

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

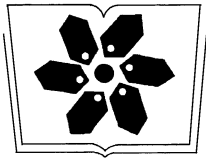
(Shengtai Xuebao)

第 31 卷 第 2 期
Vol.31 No.2
2011



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 31 卷 第 2 期 2011 年 1 月 (半月刊)

目 次

长白山山杨种群的性比格局及其空间分布	潘春芳,赵秀海,夏富才,等 (297)
冬季融冻过程中白三叶叶片抗氧化酶活力和渗透调节物含量变化与抗冻性的关系	赵 梅,周瑞莲,刘建芳,等 (306)
黄土高原主要森林类型自然性的灰色关联度分析	王乃江,刘增文,徐 钊,等 (316)
两种抗生素对龙须菜的光合生理效应	简建波,邹定辉,刘文华,等 (326)
典型喀斯特峰丛洼地植被群落凋落物 C:N:P 生态化学计量特征	潘复静,张 伟,王克林,等 (335)
塔里木河下游地下水埋深对胡杨气体交换和叶绿素荧光的影响	陈亚鹏,陈亚宁,徐长春,等 (344)
基于 MODIS/NDVI 的陕北地区植被动态监测与评价	宋富强,邢开雄,刘 阳,等 (354)
火因子对荒漠化草原草本层片植物群落组成的影响	贺郝钰,苏洁琼,黄 磊,等 (364)
4 种阔叶幼苗对 PEG 模拟干旱的生理响应	冯慧芳,薛 立,任向荣,等 (371)
城市带状绿地宽度与温湿效益的关系	朱春阳,李树华,纪 鹏,等 (383)
西藏斧钯水鸟多样性及斑头雁繁殖活动区的变化	张国钢,刘冬平,钱法文,等 (395)
王朗自然保护区大熊猫生境选择	康东伟,康 文,谭留夷,等 (401)
东方田鼠警觉对其功能反应的作用格局	陶双伦,杨锡福,邓凯东,等 (410)
台州市路桥区重金属污染对土壤动物群落结构的影响	白 义,施时迪,齐 鑫,等 (421)
青岛湾小型底栖生物周年数量分布与沉积环境	杜永芬,徐奎栋,类彦立,等 (431)
叉尾斗鱼种群遗传变异与亲缘地理	王培欣,白俊杰,胡隐昌,等 (441)
C ₃ 和 C ₄ 植物寄主对华北地区棉铃虫越冬代和第一代的影响	叶乐夫,付 雪,戈 峰 (449)
3 种海拔高度茶园中 2 种害虫与其天敌间的数量和空间关系	毕守东,柯胜兵,徐劲峰,等 (455)
坝上地区农田和恢复生境地地表甲虫多样性	刘云慧,宇振荣,王长柳,等 (465)
若尔盖高寒湿地干湿土壤条件下微生物群落结构特征	牛 佳,周小奇,蒋 娜,等 (474)
红枣贮藏期果面微生物多样性	沙月霞 (483)
CO ₂ 和温度升高情况下白粉菌侵染对西葫芦生长特性的影响	刘俊稚,葛亚明, Pugliese Massimo, 等 (491)
丛枝菌根真菌对中性紫色土土壤团聚体特征的影响	彭思利,申 鸿,袁俊吉,等 (498)
新疆断裂带泉水中细菌群落结构的 PCR-DGGE 分析	吴江超,高小其,曾 军,等 (506)
石油污染对海洋浮游植物群落生长的影响	黄逸君,陈全震,曾江宁,等 (513)
不同耐性水稻幼苗根系对镉胁迫的形态及生理响应	何俊瑜,任艳芳,王阳阳,等 (522)
基于 CLUE-S 模型的密云县面源污染控制景观安全格局分析	潘 影,刘云慧,王 静,等 (529)
基于生态足迹的生态地租分析	龙开胜,陈利根,赵亚莉 (538)
深圳市植被受损分级评价及其与景观可达性的关系	刘语凡,陈 雪,李贵才,等 (547)
专论与综述	
美国、加拿大环境和健康风险管理方法	贺桂珍,吕永龙 (556)
植物蜡质及其与环境的关系	李婧婧,黄俊华,谢树成 (565)
油田硫酸盐还原菌酸化腐蚀机制及防治研究进展	庄 文,初立业,邵宏波 (575)
叶际微生物研究进展	潘建刚,呼 庆,齐鸿雁,等 (583)

东方田鼠警觉对其功能反应的作用格局

陶双伦^{1,*}, 杨锡福¹, 邓凯东², 张良军¹, 李俊年¹, 刘季科³

(1. 吉首大学生物资源与环境科学学院, 湖南吉首 416000; 2. 中国农业科学院饲料所, 北京 100081;
3. 浙江大学生命科学学院, 杭州 310012)

摘要:植食性哺乳动物功能反应描述了摄入率与植物可利用性变量的动态关系。动物警觉因占用了处理食物时间即觅食中断时间而延迟与下一口食物相遇, 引致摄入率降低, 进而对功能反应构型产生影响。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, 建立功能反应函数模型, 检验觅食中断对功能反应的作用格局及机制。结果发现, 除小叶片斑块觅食中断时间在觅食活动中所占的比例较低外, 在大、中型叶片斑块的觅食中断时间比例均达到 15.42%—26.82%; 尽管, 觅食中断使摄入率降低了 33%, 但东方田鼠功能反应仍为 II 型功能反应。除东方田鼠采食时间及觅食回合时间随叶片重增大保持相对稳定外, 处理时间及觅食中断时间均随叶片重增大呈线性递增趋势; 采食时间、处理时间及觅食中断时间随口量的增大呈线性递增趋势; 采食率随叶片重和口量增大呈指数递减趋势。研究结果揭示, 东方田鼠因警觉引起的觅食中断事件是导致采食率及摄入率降低的主要因子。摄入率测定值与模型预测值的线性回归极显著 ($P < 0.01$), 表明, 新建立的功能反应模型具有良好的可预测性。推测, 东方田鼠因警觉引起采食率及摄入率减小的代价, 是以延长觅食时间来补偿的。研究结果充分验证了, 在可利用性植物密集斑块, 由植物大小调控的动物口量决定其摄入率, 且受采食和处理食物竞争及觅食中断的制约, 其功能反应为 II 型功能反应的假说。

关键词:东方田鼠; 警觉; 功能反应; 觅食中断; 摄入率

Effects of vigilance on the patterns of functional responses of foraging in voles (*Microtus fortis*)

TAO Shuanglun^{1,*}, YANG Xifu¹, DENG Kaidong², ZHANG Liangjun¹, LI Junnian¹, LIU Jike³

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

2 Institute of Feed Research, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China

3 College of Life Science, Zhejiang University, Hangzhou 310012, China

Abstract: The functional responses describe the relationship between variability in plants available and the intake rate of mammalian herbivores. Herbivores' vigilance has been assumed to reduce food intake by taking away time from food processing. Recently, however, it has been argued that herbivores might be capable maintaining their rate of food intake despite being vigilant, because of their ability to scan the environment while chewing vegetation. To evaluate the effects of vigilance as a foraging interruption on the patterns of herbivores' functional responses, a new mechanistic model of herbivores' functional responses was developed. The model is based on the hypothesis that herbivores' vigilance takes away time from food intake, and decreases the intake rate and modifies the patterns of functional responses by reducing the time spent on food processing. We conducted behavioral observations to evaluate whether vigilance decreases bite rates and intake rate of voles (*Microtus fortis*) foraging in food patches with fresh clover (*Trifolium repens*) leaves concentrated in space.

