

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第33卷 第9期 Vol.33 No.9 **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 9 期 2013 年 5 月 (半月刊)

目次

前沿理论与学科综述

- 可持续发展研究的学科动向 茶 娜, 邬建国, 于润冰 (2637)
- 代谢异速生长理论及其在微生物生态学领域的应用 贺纪正, 曹 鹏, 郑袁明 (2645)
- 植物内生菌促进宿主氮吸收与代谢研究进展 杨 波, 陈 晏, 李 霞, 等 (2656)
- 中国园林生态学发展综述 于艺婧, 马锦义, 袁韵珏 (2665)

个体与基础生态

- 基于最小限制水分范围评价不同耕作方式对土壤有机碳的影响 陈学文, 王 农, 时秀焕, 等 (2676)
- 草原土壤有机碳含量的控制因素 陶 贞, 次旦朗杰, 张胜华, 等 (2684)
- 外源钙离子与南方菟丝子寄生对喜旱莲子草茎形态结构的影响 车秀霞, 陈惠萍, 严巧娣, 等 (2695)
- 毛竹出笋后快速生长期茎秆色素含量与反射光谱的相关性 刘 琳, 王玉魁, 王星星, 等 (2703)
- 巴郎山异型柳叶片功能性状及性状间关系对海拔的响应 冯秋红, 程瑞梅, 史作民, 等 (2712)
- 外源磷或有机质对板蓝根吸收转运砷的影响 高宁大, 耿丽平, 赵全利, 等 (2719)
- 不同猎物饲喂对南方小花蝽捕食量和喜好性的影响 张昌容, 郅军锐, 莫利锋 (2728)
- 捕食风险对东方田鼠功能反应格局的作用 马 静, 陶双伦, 杨锡福, 等 (2734)
- 基于线粒体细胞色素 c 氧化酶亚基 I 基因序列的帘蛤科贝类分子系统发育研究
..... 程汉良, 彭永兴, 董志国, 等 (2744)
- 不同实验生态环境对海刺猬遮蔽行为的影响 常亚青, 李云霞, 罗世滨, 等 (2754)

种群、群落和生态系统

- 基于 RS 与 GIS 的赣江上游流域生态系统服务价值变化 陈美球, 赵宝苹, 罗志军, 等 (2761)
- 长江口及邻近海域富营养化指标响应变量参照状态的确定 郑丙辉, 朱延忠, 刘录三, 等 (2768)
- 长江口及邻近海域富营养化指标原因变量参照状态的确定 郑丙辉, 周 娟, 刘录三, 等 (2780)
- 鸭绿江口及邻近海域生物群落的胁迫响应 宋 伦, 王年斌, 杨国军, 等 (2790)
- 杭州西溪湿地大型底栖动物群落特征及与环境因子的关系 陆 强, 陈慧丽, 邵晓阳, 等 (2803)
- 生物土壤结皮对荒漠土壤线虫群落的影响 刘艳梅, 李新荣, 赵 昕, 等 (2816)
- 大棚模拟条件下角倍蚜春季迁飞数量动态及其与气象因子的关系 李 杨, 杨子祥, 陈晓鸣, 等 (2825)
- 宁南山区植被恢复对土壤团聚体水稳定及有机碳粒径分布的影响 程 曼, 朱秋莲, 刘 雷, 等 (2835)
- 1958—2008 年太白山太白红杉林碳循环模拟 李 亮, 何晓军, 胡理乐, 等 (2845)
- 不同干扰对黄土区典型草原物种多样性和生物量的影响 陈芙蓉, 程积民, 刘 伟, 等 (2856)
- 乌拉山自然保护区白桦种群的年龄结构和点格局分析 胡尔查, 王晓江, 张文军, 等 (2867)
- 西南干旱对哀牢山常绿阔叶林凋落物及叶面积指数的影响 杞金华, 章永江, 张一平, 等 (2877)
- 阿尔泰山小东沟林区乔木物种丰富度空间分布规律 井学辉, 曹 磊, 臧润国 (2886)

景观、区域和全球生态

太湖流域生态风险评价 许 妍,高俊峰,郭建科 (2896)

基于 GIS 的关中-天水经济区土地生态系统固碳释氧价值评价 周自翔,李 晶,冯雪铭 (2907)

资源与产业生态

淹水条件下控释氮肥对污染红壤中重金属有效性的影响..... 梁佩筠,许 超,吴启堂,等 (2919)

研究简报

高温强光对小麦叶绿体 Deg1 蛋白酶和 D1 蛋白的影响及水杨酸的调节作用
..... 郑静静,赵会杰,胡巍巍,等 (2930)

不同 CO₂ 浓度变化下干旱对冬小麦叶面积指数的影响差异 李小涵,武建军,吕爱锋,等 (2936)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 308 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 32 * 2013-05



封面图说: 肥美的当雄草原——高寒草甸是在寒冷的环境条件下,发育在高原和高山的一种草地类型。其植被组成主要是多年生草本植物,冬季往往有冰雪覆盖,土壤主要为高山草甸土。当雄草原位于藏北高原,藏南与藏北的交界地带,海拔高度为 5200—4300m,受海洋性气候影响,呈现高原亚干旱气候,年平均降水量 293—430mm。主要有小嵩草草甸、藏北嵩草草甸和沼泽草甸等,覆盖度为 60%—90%,其中小嵩草草甸分布面积最大,连片分布于广阔的高原面上。高寒草甸草层低,草质良好,是畜牧业优良的夏季牧场。

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/stxb201201200121

马静,陶双伦,杨锡福,姚小燕,王璐,李俊年. 捕食风险对东方田鼠功能反应格局的作用. 生态学报, 2013, 33(9): 2734-2743.

Ma J, Tao S L, Yang X F, Yao X Y, Wang L, Li J N. Effects of predation risk on the patterns of functional responses in reed vole foraging. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(9): 2734-2743.

捕食风险对东方田鼠功能反应格局的作用

马 静, 陶双伦*, 杨锡福, 姚小燕, 王 璐, 李俊年

(吉首大学生物资源与环境科学学院, 吉首 416000)

摘要:植食性哺乳动物对食物斑块的选择和利用不仅取决于食物的可利用性,且与觅食环境潜存的各种风险紧密关联。捕食风险是否通过作用于动物觅食活动中的警觉影响其功能反应格局。在新鲜白三叶叶片构成的各类食物密集斑块上,测定东方田鼠觅食行为,建立功能反应模型,检验捕食风险对其功能反应格局的作用。结果发现,捕食风险能显著地延长东方田鼠的觅食决定时间,但其摄入率保持稳定,功能反应构型亦未发生改变,仍为Ⅱ型功能反应;除了对照组个体的采食时间随叶片大小增大无明显变动规律外,处理组个体的采食时间及对照组和处理组个体的处理时间、觅食中断时间均随叶片大小及口量的增大呈线性增高趋势,处理组个体的觅食中断时间明显大于对照组个体的;对照组和处理组个体的采食率均随叶片大小及口量呈非线性渐近递减趋势,但处理组个体的采食率较对照组个体的略有降低。结果揭示,在捕食风险压力下,虽然上述觅食参数变异性能潜在地降低摄入率,但个体能通过改变觅食活动中各种警觉行为动作如降低嗅闻和静听监视动作的发生频次,增大视觉监视动作比重,以此缓冲捕食风险压力,维持摄入率。摄入率测定值与模型预测值的线性回归极显著,表明,功能反应模型具有良好的预测性。在可利用植物密集斑块,动物觅食活动中的警觉能缓冲捕食风险压力;动物摄入率是由植物大小调控的口量决定的,且受采食与处理食物竞争及觅食中断的制约;其功能反应仍属Ⅱ型功能反应。

