

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第 32 卷 第 11 期 Vol.32 No.11 **2012**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 32 卷 第 11 期

2012 年 6 月 (半月刊)

目 次

黑龙江省大兴安岭林区火烧迹地森林更新及其影响因子·····	蔡文华, 杨健, 刘志华, 等 (3303)
基于 B-IBI 指数的温榆河生态健康评价·····	杨柳, 李泳慧, 王俊才, 等 (3313)
川西亚高山暗针叶林不同恢复阶段红桦、岷江冷杉土壤种子损耗特征·····	马姜明, 刘世荣, 史作民, 等 (3323)
老龄阔叶红松林下层木空间分布的生境关联分析·····	丁胜建, 张春雨, 夏富才, 等 (3334)
内蒙古高原荒漠区四种锦鸡儿属植物灌丛沙包形态和固沙能力比较·····	张媛媛, 马成仓, 韩磊, 等 (3343)
角果藜的生长动态及其生殖配置·····	全杜娟, 魏岩, 周晓青, 等 (3352)
基于 MODIS/NDVI 时间序列的森林灾害快速评估方法——以贵州省为例·····	侍昊, 王笑, 薛建辉, 等 (3359)
祁连山西水林区土壤阳离子交换量及盐基离子的剖面分布·····	姜林, 耿增超, 李珊珊, 等 (3368)
水分和温度对春玉米出苗速度和出苗率的影响·····	马树庆, 王琪, 吕厚荃, 等 (3378)
施氮对水稻土 N ₂ O 释放及反硝化功能基因 (<i>narG/nosZ</i>) 丰度的影响·····	郑燕, 侯海军, 秦红灵, 等 (3386)
中国西北潜在蒸散时空演变特征及其定量化成因·····	曹雯, 申双和, 段春峰 (3394)
基于植被降水利用效率和 NDVI 的黄河上游地区生态退化研究·····	杜加强, 舒俭民, 张林波 (3404)
异速生长法计算秋茄红树林生物量·····	金川, 王金旺, 郑坚, 等 (3414)
乌兰布和沙漠沙蒿与油蒿群落的物种组成与数量特征·····	马全林, 郑庆中, 贾举杰, 等 (3423)
不同光强下单叶蔓荆的光合蒸腾与离子累积的关系·····	张萍, 刘林德, 柏新富, 等 (3432)
浑善达克沙地沙地榆种子雨的扩散规律·····	谷伟, 岳永杰, 李钢铁, 等 (3440)
咸水灌溉对沙土土壤盐分和胡杨生理生长的影响·····	何新林, 陈书飞, 王振华, 等 (3449)
外源 NO 对 NaHCO ₃ 胁迫下黑麦草幼苗光合生理响应的调节·····	刘建新, 王金成, 王鑫, 等 (3460)
呼伦贝尔草地植物群落与土壤化学计量学特征沿经度梯度变化·····	丁小慧, 罗淑政, 刘金巍, 等 (3467)
海南稻田土壤硒与重金属的含量、分布及其安全性·····	耿建梅, 王文斌, 温翠萍, 等 (3477)
江苏省典型区农田土壤及小麦中重金属含量与评价·····	陈京都, 戴其根, 许学宏, 等 (3487)
应用稳定同位素研究广西东方洞食物网结构和营养级关系·····	黎道洪, 苏晓梅 (3497)
利用细胞计数手段和 DGGE 技术分析松花江干流部分地区的细菌种群多样性·····	屠腾, 李蕾, 毛冠男, 等 (3505)
中国主要入海河流河口集水区划分与分类·····	黄金良, 李青生, 黄玲, 等 (3516)
基于 VGPM 模型和 MODIS 数据估算梅梁湾浮游植物初级生产力·····	殷燕, 张运林, 时志强, 等 (3528)
低温胁迫下虎纹蛙的生存力及免疫和抗氧化能力·····	王娜, 邵晨, 颜志刚, 等 (3538)
转 Bt 水稻土壤跳虫群落组成及其数量变化·····	祝向钰, 李志毅, 常亮, 等 (3546)
尼日利亚非洲蜂和安徽意大利蜜蜂及其杂交二代形态特征与微卫星 DNA 遗传多样性·····	余林生, 解文飞, 巫厚长, 等 (3555)
北京城市公园湿地休憩功能的利用及其社会人口学因素·····	李芬, 孙然好, 陈利顶 (3565)
基于协整理论的经济增长与生态环境变化关系分析——以重庆市渝东南地区为例·····	肖强, 胡聃, 肖洋, 等 (3577)
感潮河网区环境合作博弈模型及实证·····	刘红刚, 陈新庚, 彭晓春 (3586)
专论与综述	
国内外生态效率核算方法及其应用研究述评·····	尹科, 王如松, 周传斌, 等 (3595)
全球变化背景下的现代生态学——第六届现代生态学讲座纪要·····	温腾, 徐德琳, 徐驰, 等 (3606)
问题讨论	
流域环境要素空间尺度特征及其与水生态分区尺度的关系——以辽河流域为例·····	刘星才, 徐宗学, 张淑荣, 等 (3613)
研究简报	
不同光照强度对兴安落叶松几种主要防御蛋白活力的影响·····	鲁艺芳, 石蕾, 严善春 (3621)
木荷种源间光合作用参数分析·····	熊彩云, 曾伟, 肖复明, 等 (3628)
基于能值分析的深圳市三个小型农业生态系统研究·····	杨卓翔, 高阳, 赵志强, 等 (3635)

期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 342 * zh * P * ¥70.00 * 1510 * 37 * 2012-06



封面图说: 爬升樟木沟的暖湿气流——樟木沟是中国境内横切喜马拉雅山脉南坡的几条著名大沟之一, 它位于我国西藏聂拉木县境内的希夏邦马峰东南侧, 延绵 5400km 的 318 国道在此沟中到达其最西头。从聂拉木县城到樟木口岸短短的 30km 中, 海拔从 4000m 急降至 2000m。在大气环流作用下, 来自印度洋的暖湿气流沿樟木沟不断费力地往上爬升, 给该沟谷留下了大量的降水。尤其是在雨季到来时, 山间到处是流水及悬垂崖头的瀑布, 翠峰直插云霄, 森林茂密苍郁, 溪流碧澄清澈, 奇花异葩繁多, 风景美如画卷, 气势壮丽非凡。

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

DOI: 10.5846/stxb201103040264

黎道洪, 苏晓梅. 应用稳定同位素研究广西东方洞食物网结构和营养级关系. 生态学报, 2012, 32(11): 3497-3504.

Li D H, Su X M. The studies on the food web structures and trophic relationships in Guangxi Dongfang Cave by means of stable carbon and nitrogen isotopes. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(11): 3497-3504.