We devised the patches 90cm × 30cm for voles, in which fresh clover were uniformly spaced 2.0cm apart to scale leaves distribution, and differences in bite size were imposed by varying the size of leaf offered to voles in patches. Because

基金项目:国家自然科学基金资助项目(3870345); 湖南省研究生科技创新基地资助项目; 吉首大学科研课题资助项目(09JDX029)

收稿日期:2009-11-10; **修订日期:**2010-10-08

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

we were interested in instantaneous intake rate achievable at a given bite size, trials were kept brief, typically lasting no more than 2 min. A time series of foraging behavior was obtained by videotaping foraging voles. We estimated visually the proportion of each leaf cropped in each bite, and multiply by leaf size as bite size.

Modeling of foraging process indicated that the proportion of foraging interruption time in medium and large leaf patches (15.42%—26.82%) was higher than that in small leaf patches. Although foraging interruption arising from voles' vigilance reduced the rate of food intake by 33%, the response of intake rates to the leaf size of clover and the bite size of voles were still a type II functional response. Except for behavioral parameters such as cropping time and foraging bout time remaining constant with the increasing leaf size of clover, processing time and foraging interruption time all linearly increased with the increasing leaf size, and cropping time, processing time and foraging interruption time also linearly increased with the increasing bite size, but the bite rate exponentially decreased with the increasing leaf size and bite size. These results demonstrated that foraging interruption by vigilance was a main variable responsible for the decreased bite rate and intake rate. A significantly linear regressive relationship ($P < 0.01$) was detected between the intake rates observed and those predicted by the model, indicating the model prediction was satisfactory. The foraging costs of the decreased bite rates and intake rates by vigilance were speculated to be compensated by prolonged foraging time. Validation of the models provided a strong support to the following hypotheses: (1) the leaf size could control the intake rate of voles through regulating their bite size; (2) the competition between cropping and chewing and foraging interruption by vigilance might constrain their intake rates; and (3) the response of intake rates to the plant size and bite size still belonged to the type II functional response as in voles foraging in food-concentrated patches.

Key Words: *Microtus fortis*; vigilance; functional response; foraging interruption; intake rate

长期以来,生态学家普遍认为,植食性哺乳动物觅食活动中的部分警觉时间占用了咀嚼处理食物的时间,使单位时间的采食口数即采食率减小,食物摄入率降低^[1],为补偿因采食率减小可能引起的食物摄入量的损失,动物必然延长觅食时间。然而,延长觅食时间不但要消耗较多的能量,而且亦潜在地增加了与捕食者的相遇率^[2-4]。近来,一些学者则认为,植食性哺乳动物处理食物的同时能监视周围环境,故能维持摄入率^[5-9]。由于野外定量测定动物觅食行为参数的困难性和艰巨性,致使此两种对立的论点长期未能得到验证。实验室模拟研究在定量测定和准确预测动物觅食行为参数及其动态,推动觅食生态学理论的发展,起着十分重要的作用^[10]。因此,需借助精密的实验设计及精细的行为测定检验此两种论点。

植食性哺乳动物功能反应描述了动物食物摄入率与食料植物可利用性相互关系^[5]。在可利用性植物密集条件下,摄入率随植物大小及口量的增大呈渐近减速增高趋势,为典型的 II 型功能反应。依此,Spalinger 和 Hobbs^[5]建立和检验了经典的植食性哺乳动物功能反应机制模型即口量模型(式 1 和式 2),实现了植食性哺乳动物觅食生态学研究由定性描述转变为定量测定的质的飞跃。在该领域,通常采用口量模型^[9, 11-18]预测动物的摄入率。由于该模型是在可利用性植物密集条件下预测摄入率的,仅考虑了有效觅食即采食和处理(咀嚼和吞咽)食物竞争制约条件下,摄入率与可利用性植物之间的动态关系,未能考虑非觅食活动如警觉等行为动作的影响,使得其应用性受到限制^[18]。

在可利用性植物密集条件下,若动物咀嚼食物的同时,能监视周围环境和搜寻下一口食物,且咀嚼食物的时间超过监视周围环境和搜寻下一口食物的时间,则摄入率受采食和咀嚼食物竞争的制约^[6, 11-18];假定监视环境与咀嚼食物相冲突,则动物用于监视环境的行为即警觉行为动作如扫视、监听及嗅闻将延迟与下一口食物相遇,进而降低摄入率^[1],影响其功能反应格局。动物警觉行为作为其觅食活动的有机组成部分,贯穿于日觅食活动始终。Nordengren 等^[19]认为,植食性哺乳动物每天的觅食活动至少由 2 个或 2 个以上的觅食回合组成。大型植食性哺乳动物每天大约有 95% 的觅食时间用于监视周围环境即警觉^[20]。Fortin 等^[14]发现,美洲野牛(*Bison bison*)及美洲马鹿(*Cervus canadensis*)大约有 70% 的警觉时间与有效觅食时间重叠,而大约

30% 的警觉时间独立于有效觅食时间,导致觅食活动出现短暂的中断,为觅食中断时间;而植食性小型哺乳动物如田鼠类(*Microtus*)动物因其个体小,活动隐蔽,野外测定其觅食行为的困难性,很有必要在实验室进行观察测定。实验室研究发现,单只田鼠类动物如根田鼠(*Microtus oeconomus*)^[11-12, 17]和东方田鼠(*Microtus fortis*)^[16, 18]在觅食过程中不仅伴随有扫视、静听及嗅闻等警觉行为动作,而且亦常常发生自我修饰和逃离采食地行为动作,此类动作均能延迟与下一口食物相遇的时间,但其对采食率及摄入率产生何种影响,尚未见报道。在植食性哺乳动物觅食功能反应研究中,为便于准确测定瞬时摄入率,减小因饱食引起的厌食、自我修饰等非觅食行为动作发生,通常将动物饥饿一定时间,测定其在活跃觅食即在 1 个觅食回合内的觅食行为参数及过程^[5-6, 11-12, 16-18]。而处于饥饿 4—6h 的根田鼠及东方田鼠野生驯养个体在活跃觅食阶段即在 $\leq 1\text{min}$ 的觅食回合时间内,尚未发现其发生修饰行为事件。鉴于此,在可利用性植物密集斑块上,植食性小型哺乳动物东方田鼠在觅食回合时间内是如何分配有效觅食时间与觅食中断时间的? 该种时间分配对其功能反应产生何种作用? 而该种作用是否与其在植物大小(或植物生物量)不同斑块的觅食行为有关?

