



我国草原鼠害防治靶向诱饵研究进展

袁 帅^{1,2,3*} 刘亚坤^{1,2,3} 付和平^{1,2,3} 武晓东^{1,2,3}

(1. 内蒙古农业大学草原与资源环境学院, 呼和浩特 010011; 2. 草地啮齿动物生态学与鼠害控制自治区高等学校重点实验室, 呼和浩特 010011; 3. 草地资源教育部重点实验室, 呼和浩特 010011)

摘要: 啮齿动物是草地生态系统不可或缺的成分,在维持生态系统结构等方面发挥着重要作用,但鼠害也是我国草地退化的原因之一。我国草原类型多样,各类型草原为害鼠种差异较大,因此,草原鼠害防治需要“一鼠一策”。在“生态优先,绿色发展”背景下,我国草原鼠害防控要走“专鼠专治、精准防治”的绿色防控之路。目前我国草原鼠害化学防治面临可使用的注册药物少,新型药物的研发周期长且审批严格,现有药物靶标特异性差的困境,这一现状短期难以改变。但是靶向诱饵研发可以作为解决上述问题的重要途径。该文对鼠害化学防治诱饵的研发现状、分类、各类诱饵的优缺点、目前面临的问题以及提升诱饵靶向性途径等方面进行了综述,认为靶向诱饵从增强目标害鼠对其取食吸引力入手,提升对现有控鼠药物靶向性的同时,可以减少对非靶标动物的伤害,节约原粮和维持草原生态系统的生物多样性,在未来我国草原鼠害的防治中具有广阔的应用前景。但是目前靶向诱饵的研究数量较少,无论是在机理研究或应用研究方面都不够深入;相关专利数量偏少且缺乏转化,草原鼠害防控相关学者和企业应对诱饵研发予以重视。

关键词: 草原鼠害; 靶向性; 诱饵; 化学防治; 食性

Research progress of targeted bait for rodent pest control in grasslands of China

Yuan Shuai^{1,2,3*} Liu Yakun^{1,2,3} Fu Heping^{1,2,3} Wu Xiaodong^{1,2,3}

(1. College of Grassland, Resources and Environment, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010011, Inner Mongolia Autonomous Region, China; 2. Key Laboratory of Grassland Rodent Ecology and Rodent Pest Control at Universities of Inner Mongolia Autonomous, Hohhot 010011, Inner Mongolia Autonomous Region, China; 3. Key Laboratory of Grassland Resources, Ministry of Education, Hohhot 010011, Inner Mongolia Autonomous Region, China)

Abstract: Rodents are indispensable components in grassland ecosystems, and play important roles in maintaining the ecosystem structure. However, rodent pest damage is also one of the reasons for grassland degradation in China. Rodent pests are diversified in different grassland types in China. Therefore, a “one rodent pest species to one control strategy” is necessary for grassland pest control. Under the policy of “ecological priority and green development” in China, the prevention and control of grassland rodent pests should follow the environment-friendly way with “specific treatment and precise control for specific rodent species”. However, at present, the chemical control of rodent pests in China faces the dilemma of few rodenticides being permitted in grassland, long research and development cycle of new rodenticides and strict registration procedure, and poor specificity of effective constituents in current rodenticides, which is difficult to change in the short term. Improving the target specificity of

基金项目: 国家自然科学基金(32060256, 32060395), 内蒙古自治区青年科技人才发展计划(NJYT22044), 内蒙古自治区科技计划项目(2021GG0108), 内蒙古自治区科技重大专项(2021ZD0006)

* 通信作者 (Author for correspondence), E-mail: yuanshuai2020@163.com

收稿日期: 2024-04-26

base bait can be an expected solution. Targeted bait is designed to increase the attraction for target pests to feed them, improve the target specificity of existing rodenticide, reduce the harm to non-target animals, save grains used for baits and maintain the biodiversity in grassland ecosystems. Targeted bait has broad application prospects in grassland rodent pest control in China. However, there are few researches on targeted bait either in action mechanism or application. In this article, we review the research and development status and classification of baits for rodent pest control, the advantages and disadvantages of various types of baits, and the ways to improve the target specificity. We aim to draw the attention of scholars and enterprises related to the rodent pest control in grasslands in China.