应用稳定同位素研究广西东方洞 食物网结构和营养级关系

黎道洪*, 苏晓梅

(贵州师范大学生命科学学院, 贵阳 550001)

摘要: 稳定性同位素技术已经成为研究生态系统食物网结构和营养级关系及其动态变化的重要手段。应用稳定同位素技术($\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$) 研究了东风洞的食物网结构和营养级关系。研究表明, 东风洞主要为腐食食物链, 由于在洞穴内黑暗带中无光照也无植物生长, 所以碳源主要为东风洞中的土壤有机质, 作为第一营养级; 主要摄食关系为马陆与土壤有机物质, 螺类与土壤有机物质等; 在该洞生态系统中, 将 3 种马陆直接作为初级消费者, 以隅蛛和其它马陆平均值之间的差值(2.04‰) 作为东风洞食物网稳定氮同位素的富集因子。根据营养级模型可知, 马陆类群、细长钻螺等土壤动物, 裸灶螽和涂闪夜蛾形成第二营养级, 即初级消费者; 第三营养级包括蜘蛛类、盲蛛、地蜈蚣以及黑眶蟾蜍, 为次级消费者。

关键词: $\delta^{13}\text{C}$; $\delta^{15}\text{N}$; 食物网; 东风洞; 广西省

The studies on the food web structures and trophic relationships in Guangxi Dongfang Cave by means of stable carbon and nitrogen isotopes

LI Daohong*, SU Xiaomei

School of Life Sciences, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China

Abstract: The stable carbon and nitrogen isotope technology is an effective method to study the structure and dynamics of food webs and trophic relationships in ecosystems. The stable carbon and nitrogen isotopes ($\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$) are used to investigate food web and trophic relationships of the Guangxi Dongfang Cave in this study. The Dongfang cave located in Fuwang Village, Putao Town, Yangshuo County, Guangxi Province was investigated in July 2007. In this cave, 13 animal samples and 3 soil samples were collected for estimation of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$. The results indicated the great range of $\delta^{13}\text{C}$ values from -19.83‰ (*Pholcus crypticcolens*) to -27.27‰ (*Sypna picta*). The samples of *Pholcus crypticcolens* and *Steatoda phalerata* have higher $\delta^{13}\text{C}$ values than other spider groups, since the food source of the two species contains other insects. The range of $\delta^{15}\text{N}$ value is from 2.62‰ (soil organic matter) to 5.64‰ (Geophiidae). The enrichment of $\delta^{15}\text{N}$ in the food-web is more obvious than that of $\delta^{13}\text{C}$. For example, the different value of $\delta^{15}\text{N}$ between diplopod and soil organic value is 1.16‰, and the difference of $\delta^{15}\text{N}$ value *Distrammena* sp. and *Sypna picta* from soil organic matters is from 1.24‰ to 1.36‰. The gnawer food chains take a main role in the Dongfang cave, because there is no illumination and plant in the dark area of the cave, and the soil organic matters is the main carbon sources as the first trophic level. The mainly prey relations are diplopod or snails to soil organic matters etc. In the ecosystem of this cave, 3 species of diplopod are the primary consumers, and the difference value (2.04‰) between *Tegettarina* sp. and other diplopods is the enrichment ratio

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31060287)

收稿日期: 2011-03-04; 修订日期: 2012-03-07

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: daohongli88@163.com

of the stable nitrogen isotope of the food-web in Dongfeng cave. According to trophic model, the primary consumers are soil animals (such as diplopod groups, and *Opeas gracile*), *Sypna picta*, and *Distrammena* sp., as the second trophic level (that is the primary consumers). The third trophic level includes spiders groups, *Systemocentrus* sp., Geophiidae, and *Bufo mdanostictus* as the secondary consumers. The composition of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ or the enrichment ratios to $\delta^{15}\text{N}$ at all levels of consumers in the karst caves are generally lower than those in the earth surface ecosystem where on the composition and the enrichment ratio of $\delta^{15}\text{N}$, *Passer montanus* in Maduo County of Qinghai Province has $(7.77 \pm 0.53)\text{‰}$, *Macrobrachium nipponense* and *Carassius auratus* in Xingzi County of Jiangxi Province $(14.3 \pm 0.5)\text{‰}$ and $(10.8 \pm 0.9)\text{‰}$ respectively. Their average enrichment ratio of $\delta^{15}\text{N}$ among different trophic levels of the earth surface ecosystem is $(3.4 \pm 1.1)\text{‰}$. In the Dongfeng cave, however, the highest value of $\delta^{15}\text{N}$ is Geophiidae (5.64‰) , and the enrichment ratio of ecosystem is only 2.04‰ . Its reasons of low enrichment may be the effect of food source and life metabolism on $\delta^{15}\text{N}$ of living beings in karst caves where there are poor food, small life body, low oxygen consumption, and low metabolic process.

Key Words: $\delta^{13}\text{C}$; $\delta^{15}\text{N}$; Food web; Dongfeng cave; Guangxi Province

关于洞穴生物的研究,国内外均有不少报道,在国外对洞穴生物特别是洞穴动物的研究较广泛且较深入,如对洞穴动物的分类^[1]、区系^[2]、生态^[3-4]、物种和群落多样性^[5-6]、遗传变异^[7-8]、繁殖^[9]、起源和演化^[10]等。在国内对洞穴动物的研究不论从深度和广度来看和国外相比都有较大的差距,可以说,还处于起步阶段。目前,研究的内容主要集中在形态分类^[11]、个别类群的生态^[12]、一些类群的区系分析^[13]、群落结构研究^[14]、洞穴动物与部分环境因子的关系研究^[15]等。对洞穴动物的生态地理特征、生态变异研究、生理学研究、起源和演化研究等几乎是一片空白。

传统研究动物食性的方法主要是对消化道内的食物成分进行分析,但胃(肠)含物分析主要反映生物被捕提前短期内的摄食情况,动物摄食和吸收过程中对食物的咀嚼作用和消化作用会影响研究人员对食物的鉴定。因为不同的食物类型被消化吸收的速度不同,所以快速吸收的食物作用通常会被低估。同时,胃(肠)含物分析试图将不同的食物来源按种类、生活环境以及摄食的特殊性进行分类,但事实上这些食物来源本身也分别代表了不同营养级,况且洞穴中的动物多为较小的动物(如裸灶螽、马陆、蜘蛛等)很难对它们进行胃含物的分析。且在试验室难以重建复杂的野外环境,室内喂食试验在大多数的情况下不能真正反映自然环境中生物的摄食行为,因此在研究自然环境中生物的营养级位置的过程中,多数传统的方法具有自身的局限性。有机碳的稳定同位素组成方法所取得样品是生物身体的一部分或是全部,通过稳定同位素组成来确定其食性和食物来源,所得数据是反映生物长期生命活动的结果,较消化道内含物分析法稳定准确^[16]。近年来,稳定性同位素技术(尤其是碳氮稳定性同位素)为食物网研究提供了一种非常有效的研究手段^[17]。一些研究者在研究动物碳同位素组成与食物关系中发现,动物 $\delta^{13}\text{C}$ 值与其食物 $\delta^{13}\text{C}$ 值相差甚微(平均不到 0.8‰),且发现同种动物在食用不同食物时其同位素组成有明显差异,而不同种动物在食用不同食物时其同位素组成却十分相近^[18]。动物进食过程中氮稳定性同位素比率($\delta^{15}\text{N}$)会产生富集。营养级传递过程中,消费者的 $\delta^{15}\text{N}$ 比食物的 $\delta^{15}\text{N}$ 高 $(3.4 \pm 1.1)\text{‰}$ (变化范围为 0.9‰ — 9.2‰)^[19]。因此,可以通过碳、氮稳定性同位素技术确定自然的或者人为产生的碳源和氮源,并且以此来跟踪生态系统食物网中同化吸收的行为或过程以及传递途径等^[20]。