为探明上述问题,本文采用植食性小型哺乳动物东方田鼠喜食的新鲜白三叶(*Trifolium repens*)为食物,在实验室条件下,以相等的白三叶叶片间距设置不同重量等级的叶片,配置东方田鼠各类食物密集斑块,测定其在各类食物斑块的觅食行为及过程;建立考虑警觉条件下东方田鼠功能反应模型,检验警觉引起的觅食中断对功能反应的作用及机制。检验的特定假设为,在可利用性植物密集斑块,由植物大小调控的动物口量决定其摄入率,且受采食和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。野外捕捉后,带回室内驯养。于 3 个月后,从中选取 40 只成体(均为野外捕捉),雌雄各为 20 只,平均体重(49.7 ± 8.7)g,构成实验群体,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,附加一定数量的胡萝卜,供给充足的饮水,单只驯养于透明饲养笼。实验室温度控制在 $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$,光照周期为 12L:12D。

1.2 食物斑块配置

采用木质纤维板构建 $90\text{cm} \times 30\text{cm}$ 大小的斑块,作为实验个体觅食的活动空间。设置 7 个白三叶叶片重量(LS)等级即 1、2、4、6、8、10、12mg,控制每个等级的叶片重量,最小 LS 干重为 $(1.05 \pm 0.24)\text{mg}$,最大 LS 为 $(12.41 \pm 1.97)\text{mg}$ 。其中,1mg 和 2mg 叶片等级间干重相差约为 1.00mg 外,其余相邻 LS 等级均相差约 2.00mg。以 2.0cm 的空间距离在斑块上钻孔,孔口的直径约 0.5cm,以小型塑胶软塞将叶片固定于孔口处,构成动物 7 类食物密集斑块。

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。观测箱由投放区和觅食区 2 部分构成,两区间以底部带孔的隔板相隔,此孔作为实验个体在两区间自由活动的通路。投放区面积 $30\text{cm} \times 30\text{cm}$,觅食区面积 $90\text{cm} \times 30\text{cm}$ 。

1.4 觅食行为参数定义

参照 Spalinger 和 Hobbs^[5]、Gross 等^[21-22]、陶双伦等^[11-13]、Hobbs 和 Gross 等^[6]、Fortin 等^[14]、Nordengren 等^[12]、Sealer 等^[15]及陶双伦等^[16-18]对植食性哺乳动物觅食行为参数的定义,测定如下行为参数:

采食时间(h)为动物鼻口部接触到食物,至分离食物的时间(min);咀嚼频次(C_f)为单位时间动物上下颌咬合次数(次/min);咀嚼努力(C_e)为动物每次咀嚼的食物量(g/次);处理时间(t)为动物咀嚼和吞咽食物的时间(min);有效觅食时间(H)为动物采食和处理食物的时间($h + t$, min);采食回合时间(T_{BB})为动物开始采食至下一次采食活动开始所持续的时间(min);口量(S)为动物通过 1 次或多次采食动作,经连续咀嚼,1 次吞咽的食物量(g);觅食回合时间(T_{FB})为 1 次连续采食活动所持续的时间,在 2 个连续采食回合间至少有

1 min 无采食活动 (min); 采食口数 (n) 为觅食回合内, 动物采食的口数; 采食率 (B) 为单位时间, 动物采食的口数 (口/min); 最大处理速率 ($R_{\max}$) 为排除警觉及逃跑等非觅食活动时间, 单位时间动物处理食物的量 (g/min); 觅食中断时间 (T_{FI}) 为在觅食过程中, 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); 摄入率 (I) 为单位时间, 动物摄入的食物量 (g/min)。

1.5 实验程序及觅食行为参数估计

测定开始前 2 周, 以新鲜白三叶叶片饲喂实验动物。从实验群体中选择 20 只觅食活跃、毛色光亮的健康者雌、雄各 10 只为实验个体, 在吉首大学基础生物学动物行为学实验室测定其觅食行为。行为观测装置置于实验室特定位置, 上方悬挂一只 60W 荧光灯。为使实验个体充分适应观测装置, 将单只个体投放于观测箱, 使其适应 15 min, 每天重复 2 次。测定前, 饥饿实验个体 4—6 h。测定时, 从观测箱投放区释放单只个体, 观测者位于观测箱一侧中部, 以计数及录像机录像测定实验个体上述觅食行为参数及其行为过程序列, 同时观测者记录实验个体每口消费的叶片占单个叶片面积的比例^[7, 9, 12]。每次行为测定结束后, 分离、称重每个被食叶片的剩余部分, 以自来水彻底冲洗斑块, 去掉遗留气味, 避免影响后续实验。待斑块阴干后, 重新配置叶片, 重复上述试验。在实验测定期内, 行为测定均由同一观测者完成。

以 H 的倒数估计实验个体的 B_1 (式 1); 以 $H + T_{FI}$ 的倒数估计实验个体的 B_2 (式 3); 从每 d 配置食物斑块的新鲜白三叶叶片中, 随机抽取 100 个叶片作为样本, 在 55℃ 烘箱中烘至恒重, 测定每次实验叶片的干物质转化率。以实验个体采食叶片面积比例乘以叶片重, 估计 S ; 以 S 除以 H 估计 I_1 (式 2); 以 S 除以 $H + T_{FI}$ 估计 I_2 (式 4)。

动物觅食过程中, 由于颌的采食与咀嚼动作不能同时发生^[5], 故采食率为采食与处理每口食物时间的函数。以方程^[5]预测采食率 B_1 :

$$B_1 = \frac{1}{h + \frac{S}{R_{\max}}} = \frac{R_{\max}}{R_{\max}h + S} \quad (1)$$

式(1)中, B_1 为采食率, h 为采食时间, S 为口量, $R_{\max}$ 为最大处理速率, 以 $R_{\max} = C_e \times C_f$ ^[5] 估计。

食物密集条件下, 通常以功能反应口量模型^[11-18]预测摄入率 I_1 动态。口量模型为:

$$I_1 = \frac{S}{h + \frac{S}{R_{\max}}} = \frac{R_{\max}S}{R_{\max}h + S} \quad (2)$$

式(2)中, I_1 为摄入率, 其它参数定义同式(1)。

植食性哺乳动物觅食时, 常常监视周围环境^[20], 故 B_1 不但受采食与咀嚼竞争的制约, 同时亦受警觉的影响。在 T_{BB} 内, 由于部分警觉时间与处理食物时间不相重叠, 为觅食中断时间 T_{FI} ^[14], 因此, 式(1)改写为:

$$B_2 = \frac{1}{h + \frac{S}{R_{\max}} + T_{FI}} = \frac{R_{\max}}{R_{\max}h + S + R_{\max}T_{FI}} \quad (3)$$

式(3)中, B_2 为采食率, T_{FI} 为觅食中断时间, 其它参数定义同式(1)。以式(3)预测 B_2 。

据式(3), 在处理食物过程中或处理食物后, 觅食中断时间延迟了动物与下一口食物相遇的时间。因此, 式(2)改写为:

$$I_2 = \frac{S}{h + \frac{S}{R_{\max}} + T_{FI}} = \frac{R_{\max}S}{R_{\max}h + S + R_{\max}T_{FI}} \quad (4)$$

式(4)中, I_2 为摄入率, 其它参数定义同式(1)、式(2)及式(3)。以式(4)预测 I_2 。

1.6 统计分析

有效觅食时间比例及觅食中断时间比例以平均值 $\pm$ 标准误 ($M \pm SE$) 表示; 以对数回归分析法, 检验实验个体 I_1 及 I_2 对 LS 及 S 的功能反应, 确立功能反应型式; 以线性、指数或对数回归分析法, 检验实验个体觅食行

为参数 h 、 H 、 T_{FI} 、 B_1 、 B_2 及 T_{FB} 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_2 测定值与预测值的相关性。