关键词:东方田鼠;捕食风险;警觉;功能反应;摄入率

Effects of predation risk on the patterns of functional responses in reed vole foraging

MA Jing, TAO Shuanglun*, YANG Xifu, YAO Xiaoyan, WANG Lu, LI Junnian

College of Biology and Environmental Sciences, Jishou University, Jishou, Hunan 416000, China

Abstract: Selection and consumption of food patches in mammalian herbivores depend not only on the availability of patches, but also on the latent risks around. Whether predation risk affect the patterns of functional responses of herbivores by influencing their vigilance in foraging is still unknown. To evaluate the effects of predation risks on patterns of functional responses of voles (*Microtus fortis*), we measured behavioral parameters of the voles' foraging in food concentrated patches consisting of fresh leaves of clover (*Tritolium repens*), and tested a newly constructed mechanistic model of functional responses.

Modeling of foraging processes indicated that predation risk significantly prolonged foraging decision time of voles. The intake rate in different patches was similar, the patterns of functional responses remained unchanged, and were still type Ⅱ functional responses. Except for cropping time in controls remaining stable with the increasing leaf size of clover, cropping time in treatments, processing time and interrupting time in both controls and treatments increased linearly with increasing

基金项目:湖南省“十二五”重点学科资助项目;喀斯特草地生态系统研究生培养创新基地科学研究项目(201102A,201104B);湖南省与吉首大学研究生科研创新项目;吉首大学大学生研究性学习和创新性实验计划资助项目(JSU-CX-2011-39);吉首大学校级科研资助项目(11JDX046)

收稿日期:2012-01-20; **修订日期:**2012-10-26

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: taoshl_xj@126.com

bite size. The interruption time of the treatments was obviously longer than that of the controls; bite rates in both controls and treatments decreased nonlinearly, but the bite rates in treatments were slightly lowered when compared with those in controls.

These results demonstrate that, although the variation of these behavioral parameters of voles under the pressure of predation risk are likely to depress intake rates, voles are able to modify the frequency of vigilance actions such as lessening the smelling and listening action and mounting the staring action, so as to effectively buffer the pressure of predation risk, thus can maintain their intake rates. A significantly linear regressive relationship was detected between the intake rate observed and that predicted by the model, indicating the predictability of the model is satisfactory. Validation of the models provided a strong support to the following hypotheses: vigilance in herbivores' foraging is capable to buffer the pressure of predation risks; the intake rate of herbivores is controlled by plant sizes through regulating their bite sizes, and is also constrained by competition between cropping and chewing and foraging interruption at vigilance; the responses of intake rates to plant sizes and bite sizes are still a type II functional response as voles foraging in food-concentrated patches.

Key Words: *Microtus fortis*; predation risk; vigilance; functional response; intake rate

自然界,植食性哺乳动物的食物呈斑块状分布,动物通常选择在由偏爱性较高的食物组成的斑块上觅食,其对食物摄取、斑块利用、植物群落组成及其动态格局具有重要的生态学意义^[1]。植食性哺乳动物功能反应描述了动物食物摄入率与可利用植物间的函数关系^[2-8],其在揭示和预测动物与可利用植物资源的动态关系^[9]、动物的警觉优化^[6, 10-11]及食物优化^[12-16]方面起着极为重要的作用^[17]。

植食性哺乳动物在口尺度上选择食物斑块,在口尺度构成的摄食站进行觅食决定^[8]。定义觅食决定为动物进入食物斑块至少进行两个觅食回合。动物对食物斑块的选择和决定不仅依赖于食物的可利用性,而且取决于环境潜存的各种风险^[11]。若风险压力巨大时,动物会延迟觅食;若风险一时难以解除,动物是如何应对获取食物与规避风险这一两难的处境的?

功能反应理论^[18]及最优觅食理论^[13]提出之初,并未认识到动物搜寻与处理食物项目动作重叠对摄入率动态的调节作用。近来,Spalinger 和 Hobbs^[19]观察到植食性哺乳动物咀嚼与搜寻食物动作相互重叠,构建了反映该重叠过程的功能反应机制模型,这意味着动物咀嚼食物所需的时间可能会大于与下一口食物相遇的时间。在此情形下,食物摄入不受行走时间的制约,而是受处理食物速率的约束^[2, 13, 19-21]。自然界,植食性哺乳动物因处理食物抑制摄入率的现象极为普遍^[15, 13],尽管目前就动物咀嚼与搜寻食物动作重叠对摄入率的作用已有报道,但对这两种动作重叠的生态学意义的探讨却依然有限^[2]。植食性哺乳动物咀嚼食物时不仅能搜寻下一食物项目,且能同时能远离和/或警惕竞争者及各种风险^[13]。然而,动物咀嚼食物时的行走能否降低种内及种间干扰性竞争以及各种风险对摄入率的潜在影响,目前仍无定论。由于动物完成食物咀嚼处理才收获下一口食物项目^[3, 13, 19],因此,Illius 和 Fitzgibbon^[22]明确地指出,若处理食物项目时间大于与下一口食物项目相遇的时间,剩余咀嚼处理时间为“盈余时间”。在盈余时间内,动物能进行一些不致使摄入率降低的活动如搜寻和警觉。盈余时间是一个非常重要的生态学变量^[23],它揭示了摄入率在受到相遇率调控前动物的活动余地。警觉-营养级动态作用假说则认为^[10-11],动物扫视环境能降低食物摄入量。由于受野外追踪测定觅食行为过程及参数难度的制限,就“捕食风险是否影响植食性哺乳动物摄入率”这一命题的解答,至今仍未莫衷一是。

植食性哺乳动物的觅食行为过程典型地由搜寻与采食和处理(咀嚼和吞咽)食物动作组成,期间伴有各种警觉行为动作如扫视、静听和嗅闻等^[8, 24]。因嗅闻和静听动作与处理食物动作不相重叠,能使觅食活动出现短暂中断而降低摄入率^[8, 25-26]。动物在处理食物的同时能搜寻新的食物项目。在食物密集斑块上,动物警觉行为动作如扫视与处理食物动作相重叠,其处理食物时能行走至下一目标食物,因此,在该时段内警觉行为不会降低摄入率^[8, 25-26]。然而,当捕食者在场时,动物的上述觅食行为参数及警觉行为动作是否会发生变异?

该种变异是否会影响摄入率,进而改变其功能反应格局?