应用 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 稳定性同位素技术研究喀斯特洞穴这个特殊环境中的食物网结构和营养级关系到目前为止在国内外还未见报道。为此,本文以广西东风洞为例应用 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 稳定性同位素技术来研究洞穴食物网结构和营养级关系,对了解洞穴生态系统中的物质循环和能量流动具有重要意义。本文的初步研究意在探索一些洞穴环境中的生态学问题,为将来更深一步的研究洞穴生态系统提供一些有用的资料,现将研究结果报道如下。

1 环境概况

东风洞位于广西省阳朔县葡萄镇福旺村,洞口开口于半山腰,洞口地理位置为 N 24°54′40.6″, E 110°22′48.2″,洞口标高约 200 m,朝向正北,宽 3—4 m,高 8—9 m,植被丰富,禾本科和藤本植物较多。东风洞为一盲洞,全长 419 m。有光带长 16 m,相对湿度为 90%,洞顶钟乳石发育不成熟,洞壁较干燥,长有少量的地衣、苔藓和蕨类植物,洞底散布大量的碎石。弱光带长 7 m,相对湿度为 95%,洞顶有少量的钟乳石,洞壁较光滑湿润,洞底有大量的穴珠散布,沙土较多。黑暗带最长为 406 m,相对湿度为 99%,在进入黑暗带约 143 m 处有一大的水塘,此光带钟乳石发育成熟,洞顶有大量发育良好的钟乳石,洞壁有大量的石幔、石瀑等,洞底泥土较多,有少量的碎石。

2 研究方法

2.1 野外调查方法

2007 年 7 月在广西省阳朔县葡萄镇福旺村对东风洞进行了较为详细的调查。地理坐标和海拔高度用美国出产的奇遇(eTrex Venture)GPS 接收机进行测定。温、湿度的测定采用北京亚光仪器有限公司生产的 JWS A2-2 型温湿度表。用软镊、吸管或网捕等方法采集洞穴动物标本,用 75% 酒精固定保存,带回室内鉴定和检测。在不同的光带分别设 3 个样方采集土壤,在各光带分别取 3 个样方的混合表层土(0—5 cm)1 kg,在土壤样品中放上标签带回室内检测。

2.2 室内工作方法

2.2.1 土壤样品的处理

已有研究表明,冷冻样品与冻干样品的稳定性同位素比率没有显著差异^[21]。用盐酸酸化的过程会影响样品的氮同位素比率^[22-23],所以,在样品需要酸化处理的情况下,分为两个部分,一部分酸化用于碳稳定性同位素比率的测定,另外一部分不酸化用于氮稳定性同位素比率测定^[24]。将土壤分为两份,一份用过量的 1 mol/L 盐酸溶液酸化处理,以便除去可能影响 $\delta^{13}\text{C}$ 测量的碳酸钙等碳酸盐,酸化后的土壤溶液用蒸馏水冲洗,干燥后测其 $\delta^{13}\text{C}$ 。另一份土壤不经酸化处理,用于测定 $\delta^{15}\text{N}$ 值。两份样品均放在恒温箱中,60 °C 烘干至恒重,用研钵研磨呈均匀的粉末,放入干燥器中保存待测。

2.2.2 动物标本的处理

首先用镜检的方法对洞穴动物标本进行鉴定和分类,然后分种或类群放置于恒温箱中,在 60 °C 条件下烘干至恒重,用研钵研磨呈均匀的粉末,放入干燥器中保存待测。有壳的动物,如螺类,去壳仅取其肌肉部分作为稳定性同位素分析的样品,因为生物壳中 $\delta^{13}\text{C}$ 的含量较高,不能真实反映其捕食者的实际吸收情况;两栖类取其背部的肌肉,因肌肉样品的 $\delta^{13}\text{C}$ 与整只动物的 $\delta^{13}\text{C}$ 相近,可以代表整只动物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值^[25]。

2.2.3 样品稳定性同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 的测定

由中国科学院环境地球化学国家重点实验室测定,分析仪器为 EURO EA-3000 和同位素比率质谱仪 CF-IRMS,型号为 EA-ISOProme。本论文的碳稳定性同位素数据均采用 PDB 国际标准,氮稳定性同位素数据采用空气中氮气的标准,单位为‰,仪器测量误差均小于 0.05‰。

3 结果与分析

在东风洞中共采集到 13 种动物,3 个土壤样品,对各样品的 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 值进行了测定,然后对食物网结构和营养级关系进行分析,检测结果见表 1。

3.1 东风洞洞穴生态系统所采样品的 $\delta^{13}\text{C}$ 值的动态变化

从表 1 中可以看出, $\delta^{13}\text{C}$ 值的范围从最大值 -19.83‰(隐匿幽灵蛛 *Pholcus crypticolens*) 到最小值 -27.25‰(涂闪夜蛾 *Sypna picta*),各值之间跨度较大。隐匿幽灵蛛和十字姬腹蛛 *Steatoda phalerata* 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值较其他蛛类高,其因可能这两个种类的食物源还有其他昆虫类等,但本次研究未获得昆虫标本,故不能作进一步深入分析。一些研究表明,相邻营养级间 $\delta^{13}\text{C}$ 值的差值($\Delta\delta^{13}\text{C}$)较小,约为 0.4‰—1.0‰,使 $\delta^{13}\text{C}$ 值在动物营养级研究方面受到限制^[26]。但本次研究的结果并没有发现稳定的 $\delta^{13}\text{C}$ 值的富集现象。其中土壤有机

质与马陆类群、细长钻螺 *Opeas gracile* 的 $\delta^{13}\text{C}$ 富集值约为 1‰,地蜈蚣 Geophiidae 与涂闪夜蛾之间的 $\delta^{13}\text{C}$ 的富集值约为 1.21‰,其他生物之间没有发现稳定的富集现象,究其原因:①因为洞穴中动物的种类和数量都较少,有的物种只采到一只,在采集过程中作为某些动物食源的物种没有采集到,(例如,蜘蛛类群所食的昆虫种类在此次采集中没有获得),从而难以测定其 $\delta^{13}\text{C}$ 值,导致在营养级关系的分析过程中出现断层。②洞穴中动物个体一般都较小,此次所采样本中,除黑眶蟾蜍 *Bufo mdanostictus* 为两栖类外,所有其他动物皆为无脊椎动物(最大的种类如蜈蚣也只有 5 cm),因此很难进行胃含物的分析。此次洞穴动物的采集时间为 7 月初期,黑眶蟾蜍个体较小,是刚由幼体蝌蚪发育为初成体,也没能进行胃含物分析,故不能进行食性调查做辅助分析。