2 结果

2.1 东方田鼠觅食中断时间分配

除了在 LS 为 1mg 食物斑块,东方田鼠 H 在 T_{FB} 所占比例的较高为 90.60% 外,在其余各类食物斑块所占比例均分布于 74.23%—84.58% 的范围之内(图 1a)。相反,在 LS 为 1mg 食物斑块, T_{FI} 在 T_{FB} 所占比例较低仅为 9.40% 外,在其余各类食物斑块所占比例均分布于 15.42%—26.82% 的范围,最小值为 4.07%,最大值达到 35.02%(图 1b)。东方田鼠在 LS 为 1mg 食物斑块的觅食中断时间分配较低,与其为收获 1 口的食物量而进行连续采食有关。动物在该斑块经过 1 个觅食回合后,即刻进入拒绝采食状态。

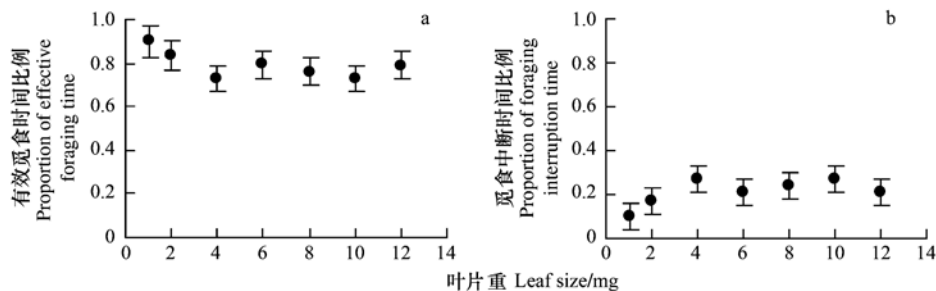


图 1 东方田鼠有效觅食及觅食中断时间在觅食活动中的分配

Fig. 1 Allocation of effective foraging time and foraging interruption time during foraging in *Microtus fortis*

2.2 东方田鼠摄入率对叶片重 LS 及口量 S 的功能反应

东方田鼠摄入率 I_1 随 LS (图 2a) 及 (图 2b) S 的增大,呈非线性渐近减速增高趋势,其功能反应均为 II 型功能反应。 I_1 与 LS 及 S 非线性回归的 ANOVA 结果显示,其回归均达到极显著水平 ($P < 0.01$) (表 1); I_2 亦对 LS (图 2, c) 及 S (图 2, d) 做出 II 型功能的反应。即当 LS 及 S 最小时, I_2 达到最小值;其后,随 LS 及 S 的增加, I_2 则以减速率快速增高;当 LS 及 S 增大至 4mg 附近时, I_2 增高趋势明显减慢;此后,随 LS 及 S 的增加, I_2 基本保持稳定,呈恒量。 I_2 与 LS 及 S 非线性回归的 ANOVA 结果显示,其回归均达到显著的水平 ($P < 0.01$) (表 1)。

上述结果表明,尽管 I_2 较 I_1 减小了近 33% (回归曲线系数比较, LS : $(18.795 - 12.392) / 18.795 = 34.07\%$; S : $(22.621 - 15.211) / 22.621 = 32.76\%$) (图 2),但东方田鼠功能反应构型没有改变,仍为 II 型功能反应。

2.3 东方田鼠觅食行为参数对叶片重 LS 及口量 S 的反应

东方田鼠觅食行为参数 h 随 LS 的增大,无明显的变动规律,呈恒量(图 3a),然而 h 随 S 的增大,则呈明显增高趋势(图 3b)。线性回归的 ANOVA 结果显示, h 与 S 的线性回归达到极显著水平 ($P < 0.01$) (表 1); t (图 3c、图 3d) 和 T_{FI} (图 3e、图 3f) 均随 LS 及 S 的增大均呈线性增高趋势。线性回归的 ANOVA 结果表明,其与 LS 及 S 的线性回归均达到显著或极显著水平 ($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$) (表 1)。 T_{FB} 随 LS 的增大无明显的变动规律,基本保持稳定(图 3g)。

然而,东方田鼠 B_1 随 LS 及 S 的增大,则以渐进减速率缓慢降低(图 4a、图 4b),当 LS 增大至 8mg (图 4a) 或 S 增大接近 4mg (图 4b) 时, B_1 则保持稳定,呈恒量。表明, B_1 与 LS 及 S 存在渐进的函数递减关系。非线性回归的 ANOVA 结果显示, B_1 与 LS 及 S 的回归均达到极显著的水平 ($P < 0.01$) (表 1); B_2 亦对 LS (图 4c) 及 S (图 4d) 的增大作出减速递减的反应。当 LS 增大至 4mg (图 4c) 或 S 接近 4mg (图 4d) 时, B_2 则保持稳定。表明, B_2 与 LS 及 S 亦存在渐进递减的函数关系。非线性回归的 ANOVA 结果显示, B_2 与 LS 及 S 的回归均达到极显著的水平 ($P < 0.01$) (表 1)。与 B_1 对 LS 及 S 的反应比较,尽管 B_2 对 LS 及 S 的反应格局没有发生改变,

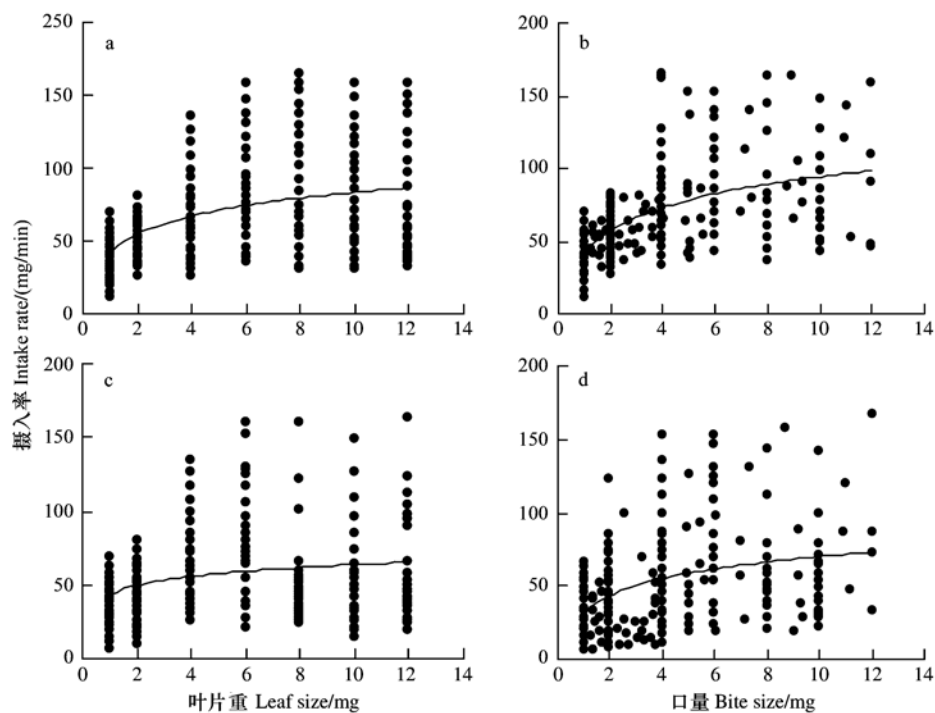


图 2 东方田鼠摄入率与白三叶叶片重及口量的渐进函数关系

Fig. 2 Asymptotic function relationship between the intake rate and the clover leaf size or bite size in *Microtus fortis*