为探明上述问题,采用栖息于洞庭湖区的东方田鼠(*Microtus fortis*)为研究对象,以该区频繁出没的流浪猫(*Felis catus*)为捕食风险源。在实验室条件下,采用东方田鼠喜食的新鲜白三叶(*Trifolium repens*)为食物,以大小等级相异的叶片配置叶片间距相等、叶片大小等级不同的各类食物密集斑块,测定东方田鼠在各类食物斑块的觅食行为过程及参数;采用警觉-功能反应模型^[8]检验捕食风险对东方田鼠觅食行为的影响,以及对其功能反应格局的作用。检验的特定假设为,在可利用植物密集斑块,动物觅食活动中的警觉能缓冲捕食风险压力;动物的摄入率是由植物大小调控的口量决定的,且受采食与处理食物竞争及觅食中断的制约,其功能反应为Ⅱ型功能反应。

1 材料与方法

1.1 实验动物

本文以栖息于湖南省洞庭湖区的东方田鼠为实验动物。野外捕捉带回室内饲养,达2个月后,从中选取健康成体40只,雌雄各20只,平均体重(51.2 ± 10.3)g,作为实验动物。在实验室条件下,以干稻草为巢垫,兔颗粒饲料为主要食物,附加一定量的白三叶,供给充足的饮水,驯养于透明饲养笼内,实验室温度(20 ± 1)℃,光照周期12L:12D。实验期,以新鲜白三叶叶片喂饲动物,采用捕自同一地区的流浪猫为捕食风险源。以新鲜白三叶叶片配置不同叶片大小(*LS*)等级的食物斑块,具体方法已有报道^[8]。

1.2 实验设计

为探明捕食风险对东方田鼠摄入率及功能反应格局的作用,在实验中设立对照组和处理组。对照组不设置风险源动物,测定单只个体的觅食行为(图1,A),该部分实验数据已有报道^[8],为便于研究内容的比对和阐释,采用了该部分数据。处理组以流浪猫为风险源,测定捕食者在场时单只个体的觅食行为(图1,A+B)。

1.3 行为观测装置

为有效地控制实验动物,便于准确地测定实验个体的觅食行为及过程,在食物斑块上部周边设立观测箱。观测箱由透明玻璃构成,底部面积与食物斑块大小一致,高度为60cm。观测箱由投放区(R)和觅食区(F)两部分构成(图1,A)。在投放区周边玻璃上覆以牛皮纸,作为觅食个体规避风险的隐藏区。两区间以底部带孔的隔板相隔,此孔可作为实验个体在两区间自由活动的通路。投放区面积20cm×30cm,觅食区面积80cm×30cm。将风险源动物流浪猫置于60cm×60cm×60cm的铁丝网笼(P)内,网眼大小2.0cm×2.0cm,以同一水平置于距观测箱200cm处(图1,A+B)。猫在该研究中仅对实验个体起威慑作用。

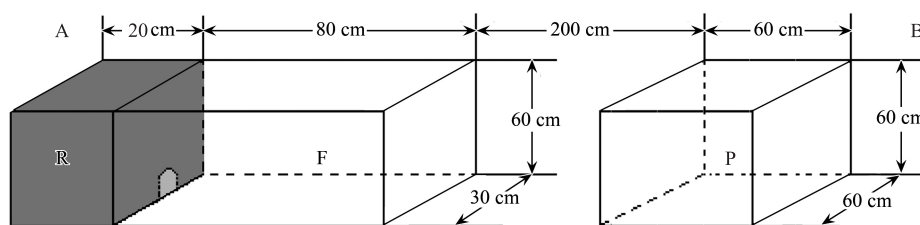


图1 东方田鼠行为观测装置示意图

Fig. 1 Sample of behavioral observing equipment in *Microtus fortis* foraging

R: 投放区; F: 觅食区; P: 铁丝网笼

1.4 觅食行为参数定义、实验程序及觅食行为参数估计

本文关注的是,在与捕食者相遇即在捕食风险条件下,实验个体的觅食行为反应及特征。测定实验个体在开始觅食至完成2觅食回合(FB)的时段内,其觅食行为参数动态特征。定义觅食决定时间为,实验个体投放到投放区至开始进行第2个觅食回合的时间(min)。其他有关觅食行为参数定义、实验程序及觅食行为参数估计已有报道^[8]。

植食性哺乳动物颌的收获与处理食物动作不能同时发生^[19]。其觅食时常常抬头环顾四周,约有95%的

觅食时间用于警觉^[26]。故采食率不但受采食和咀嚼食物两种动作竞争的制约,而且受警觉周围环境行为动作的影响^[2]。以警觉-采食率模型^[8]预测东方田鼠在捕食风险条件下的采食率。

$$B = \frac{1}{h + \frac{S}{R} + T_{FI}} = \frac{R}{Rh + S + RT_{FI}} \quad (1)$$

式中, B 为采食率即单位时间动物采食口数(次/min); h 为采食时间即动物鼻口部接触到食物至分离食物的时间(min); S 为口量,即动物一次或多次采食动作,经连续咀嚼,1次吞咽的食物量(mg); S/R 为动物处理(咀嚼和吞咽)1口食物的时间即处理时间 t (min); T_{FI} 为觅食中断时间,即在觅食过程中,动物停止咀嚼,抬头向周围扫视、监听及嗅闻所花费的时间(min); R 为处理速率,以 $R = C_e \times C_f$ 估计,其中 C_e 为咀嚼努力,即动物每次咀嚼的食物量(mg/次); C_f 为咀嚼频次即单位时间动物上下颌咬合次数(次/min)。

采用警觉-功能反应模型^[8]预测东方田鼠在捕食风险条件下的摄入率:

$$I = \frac{S}{h + \frac{S}{R} + T_{FI}} = \frac{RS}{Rh + S + RT_{FI}} \quad (2)$$

式中, I 为摄入率即单位时间动物摄入的食物量(mg/min),其它参数定义同式(1)。

1.5 统计分析

觅食决定时间以平均值 $\pm$ 标准误($M \pm SE$)表示;采用单变量方差分析法,检验 LS 及捕食风险以及二者的交互作用对东方田鼠觅食决定的影响。

以非线性回归分析,检验捕食风险对东方田鼠觅食功能反应格局的作用,建立功能反应模型。

采用对数回归分析法,分析捕食风险条件下 I 对 LS 及 S 的反应,确立功能反应型式。

以线性、指数或对数回归分析法,检验捕食风险条件下个体觅食行为参数 h 、 t 、 T_{FI} 、觅食回合时间(T_{FB})及 B 对 LS 及 S 的反应,分析二者的相关性。

以线性回归分析法,分析 I 测定值与预测值的相关性。

2 结果

2.1 觅食决定

一般线性模型单变量方差分析结果显示,无论对照组还是处理组,叶片大小(对照组: $F_{(6, 63)} = 0.094, P = 0.997 > 0.05$;处理组: $F_{(6, 131)} = 0.201, P = 0.976 > 0.05$)、性别(对照组: $F_{(1, 69)} = 0.119, P = 0.732 > 0.05$;处理组: $F_{(1, 137)} = 0.039, P = 0.843 > 0.05$)、以及性别与捕食风险的交互作用($F_{(1, 206)} = 0.020, P = 0.887 > 0.05$)对东方田鼠觅食行为决定均无显著地影响。但二者的组间差异极显著($F_{(1, 206)} = 210.931, P = 0.000 < 0.01$),处理组个体的觅食决定时间明显高于对照个体的,为其近1倍以上(图2)。表明,捕食风险能显著地增大东方田鼠的觅食决定时间。

2.2 功能反应格局

与对照组 I 随 LS 及 S 增大的动态格局相类似,处理组 I 亦随 LS 及 S 的增大,呈非线性渐近减速增高趋势,为Ⅱ型功能反应(图3)。非线性回归的 ANOVA 结果显示,处理组 I 与 LS 及 S (图3)的回归均达到极显著水平($P < 0.01$)(表1)。