表 1 东风洞洞穴生态系统样品 $\delta^{15}\text{N}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 组成及样品数和营养级

Table 1 The trophic position, $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{13}\text{C}$ values and sample numbers in the Dongfeng cave ecosystem				
样品 Sample name	$\delta^{13}\text{C}$ /‰	$\delta^{15}\text{N}$ /‰	样品数 Sample numbers	营养层次 Trophic level
土壤有机质 SOM	-26.94	2.62	3	1
盲蛛 <i>Systenocentrus</i> sp.	-25.04	4.95	2	2.67
地蜈蚣 Geophiidae	-26.04	5.64	1	3.00
黑眶蟾蜍 <i>Bufo mdanostictus</i>	-22.95	5.02	2	2.70
隅蛛 <i>Tegettaria</i> sp.	-24.14	5.63	5	3.00
涂闪夜蛾 <i>Sypna picta</i>	-27.25	3.89	2	2.15
裸灶螽 <i>Distrammena</i> sp.	-25.56	3.98	2	2.19
草马陆 <i>Junceustreptus</i> sp.	-25.87	3.78	2	2.09
细长钻螺 <i>Opeas gracile</i>	-25.83	3.49	5	1.95
中华疣蛛 <i>Ulobuous sinensis</i>	-23.36	5.43	8	2.90
隐匿幽灵蛛 <i>Pholcus crypticolens</i>	-19.83	5.15	10	2.76
十字姬腹蛛 <i>Steatoda phalerata</i>	-21.73	5.58	7	2.98
足雕背马陆 <i>Podoglyphiulu</i> sp.	-25.49	3.39	3	1.90
雕饰姬马陆 <i>Glyphiulus valgatus</i>	-24.54	3.61	3	2.01

表 1 中数据表明,草马陆 *Junceustreptus* sp.、足雕背马陆 *Podoglyphiulu* sp. 和雕饰姬马陆 *Glyphiulus valgatus* 这 3 种马陆的 $\delta^{13}\text{C}$ 值较接近,从而说明其食物组成和生活习性可能较相似。

3.2 东风洞洞穴生态系统所采样品的 $\delta^{15}\text{N}$ 值的动态变化

从表 1 中看出, $\delta^{15}\text{N}$ 值的变化范围从土壤有机质的 2.62‰到地蜈蚣的 5.64‰。与 $\delta^{13}\text{C}$ 相比, $\delta^{15}\text{N}$ 在食物网中富集更为明显,例如,马陆与土壤有机质的 $\delta^{15}\text{N}$ 差值为 1.16‰,裸灶螽 *Distrammena* sp. 和涂闪夜蛾与土壤有机质的 $\delta^{15}\text{N}$ 的差值在 1.24‰—1.36‰的范围内。有关富集因子即 $\Delta\delta^{15}\text{N}$ 值应从实际捕食关系中(观察到的)或是统计学角度(与主要食物间的差值)确定^[27],本文则是从统计学的角度来确定东方洞中生态系统的富集因子。在本洞中,一些主要摄食关系的生物(如马陆与土壤有机物质、螺类与土壤有机物质、隅蛛与马陆等),可以通过它们的平均稳定性氮同位素比值差异来确定其富集因子,在该系统中,将 3 种马陆直接作为初级消费者,以隅蛛和其它马陆平均值之间的差值(2.04)作为东风洞食物网稳定氮同位素的富集因子。与食物相比,消费者的稳定性氮同位素比率约增加 3‰,平均值为 $(3.4 \pm 1.1)\text{‰}$,变化范围为 -0.5‰—9.2‰^[28-29]。稳定性氮同位素比率的增加在不同物种和不同生态系统中也存在变化^[30]。

3.3 东风洞洞穴生态系统食物网结构和营养级关系

在动物营养级关系研究中, $\delta^{15}\text{N}$ 应用得最多,其次是 $\delta^{13}\text{C}$,也有一小部分应用 D^[31]。通过对生态系统食物网中 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 的分布特征研究,更进一步确定了 $\delta^{15}\text{N}$ 是一种好的营养层次指示剂^[32]。Hobson 和 welch^[33]测定了每一营养级的 $\delta^{15}\text{N}$ 富集作用为 $+3.8 \times 10^{-3}$ 。生物中 $\delta^{15}\text{N}$ 值受食物源和生物新陈代谢两方面的因素影响,生物的新陈代谢会引起同位素的分馏,使 $\delta^{15}\text{N}$ 同位素在生物体内进一步富集,这样逐级富集重

同位素从而实现了不同营养级间同位素的富集作用^[34]。有许多研究表明,在一定环境条件下,动物组织 $\delta^{15}\text{N}$ 值在相邻营养级间差异 ($\Delta\delta^{15}\text{N}$) 明显,且比较恒定, $\Delta\delta^{15}\text{N}$ 值大约为 3.0‰—5.0‰^[26],因此,只要测得已知相邻营养级间动物组织的 $\delta^{15}\text{N}$ 值,就可以划分动物的营养级位置。本文用稳定同位素 $\delta^{15}\text{N}$ 来研究和划分东风洞内生态系统的营养级。其具体的计算公式如下:

$$\text{营养级水平} = \lambda + (\delta^{15}\text{消费者} - \delta^{15}\text{比率}) / \Delta\delta^{15}\text{N}$$

式中, δ^{15} 比率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, δ^{15} 比率为初级生产者 $\delta^{15}\text{N}$,而当 $\lambda=2$ 时, δ^{15} 比率为初级消费者 $\delta^{15}\text{N}$;当消费者营养级大于 2 时,营养级一般为非整数^[35],也就是说消费者消费的不单是同一营养级的食物)。将计算数据代入公式,即得到下式:

$$\text{营养级水平} = 2 + (\delta^{15}\text{N}_{\text{消费者}} - \delta^{15}\text{N}_{\text{马陆}}) / 2.04$$

式中,2 为马陆的营养层次;2.04 为 $\delta^{15}\text{N}$ 富集因子。这样,我们通过测定稳定性氮同位素就能得出生物体所在食物网的营养层次(表 1),同时可以看出东风洞穴中所获样本组成的食物网的营养层次长度为 3 级(图 1)。