但 B_2 较 B_1 减小了近 27% (回归曲线系数比较, $LS: (32.226 - 23.499)/32.226 = 27.08\%$; $S: (29.892 - 21.779)/29.892 = 27.14\%$) (图 4)。

表 1 东方田鼠觅食行为参数与叶片重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 *Microtus fortis* foraging

行为参数	独立变量	曲线估计	<i>F</i>	<i>df</i>	<i>P</i>	<i>R</i> ²	模型
摄入率 <i>I</i> ₁	叶片重	对数函数	23.651	1, 176	0.000	0.229	$y = 18.795\ln(x) + 39.229$
	口量	对数函数	61.961	1, 176	0.000	0.244	$y = 22.621\ln(x) + 38.456$
摄入率 <i>I</i> ₂	叶片重	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	$y = 15.211\ln(x) + 31.773$
采食时间	口量	线性函数	15.737	1, 176	0.000	0.082	$y = 0.001x + 0.010$
处理时间	叶片重	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	$y = 0.012x + 0.013$
采食回合时间	叶片重	线性函数	96.884	1, 176	0.000	0.356	$y = 0.013x + 0.034$
	口量	线性函数	109.984	1, 176	0.000	0.394	$y = 0.018x + 0.031$
觅食中断时间	叶片重	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	$y = 0.008x + 0.036$
采食率 <i>B</i> ₁	叶片重	渐进函数	187.647	1, 176	0.000	0.516	$y = 32.226e^{-0.135x}$
	口量	渐进函数	129.315	1, 176	0.000	0.424	$y = 29.892e^{-0.162x}$
采食率 <i>B</i> ₂	叶片重	渐进函数	106.523	1, 176	0.000	0.377	$y = 23.499e^{-0.135x}$
	口量	渐进函数	78.957	1, 176	0.000	0.310	$y = 21.779e^{-0.162x}$

行为参数 Foraging parameters; 独立变量 Variables; 曲线估计 Curve estimates; 模型 Models; 摄入率 Intake rate; 采食时间 Cropping time; 处理时间 Treatment time; 有效觅食时间 Time of effective foraging; 采食回合时间 Time of biting bout; 觅食中断时间 Time of foraging interruption; 采食率 Biting rate; 叶片重 Leaf size; 口量 Bite size

2.4 模型预测性

东方田鼠摄入率 I_2 测定值与式(4)预测值线性回归的 ANOVA 结果 ($F_{(1, 176)} = 274.973, P < 0.01, R^2 = 0.653$) 显示, 二者的回归达到极显著水平, 回归方程为 $y = 1.257x + 9.888$ (图 5), 表明模型具有良好的可预

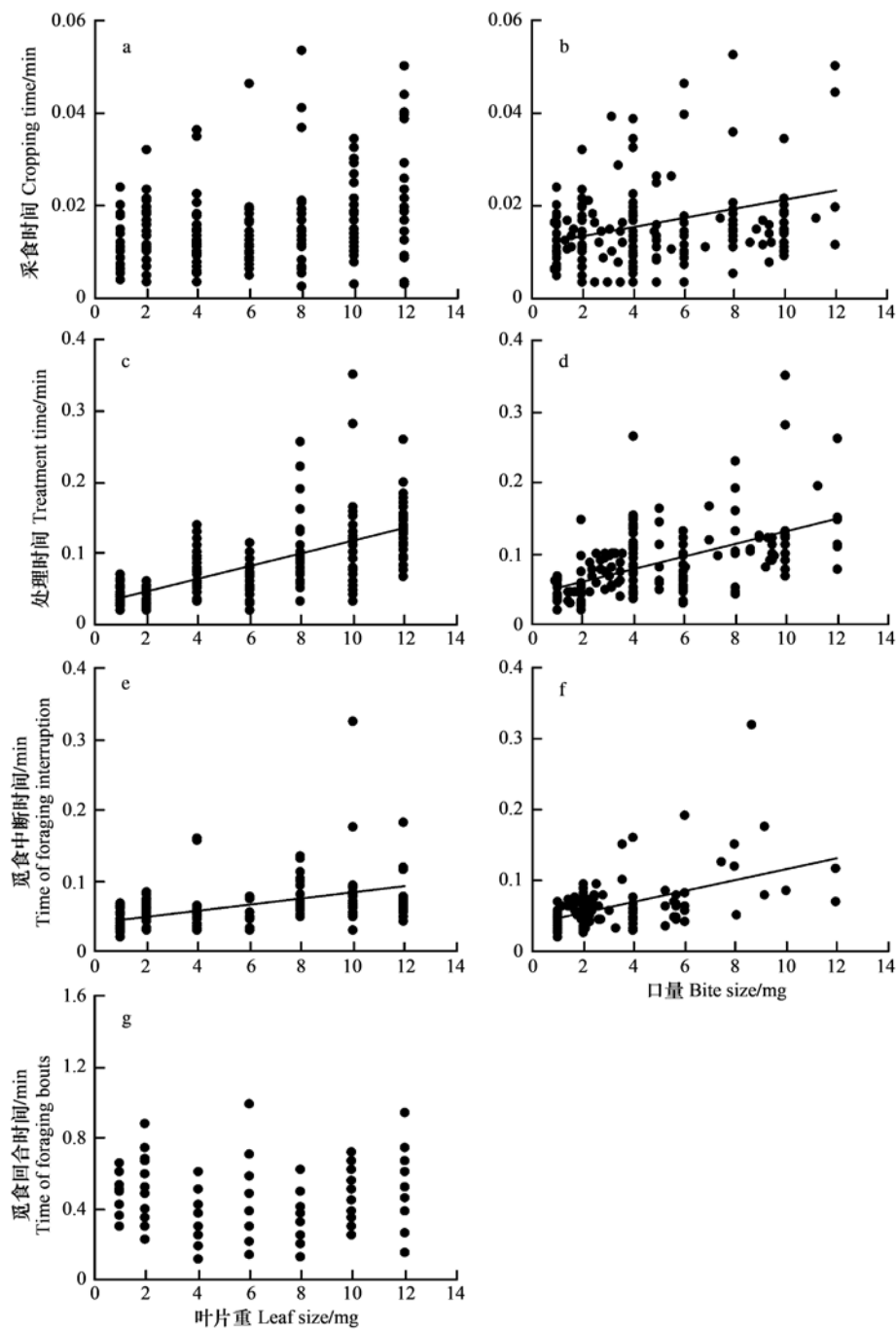


图3 东方田鼠觅食行为参数对白三叶叶片重及其口量的反应

Fig. 3 Responses of behavioral parameters of foraging to the clover leaf size and bite size in *Microtus fortis*

测性。

上述检验结果充分地说明,在可利用性植物密集斑块,由植物大小调控的动物口量决定其摄入率,且受采食与处理食物竞争及觅食中断的制约,其功能反应仍为Ⅱ型功能反应。

3 讨论

研究结果表明,除了在白三叶叶片重为 1mg 食物斑块,东方田鼠有效觅食时间在觅食回合中所占的比例较高,最大值达到 96.43% 外,其它食物斑块有效觅食时间比例均维持在 78% 的水平,而大约 22% 的时间为警觉行为中的觅食中断时间(图 1)。该结果与 Fortin 等^[14]观测的美洲野牛及美洲马鹿的有效觅食时间或觅食