比较对照组与处理组功能反应回归曲线系数发现,处理组个体 I 与 LS 的回归曲线系数较对照组下降了6.23%(回归曲线系数比较, $(12.392 - 11.620) / 12.392 = 6.23\%$),与 S 的回归曲线系数较对照组上升了

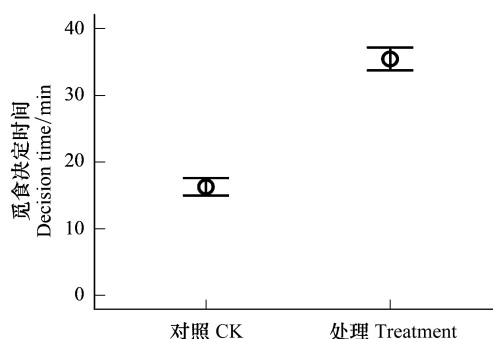


图2 东方田鼠觅食决定时间的比较

Fig. 2 Comparisons on time of foraging decision in *Microtus fortis*

7.99% (回归曲线系数比较, $|(15.211-16.426)/15.211| = 7.99\%$) (图3), 但二者均极为近似。

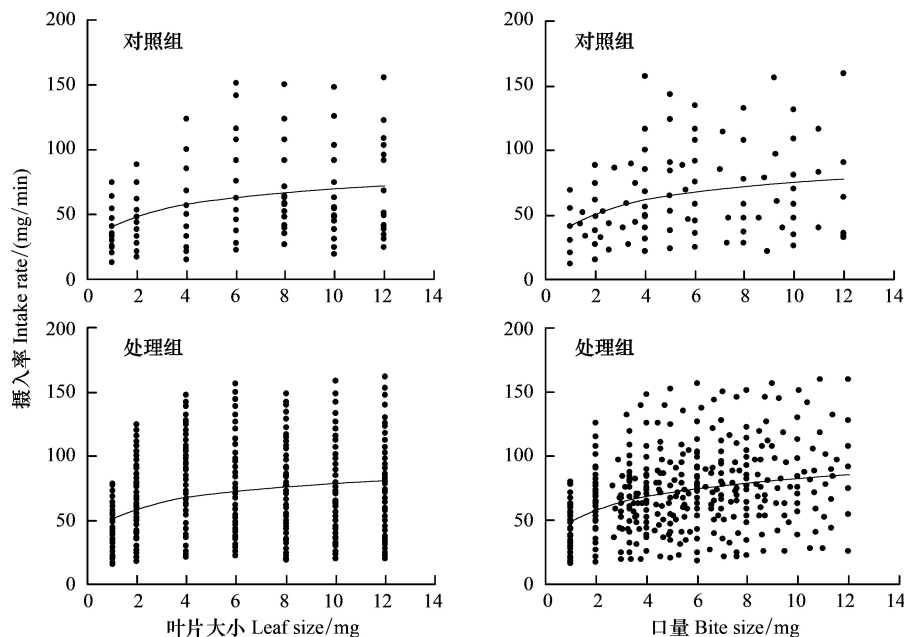


图3 东方田鼠摄入率与白三叶叶片重及口量的渐进函数关系

Fig. 3 Asymptotic function relationship between intake rate and clover leaf size and bite size in *Microtus fortis* foraging

2.3 觅食行为参数动态

除了对照组个体觅食行为参数 h 随 LS 的增大无明显地变动规律外 (图 4 a₁₁), 对照组个体 h (图 4 a₁₂) 随 S 增大以及处理组个体 h 随 LS (图 4 a₂₁) 及 S (图 4 a₂₂) 的增大均线性增高, 回归达极显著水平 ($P < 0.01$) (表 1); 对照组 (图 4 b₁₁, 图 4 b₁₂) 及处理组 (图 4 b₂₁, 图 4 b₂₂) 个体 t 均随 LS 及 S 的增大线性增高, 回归达到极显著水平 ($P < 0.01$) (表 1); 对照组 (图 4 c₁₁, 图 4 c₁₂) 及处理组 (图 4 c₂₁, 图 4 c₂₂) 个体 T_{Fi} 随 LS 及 S 的增大亦呈线性增高趋势, 回归达显著或极显著水平 ($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$) (表 1), 但处理组个体 T_{Fi} 极显著地高于对照组个体的 ($F_{(1, 138)} = 83.222$, $P = 0.000 < 0.01$), 为其近 4 倍; 对照组 (图 4 d₁₁) 及处理组 (图 4 d₂₁) 个体 T_{FB} 随 LS 的增大基本保持稳定。然而, 对照组 (图 5 a₁₁, 图 5 a₁₂) 及处理组 (图 5 a₂₁, 图 5 a₂₂) 个体 B 随 LS (图 5 a₁₁, 图 5 a₂₁) 及 S (图 5 a₁₂, 图 5 a₂₂) 的增大以渐近减速率缓慢降低, 非线性回归均达到极显著的水平 ($P < 0.01$) (表 1)。

比较对照组 (图 5 a₁₁, 图 5 a₁₂) 及处理组 (图 5 a₂₁, 图 5 a₂₂) B 与 LS (图 5 a₁₁, 图 5 a₂₁) 及 S (图 5 a₁₂, 图 5 a₂₂) 回归曲线系数, 发现对照组及处理组个体 B 与 S 的回归曲线系数对 B 与 LS 的回归曲线系数变异不大 (对照组 S 对 LS 的变异: $|(21.779-23.499)/23.499| = 7.32\%$; 处理组 S 对 LS 的变异: $|(17.988-19.341)/17.988| = 7.52\%$)。然而, 组间比较发现, 处理组个体的 B 与 LS (图 5 a₂₁) 和 S (图 5 a₂₂) 的回归曲线系数均较对照组个体的 (LS : 图 5 a₁₁; S : 图 5 a₁₂) 有所下降, 其中, 与 LS 回归曲线系数下降了 17.69% (系数比较: $|(19.341-23.499)/23.499| = 17.69\%$), 与 S 回归曲线系数较对照组下降了 17.41% (系数比较: $|(17.988-21.779)/21.779| = 17.41\%$), 二者下降幅度极为近似。但与对照组个体 B 对 LS 及 S 的反应格局相比较, 处理组个体 B 对 LS 及 S 的反应格局未发生变化 (图 5)。

2.4 模型预测性

处理组个体 I 测定值与功能反应模型式 (2) 预测值线性回归的 ANOVA 结果 ($F_{(1, 385)} = 267.804$, $P = 0.000 < 0.01$, $R^2 = 0.823$) 显示, 二者的回归达极显著水平, 回归方程为 $y = 0.912x + 4.460$ (图 6)。表明, 模型具良好的预测性。

上述检验结果充分地揭示, 在可利用植物密集斑块上, 植食性哺乳动物觅食活动中的警觉能缓冲捕食风险压力, 其摄入率是由植物大小调控的口量决定的, 且受采食与处理食物竞争及觅食中断的制约, 其功能反应

