430	2	植物生态学报	1.771
3	植物生态学报	4384	3	应用生态学报	1.733
4	西北植物学报	4177	4	生物多样性	1.553
5	生态学杂志	4048	5	生态学杂志	1.396
6	植物生理学通讯	3362	6	西北植物学报	0.986
7	JOURNAL OF INTEGRATIVE PLANT BIOLOGY	3327	7	兽类学报	0.894
8	MOLECULAR PLANT	1788	8	CELL RESEARCH	0.873
9	水生生物学报	1773	9	植物学报	0.841
10	遗传学报	1667	10	植物研究	0.809

★《生态学报》2009 年在核心版的 1964 种科技期刊排序中总被引频次 11764 次,全国排名第 1;影响因子 1.812,全国排名第 14;第 1~9 届连续 9 年入围中国百种杰出学术期刊;中国精品科技期刊

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 30 卷 第 24 期 (2010 年 12 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 30 No. 24 2010

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@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