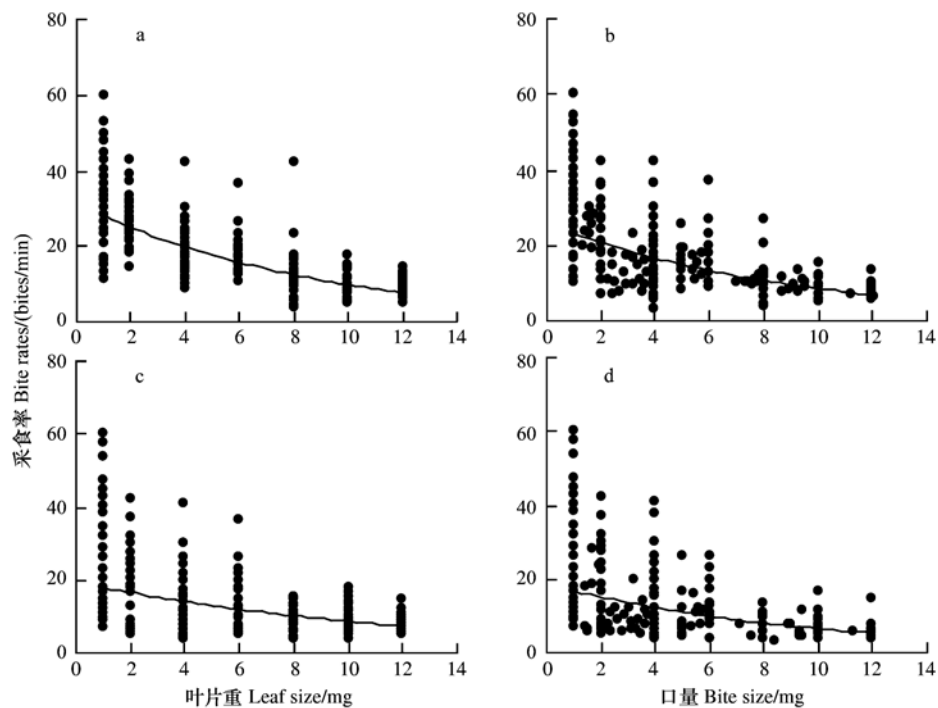


图4 东方田鼠采食率对白三叶叶片重及其口量的反应

Fig. 4 Responses of the bite rate of *Microtus fortis* to the clover leaf size and bite size

中断时间分配比例较为接近,但有一定的差异。本文认为,这可能与这两类动物体型大小差异巨大,警觉潜在风险的行为及能力差异^[21,23],以及测定觅食时间的方法不同^[11]有关。在1mg叶片斑块,可能由于其可利用性较低,东方田鼠完成一快速连续的觅食回合后,即刻进入拒绝采食状态,该斑块叶片密度亦即为在东方田鼠觅食放弃密度范围之内。

在剔除警觉、逃跑等非觅食活动时间仅考虑有效觅食活动时间条件下,东方田鼠食物摄入率对白三叶叶片重及口量的功能反应为Ⅱ型功能反应(图2a、图2b),此与定量测定植食性小型哺乳动物根田鼠及高原鼠兔(*Ochotona curzoniae*)功能反应的结果一致^[12-13]。尽管,在采食回合时间内即在包括警觉、逃跑等非觅食活动时间条件下,东方田鼠摄入率对口量的功能反应型构没有改变,仍为Ⅱ型功能反应(图2c、图2d),但摄入率较前者下降了近33%(图2c、图2d)。

饶有兴味的是,东方田鼠日食物干物质摄入量大约为6000—8000mg,在考虑觅食中断作用条件下,若摄入率以60mg/min计算,可利用性食物丰富时,其每天仅需觅食2—3h,即可满足其日能量需求;若考虑到胃容量及食物消化的制约作用,以及非觅食活动如自我修饰、种内及种间干扰性竞争、以及捕食风险压力等影响,则其觅食时间可能会更长。因此推测,东方田鼠为摄取日需食物量,应适度延长觅食活动时间。但无论如何,该值较口量模型预测的摄入率更接近现实。

一些学者认为,植食性哺乳动物觅食活动中的警觉行为有一定的代价,但不重要,通过提高采食率,能维

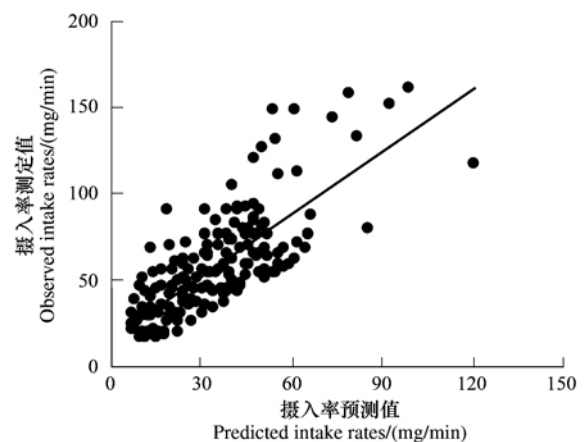


图5 东方田鼠摄入率测定值与预测值的线性回归关系

Fig. 5 Linearly regressive relationship between observed and predicted intake rates of *Microtus fortis*

持其摄入率^[5-9]。然而,以连续采食、咀嚼和吞咽方式摄取食物提高采食率,势必会降低警觉行为动作发生的频次和持续时间,增大被捕食的风险,降低其适合度^[8];若以降低采食率来提高警觉,尽管在一定程度上能降低被捕食的风险,但为满足日能量需求,动物势必会延长觅食时间,降低各种除觅食活动以外的其它活动如社会性活动的时间,亦能降低其适合度^[8]。因此推测,植食性哺乳动物觅食活动中的警觉行为动作如扫视、监听和嗅闻与采食和处理(咀嚼和吞咽)食物动作可能存在一最优匹配模式,以使适合度最大化。

已有的植食性哺乳动物功能反应模型很少考虑动物觅食活动中的警觉代价,而动物觅食活动中的警觉行为是长期进化适应环境的产物,其贯穿于觅食活动的始终。虽然东方田鼠扫视周围环境的时间与部分处理食物的时间相重叠,但监听和嗅闻动作则与采食和处理食物动物不相重叠。无论如何,在考虑觅食中断的作用时,东方田鼠采食率下降了近 27%,直接导致其摄入率降低了近 33%。虽然在一定程度上动物可通过提高采食率,增大短期摄入率,减小觅食中断所造成的代价,但是,采食率受采食与处理食物竞争的制约^[5],采食大、中型植物或以大、中型口量采食食物的采食率保持相对稳定(图 4c、图 4d),摄入率亦保持相对稳定(图 2c、图 2d)。东方田鼠并未因上次觅食中断事件所造成的觅食代价,在其后的采食回合中通过即时提高采食率(图 4c、图 4d)或摄入率(图 2c、图 2d),以降低警觉来补偿。植食性哺乳动物功能反应口量模型由于未考虑动物在觅食活动中因警觉引起的觅食中断时间对摄入率的作用,而过高地估计了采食率和摄入率,植食性小型哺乳动物觅食活动中的警觉行为代价主要是通过延长觅食时间来补偿的。