为Ⅱ型功能反应。

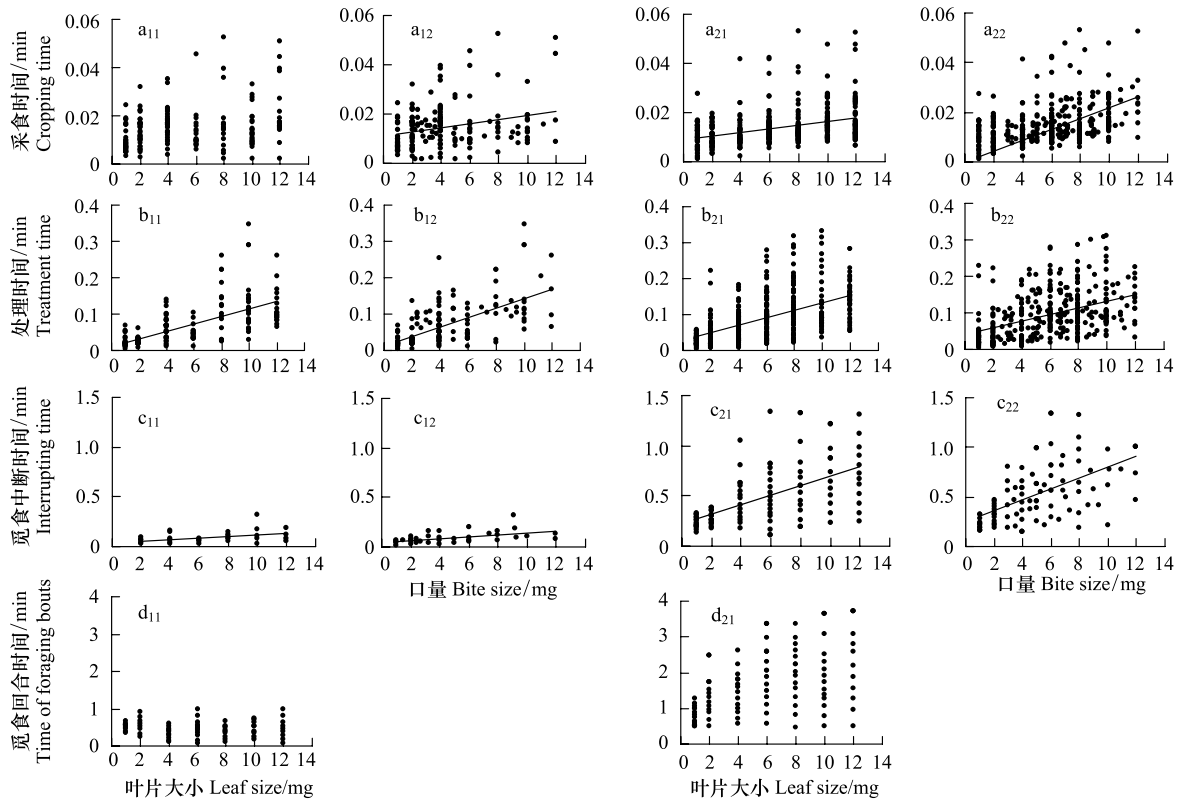


图4 东方田鼠觅食行为参数对白三叶叶片大小及口量的反应

Fig. 4 Responses of behavioral parameters of *Microtus fortis* foraging to cover leaf size and bite size

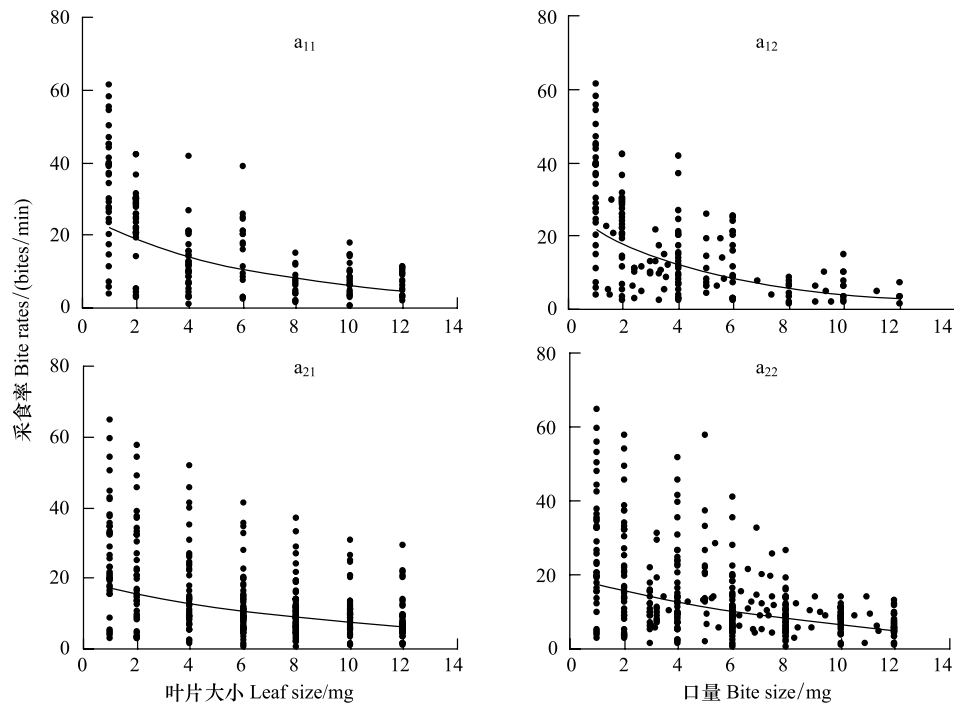


图5 东方田鼠采食率对白三叶叶片大小及其口量的反应

Fig. 5 Responses of bite rate of *Microtus fortis* foraging to cover leaf size and bite size

3 讨论

本项研究结果显示,尽管捕食风险能极显著地延长东方田鼠的觅食决定时间(图 2),但该影响并未波及至对功能反应构型的影响,其功能反应仍为Ⅱ型反应,处理组个体的摄入率与对照个体的亦极为近似(图 3,表 1)。表明,捕食风险条件下,东方田鼠能使摄入率维持在与对照组个体同等的水平。Fortin 等^[13]亦发现,在捕食者频繁出没的区域,尽管美洲野牛(*Bison bison*)警觉强度如抬头监视周围环境的频率增大,但仍能维持摄入率,然而其未能就野牛维持摄入率的行为机制作细致的调查研究。

捕食风险不仅影响东方田鼠觅食决定时间,而且影响其觅食决定行为。对照组个体进入食物斑块后,大部分个体至少需 0.5—1min 或更长时间(最长达 10min)的警觉如沿斑块周边以边行走边嗅闻、扫视或静听等活动方式,巡视一周后,方进入觅食期。而处理组个体均滞留于投放区或在进入觅食区通道孔口处监视风险源动物,经多次反复观察后,才进入食物斑块;其在觅食的同时仅以视觉监视即盯视风险源动物,很少发生静听和嗅闻动作,觅食活动亦仅限于孔口附近的区域。Beauchamp 等^[27]发现,在捕食者与猎物相遇时,捕食者对猎物发动的攻击越早,猎物的警觉性越高;但在二者相遇而捕食者未发动攻击时,随着对峙时间的延长,猎物的警惕性会逐渐降低。

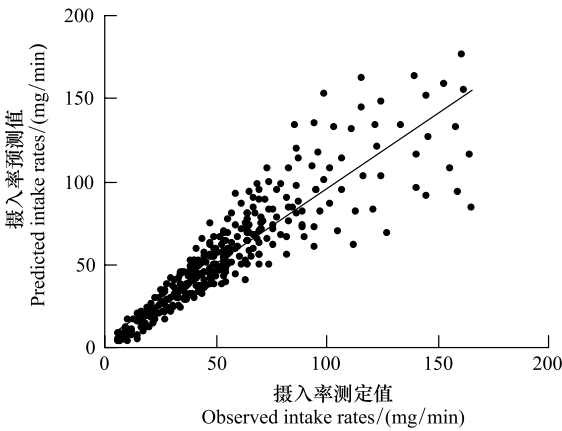


图 6 东方田鼠摄入率测定值与预测值的线性回归关系
Fig. 6 Linearly regressive relationship between observed and predicted intake rates of *Micrurus fortis*