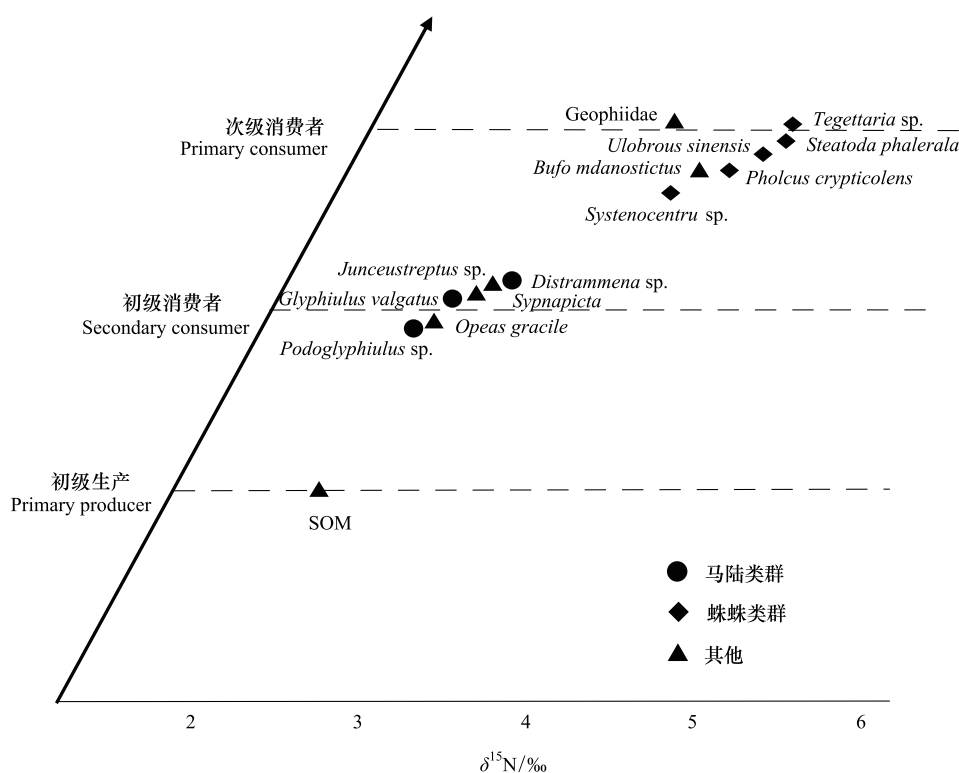


图 1 东风洞穴生态系统食物网中各样品营养级位置

Fig. 1 The trophic position of samples in the food web of Donggeng cave ecosystem

本研究结果显示,在东风洞洞穴生态系统中食物网结构和营养级关系的变化,主要为腐食食物链,其初级生产者主要是土壤中的有机物质,因为植物、苔藓或地衣等能够进行光合作用的生产者主要分布在洞口段,在洞穴黑暗带没有进行光合作用的生产者,且此研究所用标本皆来自于东风洞黑暗带,营养来源主要来自于土壤中的有机物质,马陆类群、细长钻螺等土壤动物主要以此为食,形成第二营养级,即初级消费者,其中裸灶螽、涂闪夜蛾也属于第二营养级。以此类推,利用营养级模型可以得知第三营养级为蜘蛛类、盲蛛 *Systemocentru* sp.、地蜈蚣以及黑眶蟾蜍。根据土壤有机质和各种(类)动物的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 组成及所处的营养级位置,便结合我们在贵州河边洞(N26°36'18", E106°48'42")、贵州龙洞(N 26°57'48.7", E105°43'54.6")、贵州黑洞(N 27°04'37.2", E 105°40'24.4")观察到一些动物的取食情况,即可构建出东方洞洞穴生态系统的食物网结构图(图 2)。

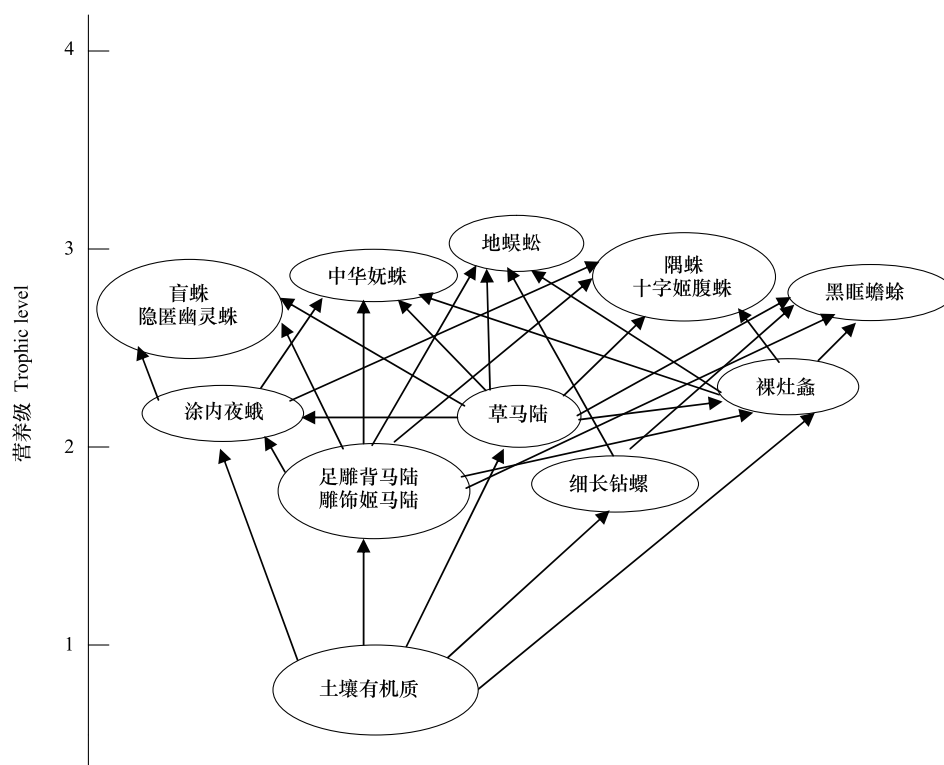


图2 东方洞穴生态系统食物网结构

Fig. 2 Structure on the food web of Dongfang cave ecosystem

为使图简化清晰,将营养级相近的蜘蛛类和马陆类合并在一起

从图2可看出,在东方洞内,初级生产者是土壤有机质,初级消费者马陆类、螺类、裸灶螽、涂闪夜蛾主要以土壤有机质为食,次级消费者蜘蛛类、蜈蚣、黑眶蟾蜍又以马陆类、螺类、裸灶螽、涂闪夜蛾为食。根据实地观察,同一营养级的消费者又有互相残食的情况,如同一营养级的初级消费者裸灶螽和涂闪夜蛾就残食马陆类,所以,在各营养级之间、生产者和消费者之间、消费者和消费者之间以及各生物类群之间就构成了一个错综复杂的食物网络系统。