研究发现,东方田鼠采食时间随叶片重增大,并无明显地变动规律(图 3a),然而采食时间则随口量的增大呈极显著地增高趋势(图 3b;表 1)。处理时间(图 3c、图 3d)及觅食中断时间(图 3e、图 3f)亦随叶片重及口量的增大呈极显著或显著地增高趋势(表 1),而觅食回合时间动态则与叶片重或叶片斑块生物量无关(图 3g)。已有的研究^[15]表明,小型植物易于采食和控制,而大口量采食食物的同时增加了控制食物的难度,进而延长了采食时间;类似地,处理大口量食物能提高处理单位食物的速率,但同时也增加了控制食物的难度,且大口量食物需要更长的时间进行咀嚼和粉碎,故亦延长了处理时间。尽管,采食时间及处理时间均随叶片重或口量增大而增高,但采食大型可利用性植物或以大口量采食能同时提高瞬时摄入率,因此,动物因警觉引起的觅食中断事件是导致采食率及摄入率降低的主要因子。

东方田鼠觅食中断时间亦随叶片重及口量的增大而增高,尽管增高缓慢,其二者回归直线斜率仅为 0.008(表 1),但增高趋势却没有改变(图 3e、图 3f)。植食性哺乳动物能在口量尺度上评价食物斑块的可利用性^[25]。在可利用性较高的食物斑块,易引起动物的聚集,能在短期内增大其种群密度,而较高的种群密度所引起的食品库效应,增加了被捕食的风险压力^[23-24];类似地,在可利用性较高的食物斑块,亦加剧了因食物资源引起的种内及种间竞争^[23-27]。动物在长期适应性进化过程中及在生态时间内如群体内个体通过试错学习和社会学习,形成并增进了评价和权衡所处环境收益与风险的能力^[28-29]。随着食物斑块可利用性增大,动物能感知上述风险的增加,其警觉性随之提高,导致觅食中断时间延长。Fortin 等^[14]亦发现,随环境植被生物量增加,美洲野牛及美洲马鹿的警觉性亦逐步增强,但未能给予解释。此论点还有待进一步的实验验证。

本研究中,尽管在实验开始前 15d,每天 2 次,每次 10—15min,使实验个体适应观测箱,并在实验前饥饿 4—6h,但每次实验,大部分个体仍需至少 0.5—1min 或更长时间的观察如沿斑块周边以边行走边嗅闻、扫视或监听等活动,巡视一周后,才进入觅食状态即至少进行 2—3 个采食回合。在实验进入最后阶段,大部分个体投放至斑块后,依然保持上述行为特征。因此,每次实验,从鼠笼到观测箱,从一种类型食物斑块转移至另一类型食物斑块,个体面对熟悉而又陌生的环境始终没有放松警惕。在 1mg 小叶片食物斑块,大部分实验个体采用 4—6 次连续而快速的采食动作完成一次觅食活动后,即刻进入拒绝采食状态。在 2mg 小叶片食物斑块,大部分实验个体尽管亦采用 4—6 次,有些甚至达到 10 次连续而快速的采食动作完成一次觅食活动后,才出现觅食中断事件,但随后又进入下一觅食活动;而在大、中型叶片(4—12mg)斑块,大部分个体采食 2—3 口食物后即刻出现觅食中断事件。因此,长期的进化适应及相互学习和切身的经历,形成了动物应对所处环境的能力^[29],其亦为上述论点提供了佐证。

总括上述,在新鲜白三叶叶片密集斑块条件下,东方田鼠觅食白三叶叶片的功能反应模型及机制,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] Brown J S. Vigilance, patch use and habitat selection; foraging under predation risk. *Evolutionary Ecology Research*, 1999, 1(1): 49-71.
- [2] Gates C C, Hudson R J. Effects of posture and activity on metabolic responses of wapiti to cold. *Journal of Wildlife Management*. 1979, 43(2): 564-567.
- [3] Wickstrom M L, Robbins C T, Hanley T A, Spalinger D E, Parish S M. Food intake and foraging energetics of elk and mule deer. *Journal of Wildlife Management*, 1984, 48(4): 1285-1301.
- [4] Moen R, Pastor J, Cohen Y. A spatially explicit model of moose foraging and energetics. *Ecology*, 1997, 78(2): 505-521.
- [5] Spalinger D E, Hoobs N T. Mechanisms of foraging in mammalian herbivores; new models of functional responses. *Animal Naturalist*, 1992, 140(2): 325-348.
- [6] 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.
- [7] Shaner P J, Bowers M, Macko S. Giving-up density and dietary shifts in the white-foot mouse, *Peromyscus leucopus*. *Ecology*, 2007, 88(1): 87-95.
- [8] Shipley L A. The influence of bite size on foraging at larger spatial and temporal scales by mammalian herbivores. *Oikos*, 2007, 116(12): 1964-1974.
- [9] Englund G, Leonardsson K. Scaling up the functional response for spatially heterogeneous systems. *Ecology*, 2008, 11(3): 440-449.
- [10] Brown J S, Kotler B P. Hazardous duty pay and the foraging cost of predation. *Ecology*, 2004, 7(10): 999-1014.
- [11] 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): 297-380.
- [12] Tao S L, Liu J K, Du Y R, Li J N, Ma J B. A model and tests of its mechanism of functional response on small mammalian herbivores. *Acta Theriologica Sinica*, 2002, 22(1): 30-38.
- [13] 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.
- [14] Fortin D, Boyce M S, Merrill E H, Fryxell J M. Foraging costs of vigilance in large mammalian herbivores. *Oikos*, 2004, 107(1): 712-180.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] Tao S L, Zhang W H, Li J N, He L, Yang X F. Validation of the mechanism for decelerating energy gains in mammalian herbivores. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(18): 4839-4847.
- [18] Tao S L, Zhang W H, Li J N, He L. Assessment of validation and application of several models for energy gain function in mammalian herbivores. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(20): 5431-5438.
- [19] Nordengren C, John P. A field assessment of the Spalinger-Hobbs mechanistic foraging model: free-ranging moose in winter. *Canadian Journal of Zoology*, 2005, 83(1): 518-526.
- [20] Berger J, Cunningham C. Size-related effects on search times in North American grassland female ungulates. *Ecology*, 1988, 69(1): 177-183.
- [21] Gross J E, Wunder B A, Hobbs N T. Independent variables for predicting intake rate of mammalian herbivores; biomass density, plant density, or bite size?. *Oikos*, 1993, 68(1): 75-81.
- [22] 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.
- [23] Liu J K, Su J P, Liu W, Wang X, Nie H Y, Li Y M. Field experimental studies on the multifactorial hypothesis of population system regulation for small rodents; an analysis of effects of food availability and predation on population dynamics of root vole. *Acta Theriologica Sinica*, 1994, 14(2): 117-129.
- [24] Nie H Y, Liu J K. Regulation of root vole population dynamics by food supply and predation; a two-factor experiment. *Oikos*, 2005, 109(2): 387-395.