表 1 东方田鼠觅食行为参数与叶片大小及口量的回归分析结果 *

Table 1 Results of regressive analyses between behavioral parameters and leaf size and bite size for <i>Micrurus fortis</i> foraging								
行为参数 Foraging parameters	实验设计 Experimental design	独立变量 Variable	曲线估计 Curve estimates	<i>F</i>	<i>df</i>	<i>P</i>	<i>R</i> ²	模型 Models
摄入率 Intake rate	对照	叶片大小	对数函数	0.109	1, 176	0.000	0.109	$y = 12.392\ln(x) + 34.941$
		口量	对数函数	0.155	1, 176	0.000	0.155	$y = 15.211\ln(x) + 31.773$
	处理	叶片大小	对数函数	29.523	1, 385	0.000	0.142	$y = 11.620\ln(x) + 34.941$
		口量	对数函数	77.014	1, 385	0.000	0.167	$y = 16.426\ln(x) + 31.773$
采食时间 Cropping time	对照	口量	线性函数	15.737	1, 176	0.000	0.082	$y = 0.001x + 0.010$
处理时间 Treatment time	处理	叶片大小	线性函数	42.994	1, 385	0.000	0.121	$y = 0.001x + 0.009$
		口量	线性函数	50.111	1, 385	0.000	0.139	$y = 0.002x + 0.010$
觅食中断时间 Time of foraging interruption	对照	叶片大小	线性函数	132.388	1, 176	0.000	0.429	$y = 0.010x + 0.012$
		口量	线性函数	121.153	1, 176	0.000	0.408	$y = 0.012x + 0.013$
	处理	叶片大小	线性函数	50.111	1, 385	0.000	0.139	$y = 0.014x + 0.009$
		口量	线性函数	138.683	1, 385	0.000	0.265	$y = 0.013x + 0.009$
采食率 Biting rate	对照	叶片大小	线性函数	6.648	1, 93	0.013	0.111	$y = 0.005x + 0.043$
		口量	线性函数	12.791	1, 93	0.001	0.194	$y = 0.008x + 0.036$
	处理	叶片大小	线性函数	7.944	1, 102	0.008	0.300	$y = 0.047x + 0.227$
		口量	线性函数	5.152	1, 102	0.030	0.284	$y = 0.054x + 0.260$
觅食率 Foraging rate	对照	叶片大小	指数函数	106.523	1, 176	0.000	0.377	$y = 23.499e^{-0.135x}$
		口量	指数函数	78.957	1, 176	0.000	0.310	$y = 21.779e^{-0.162x}$
	处理	叶片大小	指数函数	80.678	1, 385	0.000	0.173	$y = 19.341e^{-0.096x}$
		口量	指数函数	96.173	1, 385	0.000	0.200	$y = 17.988e^{-0.111x}$

在觅食期,除了对照组个体的采食时间(图 4a₁₁)及对照组和处理组个体的觅食回合时间(图 4d₁₁,图

4d₂₁) 随 LS 的增大而无明显变动规律外,对照组及处理组个体的采食时间(图 4a₁₂,图 4a₂₁,图 4a₂₂)和处理时间(图 4b₁₁,图 4b₁₂,图 4b₂₁,图 4b₂₂)均随 LS 及 S 的增大呈极显著地线性增高趋势。表明,与捕食者是否在场无关,高可利用性食物斑块能增大东方田鼠采食和处理时间。采食时间增大与小型食物易于采食和控制及大型食物具较大控制难度有关;以大口处理食物虽然能提高处理速率,但同时增大了控制食物的难度,且会增大咀嚼时间,故增大了处理时间^[8, 28]。

尽管对照组及处理组个体的觅食中断时间(图 4c₁₁,图 4c₁₂,图 4c₂₁,图 4c₂₂)均随 LS 及 S 的增大呈极显著或显著增高趋势(表 1),但处理组个体的觅食中断时间较对照组个体的增高明显,采食率亦有所下降(图 5)。然而,捕食风险引致的个体觅食中断时间增大及采食率降低并未增大其觅食代价,摄入率依然保持稳定(图 3)。行为测定发现,觅食期,对照组个体所发生的嗅闻和静听动作,在处理组个体很少发生。处理组个体将警觉精力由监视周围环境转向专注于监视风险目标—风险源动物,其觅食时面向风险源,以边监视边采食方式进行觅食活动,强化了警觉行为中的视觉监视动作。因此,捕食者在场时,个体不仅要依靠视觉进行监视,且同时要确定采食对象或下一食物项目。在此情形下,个体监视与采食动作相冲突,增大了确定采食食物的部位及下一食物项目的难度,使采食率下降(图 5)。诚然,因风险源动物引起个体在某个采食回合内觅食中断时间的增加能降低摄入率,但风险源明确时,个体的觅食中断发生频次亦急剧地减小如嗅闻和静听动作很少发生。因此,当风险源明确时,在短的时间尺度如本文测定的觅食回合时间尺度上,东方田鼠能维持摄入率。

因风险压力不同如捕食者或同种个体在场,植食性哺乳动物觅食活动中的警觉动作及强度会发生变异^[13, 29-31],如在捕食者频繁出没的区域,美洲野牛抬头监视环境的频次增加^[13],穴兔(*Oryctolagus cuniculus*)增大直立监视环境的频次^[31]。Lima 等^[32]认为,动物各警觉行为动作在警戒强度和代价上存在差异,探讨动物警觉代价时,定义警觉行为动作应考虑其是否引起觅食中断。以往的野外实验研究通常将动物的警觉分为一般警觉和明显警觉两种类型^[29, 33],并认为一般警觉为低代价行为^[33, 34],明显警觉为高代价行为^[31]。由于这些研究未能量化这两种警觉类型引起的觅食代价即觅食中断造成的食物摄入量损失,仅以风险压力大小和警觉类型定性评价警觉代价,是难以解释植食性哺乳动物觅食活动中警觉行为的适应性进化的。本项研究中,为探明捕食风险引起的东方田鼠觅食的代价,我们测定了捕食者在场时东方田鼠觅食活动中的各种警觉行为动作如扫视、盯视、嗅闻及静听发生所引起的觅食中断时间;依据警觉-功能反应模型理论定量分析个体的觅食代价,因而能很好地阐明东方田鼠觅食行为的适应性策略。

尽管没有检测到捕食风险对东方田鼠摄入率及其功能反应格局的作用,但这并不意味着捕食风险对其没有影响^[35]。本文是在单一、均质的密集食物斑块上以及在觅食回合时间内测定东方田鼠的食物摄入率及功能反应,剔除了食物非均质性或非觅食活动对摄入率的潜在影响。已有的研究表明^[8],非均质食物能增大动物的食物选择性,尤其是田鼠亚科(*Microtinae*)植食性小型哺乳动物,对食物质量的要求远高于大型植食性哺乳动物的,对食物的选择性亦更强烈。当风险源明确时,动物依视觉感知监视风险源的同时需搜寻新的食物项目。据此推测,在异质性食物斑块条件下,捕食风险会影响动物的食物选择,即使动物能维持摄入率,亦可能降低其摄入食物的质量。因此,在食物异质性条件下,就捕食风险对植食性哺乳动物的觅食行为过程及摄入食物质量和能量收益动态的作用展开研究,是很有必要的。