4 讨论

本研究利用稳定性碳氮同位素方法调查了东风洞所获生物的种间关系,其中稳定性碳同位素比值直观地反映了各生物间的食物关系,而建立的稳定性氮同位素比值和营养层次的关系模型准确地计算了各生物间的营养层次,即东风洞洞穴生态系统食物网中的初级生产者是土壤有机质为第一营养级,初级消费者马陆类群、细长钻螺等土壤动物、裸灶螽、涂闪夜蛾是第二营养级,次级消费者蜘蛛类、盲蛛、地蜈蚣以及黑眶蟾蜍是第三营养级。

喀斯特洞穴是一个特殊的地下生态系统,和地表相比较,其特点是在黑暗带无光、无植物分布、温度较恒定、湿度较高(90%以上)、食物很贫乏等^[36]。稳定同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 的来源是生产者,在地表陆地上是植物,因为消费者的同位素分布模式受生产者比如植物的稳定同位素组成的影响^[37];在水生生态系统中,浮游动物、浮游植物和颗粒有机质为初级生产者,即基准物质^[38]。但在黑暗的喀斯特洞穴内由于无植物分布,所以,初级生产者则是土壤有机质,土壤有机质是影响群落多样性变化的主流因子之一^[15]。

从各级消费者动物的稳定同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 组成和对 $\delta^{15}\text{N}$ 的富集系数看,在喀斯特洞穴内普遍比地表生态系统低,特别是 $\delta^{15}\text{N}$ 组成和富集系数,如在地表陆地生态系统中高原麝鼠的 $\delta^{15}\text{N}$ 组成为 $(5.27 \pm 1.20)\text{‰}$,小云雀为 7.06‰ ,树麻雀为 $(7.77 \pm 0.53)\text{‰}$ ^[37];在水生食物网中,江西吴城县的中华圆田螺 $\delta^{15}\text{N}$ 组成为 $(6.1 \pm 0.9)\text{‰}$,江西星子县日本沼虾为 $(14.3 \pm 0.5)\text{‰}$,鲤鱼为 $(10.6 \pm 0.1)\text{‰}$,鲫鱼为 $(10.8 \pm 0.9)\text{‰}$ ^[38]。

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,在地表生态系统中,不同营养级间的 $\delta^{15}\text{N}$ 富集系数的平均值为 3.4‰^[39]。在本文中 $\delta^{15}\text{N}$ 组成最高的是地蜈蚣(5.64‰),东方洞穴生态系统的富集系数为 2.04‰,不论是 $\delta^{15}\text{N}$ 组成或是富集系数都比地表要低,就其原因,生物中 $\delta^{15}\text{N}$ 值受食物源和生物的新陈代谢两方面的影响^[34],在喀斯特洞穴内生活的动物个体较小、耗氧量降低而新陈代谢缓慢^[40],故喀斯特洞穴动物的 $\delta^{15}\text{N}$ 组成和生态系统中的富集系数比地表低。但初级生产者土壤有机质的 $\delta^{15}\text{N}$ 组成较高(2.62‰),在地表的稻-鱼农田中的底泥有机质, $\delta^{15}\text{N}$ 的组成仅为(0.6±0.3)‰^[41],影响土壤有机氮同位素组成的因素除早期成岩作用及其它环境因子外,有机氮的来源也是重要的影响因素,如初级生产力^[42]和外源有机氮的输入^[43]等,所以,其因可能与东方洞周围厂矿排出的污染物通过岩缝渗水沉积到洞穴土壤中有关。

碳、氮稳定性同位素技术已经成为生态学家研究生态系统特征与过程的重要手段之一。本文应用碳、氮稳定性同位素技术探讨了食物网结构、营养级关系等一系列生态学问题,为进一步探讨洞穴生态系统的结构和功能起到了积极的促进作用。综上所述,稳定性同位素技术为探讨生态系统食物网结构和生物营养级关系、理解和认识生态系统的特征和过程(包括物质循环、能量流动和信息传递)以及洞穴生态系统对环境变化的响应等方面提供了强有力的技术支持。

References:

- [1] Pinto-Da-Rocha R, MacHado G, Weygoldt P. Two new species of *Charinus* Simon, 1892 from Brazil with biological notes (Arachnida; Amblypygi; Charinidae). *Journal of Natural History*, 2002, 36(1): 107-118.
- [2] Decu V G. A review of the terrestrial cavernicolous fauna of Romania. *Bulletin of the National Speleological Society*, 1983, 45(4): 86-97.
- [3] Trajano E. Ecology of subterranean fishes: an overview. *Environmental Biology of Fishes*, 2001, 62(1/3): 133-160.
- [4] Elliott W R. Conservation of the North American cave and karst biota. *Ecosystems of the World Series*, 1998, 30: 665-689.
- [5] Bichuette M E, Trajano E. A population study of epigean and subterranean *Potamolithus* snails from southeast Brazil (Mollusca: Gastropoda: Hydrobiidae). *Hydrobiologia*, 2003, 505(1/3): 107-17.
- [6] Peck S B. Community composition and zoogeography of the invertebrate cave fauna of Barbados. *the Florida Entomologist*, 1981, 64(4): 519-527.
- [7] Goodman S J. Patterns of extensive genetic differentiation and variation among European harbor seals (*Phoca vitulina vitulina*) revealed using microsatellite DNA polymorphisms. *Molecular Biology and Evolution*, 1998, 15(2): 104-118.
- [8] Dowling T E, Martasian D P, Jeffery W R. Evidence for multiple genetic forms with similar eyeless phenotypes in the blind cavefish, *Astyanax mexicanus*. *Molecular Biology and Evolution*, 2002, 19(4): 446-455.
- [9] Criffith D M. The effects of substrate moisture on survival of adult cave beetles (*Neaphaenops tellkampfi*) and cave cricket eggs (*Hadenocerus subterraneus*) in a Sandy deep cave site. *Bulletin of the National Speleological Society*, 1991, 53(2): 98-103.
- [10] Culver D C. *Cave Life: Evolution and Ecology*. Cambridge: Harvard University Press, 1982: 189-189.
- [11] Li D H, Luo T C, Chen D N. A new species of land snail from Guizhou Province, China (Pulmonata, Stylommatophora, Clausiliidae). *Acta Zootaxonomica Sinica*, 2003, 28(3): 446-447.
- [12] Deng S Q, Li D H. The preliminary study of cave spiders in Libo in of Guizhou. *Journal of Guizhou Normal University: Natural Sciences*, 2008, 26(4): 1-5.
- [13] Chen D N, Li D H, Luo T C. Study on fauna of freshwater and land snails from cave of Guizhou Province, China, with descriptions of a new species (prosobranchia, pulmonata, mesogastropoda, stylommatophora). *Acta Zootaxonomica Sinica*, 2003, 28(4): 614-620.
- [14] Li D H, Luo R, Chen H. Study on the animal communities in Dadongkou Cave, Guizhou Province. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(1): 126-130.
- [15] Li D H. The correlation between the environmental factors and animal community structure in Boduo cave and Jialiang cave of Guizhou Province. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(6): 2167-2176.
- [16] 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(3): 303-306.
- [17] Michener R H, Schell D M. Stable isotope ratios as tracers in marine aquatic food webs//Lajtha K, Michener R H, eds. *Stable Isotopes in Ecology and Environmental Science*. Oxford: Blackwell, 1994: 13-157.
- [18] DeNiro M J, Epstein S. Influence of diet on the distribution of carbon isotopes in animals. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1978, 42(5): 495-506.
- [19] Smith B N, Epstein S. Two categories of $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratios for higher plants. *Plant Physiology*, 1971, 47(3): 380-384.
- [20] Fry B. Using stable isotopes to monitor watershed influences on aquatic trophodynamics. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1999, 56(11): 2167-2171.
- [21] Bosley K L, Wainright S C. Effects of preservatives and acidification on the stable isotope ratios ($^{15}\text{N}:^{14}\text{N}$, $^{13}\text{C}:^{12}\text{C}$) of two species of marine animals. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1999, 56(11): 2181-2185.