- [25] Andreassen H P, Ims R A, Steinset O K. Discontinuous habitat corridors; effects on male root vole movements. *Journal of Applied Ecology*, 1996, 33(3):555-560.
- [26] Gundersen G, Andreassen H P. Causes and consequences of natal dispersal in root voles, *Microtus oeconomus*. *Animal Behaviour*, 1998, 56(6): 1355-1366.
- [27] Ims R A, Andreassen H P. Effects of experimental habitat fragmentation and connectivity on root vole demography. *Journal of Animal Ecology*, 1999, 68(5):839-852.
- [28] Solomon N G, Christopher S Y, Lisa A B. Social transmission and memory of food preferences in pine voles (*Microtus pinetorum*). *Journal of Comparative Psychology*, 2002, 116(1): 35-38.
- [29] Li J N, Liu J K, Tao S L. Social learning of food preferences of conspecifics in root voles. *Acta Theriological Sinica*, 2008, 28(3): 260-265.

参考文献:

- [11] 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.
- [12] 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): 30-38.
- [13] 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.
- [16] 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.
- [17] 陶双伦,张伟华,李俊年,何岚,杨锡福. 植食性哺乳动物能量收益增长减速机制的检验. *生态学报*,2010,30(18):4839-4847.
- [18] 陶双伦,张伟华,李俊年,何岚. 植食性哺乳动物能量收益函数模型预测性及适用性分析. *生态学报*,2010,30(20):5431-5438.
- [23] 刘季科,苏建平,刘伟,王溪,聂海燕,李玉敏. 小型啮齿动物种群系统调节复合因子理论的野外实验研究:食物可利用性和捕食对根田鼠种群动态作用的分析. *兽类学报*, 1994,14(2):117-129.
- [29] 李俊年,刘季科,陶双伦. 根田鼠幼体食物选择的社群学习. *兽类学报*,2008,28(3): 260-265.

CONTENTS

Sex ratio and spatial pattern in <i>Populus davidiana</i> in Changbai Mountain	PAN Chunfang, ZHAO Xiuhai, XIA Fucui, et al (297)
The relationship between freeze-tolerance and changes in activities of antioxidant enzymes and osmolyte content in the leaves of white clover during early winter freeze-thaw cycles	ZHAO Mei, ZHOU Ruilian, LIU Jianfang, et al (306)
Gray correlation analysis on naturalness of the primary forest types on the Losses Plateau	WANG Naijiang, LIU Zengwen, XU Zhao, et al (316)
Photosynthetic responses of <i>Gracilaria lemaneiformis</i> to two antibiotics	JIAN Jianbo, ZOU Dinghui, LIU Wenhua, et al (326)
Litter C:N:P ecological stoichiometry character of plant communities in typical Karst Peak-Cluster Depression	PAN Futing, ZHANG Wei, WANG Kelin, et al (335)
Effects of groundwater depth on the gas exchange and chlorophyll fluorescence of <i>Populus euphratica</i> in the lower reaches of Tarim River	CHEN Yapeng, CHEN Yaning, XU Changchun, et al (344)
Monitoring and assessment of vegetation variation in Northern Shaanxi based on MODIS/NDVI	SONG Fuqiang, XING Kaixiong, LIU Yang, et al (354)
Effects of fire on the structure of herbage synusia vegetation in desertified steppe, North China	HE Haoyu, SU Jieqiong, HUANG Lei, et al (364)
Physiological responses of four broadleaved seedlings to drought stress simulated by PEG	FENG Huifang, XUE Li, REN Xiangrong, et al (371)
Effects of the different width of urban green belts on the temperature and humidity	ZHU Chunyang, LI Shuhua, JI Peng, et al (383)
Diversity of waterbirds and change in home range of bar-headed geese <i>Anser indicus</i> during breeding period at Hangcuo Lake of Tibet, China	ZHANG Guogang, LIU Dongping, QIAN Fawen, et al (395)
The habitat selection of Giant panda in Wanglang Nature Reserve, Sichuan Province, China	KANG Dongwei, KANG Wen, TAN Liuyi, et al (401)
Effects of vigilance on the patterns of functional responses of foraging in voles (<i>Microtus fortis</i>)	TAO Shuanglun, YANG Xifu, DENG Kaidong, et al (410)
Influence of heavy metal pollution on soil animal community in Luqiao, Taizhou City	BAI Yi, SHI Shidi, QI Xin, et al (421)
Annual quantitative distribution of meiofauna in relation to sediment environment in Qingdao Bay	DU Yongfen, XU Kuidong, LEI Yanli, et al (431)
Population genetic variations and phylogeography of <i>Macropodus opercularis</i>	WANG Peixin, BAI Junjie, HU Yinchang, et al (441)
Contribution of C ₃ and C ₄ host plants for the overwintering and 1 st generation of <i>Helicoverpa armigera</i> (Hübner) in Northern China ..	YE Lefu, FU Xue, GE Feng (449)
Relationships between two species of insect pests and their natural enemies in tea gardens of three different altitudes	BI Shoudong, KE Shengbing, XU Jinfeng, et al (455)
The diversity of ground-dwelling beetles at cultivated land and restored habitats on the Bashang plateau	LIU Yunhui, YU Zhenrong, WANG Changliu, et al (465)
Characteristics of soil microbial communities under dry and wet condition in Zoige alpine wetland	NIU Jia, ZHOU Xiaoqi, JIANG Na, et al (474)
Microbial diversity of the jujube (<i>Zizyphus jujuba</i> Mill.) fruits surface during harvesting and storage stages	SHA Yuexia (483)
Effects of powdery mildew infection on zucchini growth under elevated CO ₂ and temperature	LIU Junzhi, GE Yaming, Pugliese Massimo, et al (491)
Impacts of arbuscular mycorrhizal fungi on soil aggregation dynamics of neutral purple soil	PENG Sili, SHEN Hong, YUAN Junji, et al (498)
The bacterial community structures in Xinjiang fault belt spring analyzed by PCR-DGGE	WU Jiangchao, GAO Xiaoqi, ZENG Jun, et al (506)
The impact of oil pollution on marine phytoplankton community growth change	HUANG Yijun, CHEN Quanzhen, ZENG Jiangning, et al (513)
Root morphological and physiological responses of rice seedlings with different tolerance to cadmium stress	HE Junyu, REN Yanfang, WANG Yangyang, et al (522)
Non-point pollution control for landscape conservation analysis based on CLUE-S simulations in Miyun County	PAN Ying, LIU Yunhui, WANG Jing, et al (529)
Analysis on ecological land rent based on ecological footprint	LONG Kaisheng, CHEN Ligen, ZHAO Yali (538)
Relationship of vegetation degradation classification and landscape accessibility classification in Shenzhen	LIU Yufan, CHEN Xue, LI Guicai, et al (547)
Review and Monograph	
Risk management approaches for environmental and human health risks in the United States and Canada	HE Guizhen, LÜ Yonglong (556)
Plant wax and its response to environmental conditions: an overview	LI Jingjing, HUANG Junhua, XIE Shucheng (565)
Acid corrosion mechanism of the sulfate-reducing bacteria and protecting studies in oilfield	ZHUANG Wen, CHU Liye, SHAO Hongbo (575)
Advance in the research of phyllospheric microorganism	PAN Jiangang, HU Qing, QI Hongyan, et al (583)

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 31 卷 第 2 期 (2011 年 1 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 31 No. 2 2011

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		