总括上述,在白三叶叶片密集斑块条件下,检验捕食风险对东方田鼠觅食的功能反应格局的作用,充分验证了本文提出的植食性哺乳动物摄入率动态的假设,为深入探讨植食性哺乳动物的觅食生态学与进化生态学理论提供了依据。

References:

- [1] Laca E A. Foraging in a heterogeneous environment intake and diet choice//prints H, Van Lagevelde F, eds. Resource Ecology: Spatial and temporal dynamics of foraging. Netherlands: Springer. 2008, 81-100.
- [2] Spalinger D E, Hobbs N T. Mechanisms of foraging in mammalian herbivores: new models of functional response. American Naturalist, 1992, 140

- (2): 325-348.
- [3] Gross J E, Shipley L A. Functional response of herbivores in food-concentrated patches: Tests of a mechanistic model. *Ecology*, 1993, 74 (3): 778-791.
- [4] Tao S L, Liu J K, Du Y R, Li J N, Ma J B. The patterns of the responses of the instantaneous intake rate in root voles to a set of available plant variables. *Acta Theriologica Sinica*, 2001, 21 (4): 286-297.
- [5] Tao S L, Liu J K, Du Y R, Li J N, Ma J B. Functional response patterns of instantaneous intake rate for vole (*Microtus oeconomus*) to the set of plant availability variables. *Acta Theriologica Sinica*, 2002, 22 (1): 20-38.
- [6] Tao S L, Liu J K, Li J N. Tests of a model mechanism of functional response in mammalian herbivores foraging. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 11 (23): 2239-2245.
- [7] Tao S L, Liu J K, Li J N, Zhang W H, He L. Comparisons of the models for functional responses of foraging in root voles (*Microtus oeconomus*). *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30 (16): 4359-4368.
- [8] Tao S L, Yang X F, Deng K D, Zhang L J, Li J N, Liu J K. Effects of vigilance on the patterns of functional responses of foraging in voles (*Microtus fortis*). *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31 (2): 410-420.
- [9] Gianoli S L, Cristian E. Herbivory may modify functional responses to shade in seedlings of a light-demanding tree species. *Functional Ecology*, 2011, 25 (3): 492-499.
- [10] Heuermann N, Langevelde F, Wieren S E, Prins H H T. Increased searching and handling effort in tall swards lead to a Type IV functional response in small grazing herbivores. *Oecologia*, 2011, 166 (3): 659-669.
- [11] Lundberg P, Danell K. Functional response of browser: tree exploitation by moose. *Oikos*, 1990, 58 (3): 378-384.
- [12] Brown J S. Vigilance, patch use and habitat selection: foraging under predation risk. *Evolutionary Ecology Research*, 1999, 1 (1): 49-71.
- [13] Fortin D, Boyce M S, Merrill E H, Fryxell J M. Foraging costs of vigilance in large mammalian herbivores. *Oikos*, 2004, 107 (1): 172-180.
- [14] Farnsworth K D, Illius A W. Optimal diet choice for large herbivores: an extended contingency model. *Functional Ecology*, 1998, 12 (1): 74-81.
- [15] Fortin D, Fryxell J M, O'Brodivich L, Frandsen D. Foraging ecology of bison at the landscape and plant community levels: the applicability of energy maximization principles. *Oecologia*, 2003, 134 (2): 219-227.
- [16] Fryxell J M. Forage quality and aggregation by large herbivores. *American Naturalist*, 1991, 138 (2): 478-498.
- [17] Edouard N, Duncan P, Dumont B, Baumont R, Fleurance G. Foraging in a heterogeneous environment — An experimental study of the trade-off between intake rate and diet quality. *Applied Animal Behavior Science*, 2010, 126 (1): 27-36.
- [18] Quaintenne G, Gils J A, Bocher P, Dekinga A, Piersma T. Diet selection in a molluscivore shorebird across Western Europe: does it show short-or long-term intake rate-maximization? *Journal of Animal Ecology*, 2010, 79 (1): 53-62.
- [19] Holling C S. The function response of predators to prey density and its role in mimicry and population regulation. *Memoirs of the Entomological Society of Canada*, 1965, 45 (2): 1-60.
- [20] Ward D. The role of satisficing in foraging theory. *Oikos*, 1992, 63 (2): 312-317.
- [21] Illius A W, Fryxell J M. Methodological problems with estimating patch depression during resource depletion. *Oikos*, 2002, 98 (3): 558-559.
- [22] Rauw W M, Soler J, Tibau J, Reixach J, Raya L G. Feeding time and feeding rate and its relationship with feed intake, feed efficiency, growth rate and rate of fat deposition in growing Duroc barrows. *Journal of Animal Science*, 2006, 84 (12): 3404-3409.
- [23] Illius A W, Duncan P, Richard C, Mesochina P. Mechanisms of functional response and resource exploitation in browsing roe deer. *Journal of Animal Ecology*, 2002, 71 (5): 723-734.
- [24] Illius A W, FitzGibbon C. Costs of vigilance in foraging ungulates. *Animal Behavior*, 1994, 47 (2): 481-484.
- [25] Hobbs N T, Gross J E, Shipley L A, Spalinger D E, Wunder B. Herbivore functional response in heterogeneous environments: a contest among models. *Ecology*, 2003, 84 (3): 666-681.
- [26] Courant S, Fortin D. Foraging decisions of bison for rapid energy gains can explain the relative risk to neighboring plants in complex swards. *Ecology*, 2010, 91 (6): 1841-1849.
- [27] Beauchamp G, Ruxton G D. Changes in anti-predator vigilance over time caused by a war of attrition between predator and prey. *Behavioral Ecology*, 2012, 23 (2): 265-270.
- [28] Searle K R, Vandervelde T, Hobbs N T, Shipley L A. Gain functions for large herbivores: tests of alternative models. *Journal of Animal Ecology*, 2005, 74 (1): 181-189.
- [29] McDonough C M, Loughry W J. Influences on vigilance in nine-banded armadillos. *Ethology*, 1995, 100 (1): 50-60.
- [30] Lima S L, Bednekoff P A. Back to the basics of anti-predatory vigilance: can non-vigilant animals detect attack? *Animal Behavior*. 1999, 58 (3): 537-543.

- [31] Monclús R, Rödel H G. Different forms of vigilance in response to the presence of predators and con-specifics in a group-living mammal, the European rabbit. *Ethology*, 2008, 114 (3): 287-297.
- [32] Lima S L, Dill L M. Behavioral decisions made under the risk of predation — a review and prospectus. *Canadian Journal of Zoology*, 1990, 68 (4): 619-640.
- [33] Ebensperger L A, Hurtado M J, Ramos-Jiliberto R. Vigilance and collective detection of predators in degus (*Octodon degus*). *Ethology*, 2006, 112 (9): 879-887.
- [34] Tchabovsky A V, Popov S V, Krasnov B R. Intra- and inter-specific variation in vigilance and foraging of two gerbillid rodents, *Rhombomys opimus* and *Psammomys obesus*: The effect of social environment. *Animal Behavior*, 2001, 62 (5): 965-972.
- [35] Lu J Q, Zhang Z B. Predation risk and its impact on animal foraging behavior. *Chinese Journal of Ecology*, 2004, 23 (2): 66-72.