- [22] Bunn S E, Loneragan N R, Kempster M A. Effects of acid washing on stable isotope ratios of C and N in penaeid shrimp and seagrass: implications for food-web studies using multiple stable isotopes. *Limnology and Oceanography*, 1995, 40(3): 622-625.
- [23] 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.
- [24] Pinnegar J K, Campbell N, Polunin N V C. Unusual stable isotope fractionation patterns observed for fish host-parasite trophic relationships. *Journal of Fish Biology*, 2001, 59(3): 494-503.
- [25] 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.
- [26] Peterson B J, Fry B. Stable isotopes in ecosystem studies. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1987, 18(1): 293-320.
- [27] Bearhop H, Drucher D. Trophic level isotopic enrichment of carbon and nitrogen in bone collagen: case studies from recent and ancient terrestrial ecosystems. *International Journal of Osteoarchaeology*, 2003, 13(1/2): 46-53.
- [28] DeNiro M J, Epstein S. Influence of diet on the distribution of nitrogen isotopes in animals. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 1981, 45(3): 341-351.
- [29] Minagawa M, Wada E. Stepwise enrichment of ^{15}N along food chains: further evidence and the relation between $\delta^{15}\text{N}$ and animal age. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1984, 48(5): 1135-1140.
- [30] Vander Zanden M J, Rasmussen J B. Variation in $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ trophic fractionation: implications for aquatic food web studies. *Limnology and Oceanography*, 2001, 46(8): 2061-2066.
- [31] Wang J Z, Ling G H, Huang J H, Han X G. The application of stable isotopes in the research of the animal-plant mutual relationship in the ecosystem. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(21): 2141-2149.
- [32] Montoya J P, Horrigan S G, McCarthy J J. Natural abundance of $\delta^{15}\text{N}$ in particulate nitrogen and zooplankton in the Chesapeake bay. *Marine Ecology-Progress Series*, 1990, 65(1): 35-61.
- [33] Hobson K A, Welch H E. Determination of trophic relationships within a high arctic marine food web using $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ analysis. *Marine Ecology-Progress Series*, 1992, 84(1): 9-18.
- [34] Cai D L, Zhang S F, Zhang J. Ecosystem trophic dynamics studies as traced by natural carbon and nitrogen stable isotopes. *Journal of Chinese Mass Spectrometry Society*, 2003, 24(3): 434-439.
- [35] Vander Zanden J M, Cabana G, Rasmussen J B. 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 Science*, 1977, 54(5): 1142-1158.
- [36] Li D H. Adaptability characters of karst cave animals in dark environment. *Sichuan Journal of Zoology*, 2008, 27(3): 340-343.
- [37] Song D W, Li M C, Li L X, Yi X F, Zhang X A. Altitudinal differentiation of stable carbon and nitrogen isotopes composition of main consumers on alpine meadow of east Qinhai-Tibet Plateau. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(1): 40-45.
- [38] 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.
- [39] Post D M. Using stable isotopes to estimate trophic position: models, methods, and assumptions. *Ecology*, 2002, 83(3): 703-718.
- [40] Adams G L, Johnson J E. Metabolic rate and natural history of Ozark cavefish, *Amblyopsis rosae*, in Logan cave, Arkansas. *Environmental Biology of Fishes*, 2001, 62(1/3): 97-105.
- [41] Zhang D, Min Q W, Cheng S K, Wang Y Y, Yang H L, He L. Ecological studies on the food web structures and trophic relationships of multiple species coexistence in paddy fields using stable carbon and nitrogen isotopes. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(24): 6734-6740.
- [42] Calvert S E, Nielsen B, Fontugne M R. Evidence from nitrogen isotope ratios for enhanced productivity during formation of eastern Mediterranean sapropels. *Nature*, 1992, 359(6392): 223-225.
- [43] Hodll D A, Schelske C L. Production, sedimentation, and isotopic composition of organic matter in Lake Ontario. *Limnology and Oceanography*, 1998, 43(2): 200-214.

参考文献:

- [11] 黎道洪, 罗泰昌, 陈德牛. 贵州洞穴陆生贝类一新种 (肺螺亚纲, 柄眼目, 烟管螺科). *动物分类学报*, 2003, 28(3): 446-447.
- [12] 邓实群, 黎道洪. 贵州荔波洞穴蜘蛛初步研究. *贵州师范大学学报: 自然科学版*, 2008, 26(4): 1-5.
- [13] 陈德牛, 黎道洪, 罗泰昌. 贵州洞穴淡水、陆生贝类区系及新种记述. *动物分类学报*, 2003, 28(4): 614-620.
- [14] 黎道洪, 罗蓉, 陈泚. 贵州大洞口内若干动物群落研究. *生态学报*, 2001, 21(1): 126-130.
- [15] 黎道洪. 贵州荔波洞和甲良洞内部分环境因子与动物群落结构的相关性. *生态学报*, 2007, 27(6): 2167-2176.
- [31] 王建柱, 林光辉, 黄建辉, 韩兴国. 稳定同位素在陆地生态系统动-植物相互关系研究中的应用. *科学通报*, 2004, 49(21): 2141-2149.
- [34] 蔡德陵, 张淑芳, 张经. 天然存在的碳、氮稳定同位素在生态系统研究中的应用. *质谱学报*, 2003, 24(3): 434-439.
- [36] 黎道洪. 喀斯特洞穴动物适应黑暗环境生活的适应性特征研究. *四川动物*, 2008, 27(3): 340-343.
- [37] 宋大伟, 李明财, 李来兴, 易现峰, 张晓爱. 高寒草甸消费者种群稳定碳、氮同位素组成的海拔分异. *生态学报*, 2007, 26(1): 40-45.
- [38] 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.
- [41] 张丹, 闵庆文, 成升魁, 王玉玉, 杨海龙, 何露. 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. *生态学报*, 2010, 30(24): 6734-6740.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 32, No. 11 June, 2012 (Semimonthly)

CONTENTS

Controls of post-fire tree recruitment in Great Xing'an Mountains in Heilongjiang Province	CAI Wenhua, YANG Jian, LIU Zhihua, et al (3303)
The assessment of river health using Benthic-Index of biotic integrity for Wenyu River	YANG Liu, LI Yonghui, WANG Juncai, et al (3313)
Consume of soil seeds of <i>Betula albo-sinensis</i> and <i>Abies faxoniana</i> in different natural successional stages of subalpine dark coniferous forest in western Sichuan, China	MA Jiangming, LIU Shirong, SHI Zuomin, et al (3323)
Habitat associations of understorey species spatial distribution in old growth broad-leaved Korean pine (<i>Pinus koraiensis</i>) forest	DING Shengjian, ZHANG Chunyu, XIA Fucui, et al (3334)
Nabkha morphology and sand-fixing capability of four dominant <i>Caragana</i> species in the desert region of the Inner Mongolia Plateau	ZHANG Yuanyuan, MA Chengchang, HAN Lei, et al (3343)
Growth dynamics, biomass allocation and ecological adaptation in <i>Ceratocarpus arenarius</i> L.	QUAN Dujuan, WEI Yan, ZHOU Xiaoqing, et al (3352)
A rapid assessment method for forest disaster based on MODIS/NDVI time series; a case study from Guizhou Province	SHI Hao, WANG Xiao, XUE Jianhui, et al (3359)
Soil cation exchange capacity and exchangeable base cation content in the profiles of four typical soils in the Xi-Shui Forest Zone of the Qilian Mountains	JIANG Lin, GENG Zengchao, LI Shanshan, et al (3368)
Impact of water and temperature on spring maize emergence speed and emergence rate	MA Shuqing, WANG Qi, LÜ Houquan, et al (3378)
Effect of N application on the abundance of denitrifying genes (<i>narG/nosZ</i>) and N ₂ O emission in paddy soil	ZHENG Yan, HOU Haijun, QIN Hongling, et al (3386)
Temporal-spatial variations of potential evapotranspiration and quantification of the causes in Northwest China	CAO Wen, SHEN Shuanghe, DUAN Chunfeng (3394)
Analysis of ecosystem degradation and recovery using precipitation use efficiency and NDVI in the headwater catchment of the Yellow River basin	DU Jiaqiang, SHU Jianmin, ZHANG Linbo (3404)
An assessment method of <i>Kandelia obovata</i> population biomass	JIN Chuan, WANG Jinwang, ZHENG Jian, et al (3414)
Quantitative characteristics and species composition of <i>Artemisia sphaerocephala</i> and <i>A. ordosica</i> communities in the Ulanbuh Desert ...	MA Quanlin, ZHENG Qingzhong, JIA Jujie, et al (3423)
Photosynthesis and transpiration in relation to ion accumulation in <i>Vitex trifolia</i> under varied light intensity	ZHANG Ping, LIU Linde, BAI Xinfu, et al (3432)
Diffusion of elm seed rain in Otindag Sand Land	GU Wei, YUE Yongjie, LI Gangtie, et al (3440)
Effect of saline water irrigation on sand soil salt and the physiology and growth of <i>Populus euphratica</i> Oliv.	HE Xinlin, CHEN Shufei, WANG Zhenhua, et al (3449)
Regulation of exogenous nitric oxide on photosynthetic physiological response of <i>Lolium perenne</i> seedlings under NaHCO ₃ Stress	LIU Jianxin, WANG Jincheng, WANG Xin, et al (3460)
Longitude gradient changes on plant community and soil stoichiometry characteristics of grassland in Hulunbeir	DING Xiaohui, LUO Shuzheng, LIU Jinwei, et al (3467)
Concentrations and distributions of selenium and heavy metals in Hainan paddy soil and assessment of ecological security	GENG Jianmei, WANG Wenbin, WEN Cuiping, et al (3477)
Heavy metal contents and evaluation of farmland soil and wheat in typical area of Jiangsu Province	CHEN Jingdu, DAI Qigen, XU Xuehong, et al (3487)
The studies on the food web structures and trophic relationships in Guangxi Dongfang Cave by means of stable carbon and nitro- gen isotopes	LI Daohong, SU Xiaomei (3497)
Analysis of bacterial diversity in the Songhua River based on nested PCR and DGGE	TU Teng, LI Lei, MAO Guannan, et al (3505)

Preliminary delineation and classification of estuarine drainage areas for major coastal rivers in China	HUANG Jinliang, LI Qingsheng, HUANG Ling, et al (3516)
Estimation of spatial and seasonal changes in phytoplankton primary production in Meiliang Bay, Lake Taihu, based on the Vertically Generalized Production Model and MODIS data	YIN Yan, ZHANG Yunlin, SHI Zhiqiang, et al (3528)
Viability and changes of physiological functions in the tiger frog (<i>Hoplobatrachus rugulosus</i>) exposed to cold stress	WANG Na, SHAO Chen, XIE Zhigang, et al (3538)
Community structure and abundance dynamics of soil collembolans in transgenic Bt rice paddyfields	ZHU Xiangyu, LI Zhiyi, CHANG Liang, et al (3546)
Morphological characteristics and microsatellite DNA genetic diversity of Nigeria African honey bee, Anhui <i>Apis mellifera</i> and theirs hybrid generation II	YU Linsheng, XIE Wenfei, WU Houchang, et al (3555)
Effects of social-demographic factors on the recreational service of park wetlands in Beijing	LI Fen, SUN Ranhao, CHEN Liding (3565)
Co-integration theory-based analysis on relationships between economic growth and eco-environmental changes: taking the south-east district in Chongqing city as an example	XIAO Qiang, HU Dan, XIAO Yang, et al (3577)
The cooperative environmental game model in the Tidal River Network Regions and its empirical research	LIU Honggang, CHEN Xingeng, PENG Xiaochun (3586)

Review and Monograph

Review of eco-efficiency accounting method and its applications	YIN Ke, WANG Rusong, ZHOU Chuanbin, et al (3595)
Overview on the 6th international symposium on modern ecology series of 2011	WEN Teng, XU Delin, XU Chi, et al (3606)

Discussion

Scale analysis of environmental factors and their relationship with the size of hierarchical aquatic ecoregion: a case study in the Liao River basin	LIU Xingcai, XU Zongxue, ZHANG Shurong, et al (3613)
--	--

Scientific Note

Effects of different light intensities on activities of the primary defense proteins in needles of <i>Larix gmelinii</i>	LU Yifang, SHI Lei, YAN Shanchun (3621)
An analysis of photosynthetic parameters among <i>Schima superba</i> provenances	XIONG Caiyun, ZENG Wei, XIAO Fuming, et al (3628)
Research on three small-scale agricultural ecological-economic systems in Shenzhen City based on emergy analysis	YANG Zhuoxiang, GAO Yang, ZHAO Zhiqiang, et al (3635)

《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 11 期 (2012 年 6 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 32 No. 11 (June, 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 100071, 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@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100071, 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