参考文献:

- [4] 陶双伦, 刘季科, 都玉蓉, 李俊年, 马建滨. 根田鼠瞬时摄入率对植物可利用性变量集功能反应的格局. *兽类学报*, 2001, 21 (4): 297-380.
- [5] 陶双伦, 刘季科, 都玉蓉, 李俊年, 马建滨. 植食性小哺乳动物觅食的功能反应模型及其机制检验. *兽类学报*, 2002, 22 (1): 20-38.
- [6] 陶双伦, 刘季科, 李俊年. 植食性哺乳动物觅食功能反应模型机制的检验. *生态学报*, 2003, 11 (23): 2239-2245.
- [7] 陶双伦, 刘季科, 李俊年, 张伟华, 何岚. 根田鼠几种觅食功能反应模型的比较. *生态学报*, 2010, 30 (16): 4359-4368.
- [8] 陶双伦, 杨锡福, 邓凯东, 张良军, 李俊年, 刘季科. 东方田鼠警觉对其功能反应的作用格局. *生态学报*, 2011, 31 (2): 410-420.
- [35] 路纪琪, 张知彬. 捕食风险及其对动物觅食行为的影响. *生态学杂志*. 2004, 23 (2): 66-72.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 33, No. 9 May, 2013 (Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- Analysis of subject trends in research on sustainable development CHA Na, WU Jianguo, YU Runbing (2637)
- Metabolic scaling theory and its application in microbial ecology HE Jizheng, CAO Peng, ZHENG Yuanming (2645)
- Research progress on endophyte-promoted plant nitrogen assimilation and metabolism
..... YANG Bo, CHEN Yan, LI Xia, et al (2656)
- Review on the development of landscape architecture ecology in China YU Yijing, MA Jinyi, YUAN Yunjue (2665)

Autecology & Fundamentals

- Evaluating tillage practices impacts on soil organic carbon based on least limiting water range
..... CHEN Xuewen, WANG Nong, SHI Xiuhuan, et al (2676)
- Controls over soil organic carbon content in grasslands TAO Zhen, CI Dan Langjie, ZHANG Shenghua, et al (2684)
- Antagonistic interactive effects of exogenous calcium ions and parasitic *Cuscuta australis* on the morphology and structure of
Alternanthera philoxeroides stems CHE Xiuxia, CHEN Huiping, YAN Qiaodi, et al (2695)
- Correlation between pigment content and reflectance spectrum of *Phyllostachys pubescens* stems during its rapid growth stage
..... LIU Lin, WANG Yukui, WANG Xingxing, et al (2703)
- Response of leaf functional traits and the relationships among them to altitude of *Salix dissa* in Balang Mountain
..... FENG QiuHong, CHENG Ruimei, SHI Zuomin, et al (2712)
- Effects of phosphate and organic matter applications on arsenic uptake by and translocation in *Isatis indigotica*
..... GAO Ningda, GENG Liping, ZHAO Quanli, et al (2719)
- Effect of different preys on the predation and prey preference of *Orius similis* ... ZHANG Changrong, ZHI Junrui, MO Lifeng (2728)
- Effects of predation risk on the patterns of functional responses in reed vole foraging
..... MA Jing, TAO Shuanglun, YANG Xifu, et al (2734)
- Phylogenetic analysis of Veneridae (Mollusca: Bivalvia) based on the mitochondrial cytochrome c oxidase subunit I gene fragment ...
..... CHENG Hanliang, PENG Yongxing, DONG Zhiguo, et al (2744)
- Effects of different ecological environments in the laboratory on the covering behavior of the sea urchin *Glyptocidaris crenularis*
..... CHANG Yaqing, LI Yunxia, LUO Shibin, et al (2754)

Population, Community and Ecosystem

- The ecosystem services value change in the upper reaches of Ganjiang River Based on RS and GIS
..... CHEN Meiqiu, ZHAO Baoping, LUO Zhijun, et al (2761)
- The reference condition for Eutrophication Indicator in the Yangtze River Estuary and adjacent waters — response variables
..... ZHENG Binghui, ZHU Yanzhong, LIU Lusan, et al (2768)
- The reference condition for eutrophication Indicator in the Yangtze River Estuary and adjacent waters — Causal Variables
..... ZHENG Binghui, ZHOU Juan, LIU Lusan, et al (2780)
- The stress response of biological communities in China's Yalu River Estuary and neighboring waters
..... SONG Lun, WANG Nianbin, YANG Guojun, et al (2790)
- Ecological characteristics of macrobenthic communities and its relationships with environmental factors in Hangzhou Xixi Wetland
..... LU Qiang, CHEN Huili, SHAO Xiaoyang, et al (2803)
- Effects of biological soil crusts on desert soil nematode communities LIU Yanmei, LI Xinrong, ZHAO Xin, et al (2816)
- Associations between weather factors and the spring migration of the horned gall aphid, *Schlechtendalia chinensis*
..... LI Yang, YANG Zixiang, CHEN Xiaoming, et al (2825)
- Effects of vegetation on soil aggregate stability and organic carbon sequestration in the Ningxia Loess Hilly Region of northwest
China CHENG Man, ZHU Qiulian, LIU Lei, et al (2835)

- Simulation of the carbon cycle of *Larix chinensis* forest during 1958 and 2008 at Taibai Mountain, China LI Liang, HE Xiaojun, HU Lile, et al (2845)
- Effects of different disturbances on diversity and biomass of communities in the typical steppe of loess region CHEN Furong, CHENG Jimin, LIU Wei, et al (2856)
- Age structure and point pattern of *Butula platyphylla* in Wulashan Natural Reserve of Inner Mongolia HU Ercha, WANG Xiaojiang, ZHANG Wenjun, et al (2867)
- The impacts of the Southwest China drought on the litterfall and leaf area index of an evergreen broadleaf forest on Ailao Mountain ... QI Jinhua, ZHANG Yongjiang, ZHANG Yiping, et al (2877)
- Spatial distribution of tree species richness in Xiaodonggou forest region of the Altai Mountains, Northwest China JING Xuehui, CAO Lei, ZANG Runguo (2886)
- Landscape, Regional and Global Ecology**
- The ecological risk assessment of Taihu Lake watershed XU Yan, GAO Junfeng, GUO Jianke (2896)
- The value of fixing carbon and releasing oxygen in the Guanzhong-Tianshui economic region using GIS ZHOU Zixiang, LI Jing, FENG Xueming (2907)
- Resource and Industrial Ecology**
- Effect of different controlled-release nitrogen fertilizers on availability of heavy metals in contaminated red soils under waterlogged conditions LIANG Peijun, XU Chao, WU Qitang, et al (2919)
- Research Notes**
- Effect of heat and high irradiation stress on Deg1 protease and D1 protein in wheat chloroplasts and the regulating role of salicylic acid ZHENG Jingjing, ZHAO Huijie, HU Weiwei, et al (2930)
- The difference of drought impacts on winter wheat leaf area index under different CO₂ concentration LI Xiaohan, WU Jianjun, LÜ Aifeng, et al (2936)

《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,探索自然奥秘,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 欧阳志云

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 9 期 (2013 年 5 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 9 (May, 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@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 90.00 元