Key words: grassland rodent pest; targeting; bait; chemical control; feeding habits

啮齿动物是草地生态系统中不可或缺的成分,在维持生态系统结构等方面发挥着重要作用,但其为害也是造成我国草地退化的原因之一。我国草原鼠害年均发生面积为3 504.58万 hm^2 ,约占全国草地面积的13.77%(王德华,2020;严川等,2023)。目前我国草原鼠害主要防治手段仍以化学防治为主,包括使用灭杀药剂应对鼠类暴发和使用不育剂进行常规防控(严川等,2023)。但多数化学灭鼠剂的广谱杀灭作用是草原鼠害化学防治风险的核心原因。杀鼠剂残留风险主要来源于残留毒饵被非靶标动物取食或误食,以及二次毒性在食物链传播所造成的风险(Nakayama et al.,2019)。虽然一些新型杀鼠剂已开始考虑靶标性,但其对非靶标动物的种类、个体数量的评价都很局限,基本没有种群水平上的评价(Fancourt et al.,2022)。因此,减少对非靶标动物的伤害是目前我国草原鼠害化学防治面临的迫切问题。由于我国对生态环境日益重视,提高杀鼠剂使用效率和环境安全性已成为最主要的研究领域之一(刘晓辉,2018)。随着一些控鼠药物不断禁用,而新型灭鼠剂审批周期长,允许在草原上使用的灭鼠剂种类较少。目前我国登记使用范围涉及草原、草地和牧草的控鼠药物仅有3种(花立民和柴守权,2022)。如何利用有限的药物产品实现鼠害的精准防治是当前草原保护工作面临的巨大问题。

无论何种灭鼠剂,在使用时通常都会搭载诱饵制成毒饵进行投放。通过高适口性的诱饵,啮齿动物接触并摄入足够剂量致死或导致不育的药物,是

降低啮齿动物种群数量的核心原则之一(Samaniego-Herrera et al.,2022)。适口性越好的毒饵,鼠类取食量越大,对鼠类杀灭效果越佳(汪诚信,2019)。因此,诱饵类型是鼠害控制重点考虑因素。确定针对目标害鼠物种的特定诱饵类型是能否高效吸引其取食、提升杀鼠剂效率的关键因素(Mohd-Taib & Ishak,2021;刘晓辉,2023)。但是我国草原鼠害化学防治研究中,多数研究更关注杀鼠剂研发,而忽视了诱饵研究。诱饵是有害生物治理的强大工具(Taggart et al.,2023),所以诱饵研发是提升鼠害精准防治的重要手段。

1 文献收集与筛选

本文以“鼠害”为主题在中国知网和超星平台进行文献搜索,再以“化学防治”为关键词进行全文二次检索,并去除重复后获得1 117篇研究文章。通过对这些文献的通篇阅读,最终筛选出568篇文章与本研究相关,专门研究诱饵的文献只有57篇。对所有保留文献中的诱饵种类和成分进行了统计。笔者又分别以“杀鼠剂”“引诱剂+鼠”“饵料+鼠”和“诱饵+鼠”在超星平台搜索国内专利900个,明确提到诱饵成分的有97个,去除其中重复后剩余专利88个(表1),最后形成了本研究所用的数据集。在所有保留的文献中,如果1篇文献中涉及诱饵多种成分,那么这篇文献在不同诱饵成分统计时可重复计数,因此本文部分图表中涉及成分的文献数量大于筛选保留的文献数量。

表1 鼠害防治诱饵专利数量

Table 1 Number of patents for rodent control baits

检索词 Search term	二次检索词 Second search term	诱饵配方类 Bait formula	其他类型 Other type	总数 Total
杀鼠剂 Rodenticide	-	33	40	73
引诱剂 Attractant	鼠 Rodent	21	40	61
诱饵 Bait	鼠 Rodent	19	560	579
饵料 Bait	鼠 Rodent	24	163	187

2 鼠害防治诱饵研究现状

诱饵通常是专门设计的、最大限度提高靶标物种消费量的食物(Johnston et al., 2020)。目的是将毒药、不育剂或疫苗通过诱饵高效地传递给靶标动物(Taggart et al., 2023)。诱饵是灭鼠毒饵中占比最大的组分,通常是单一谷物或者复合物,一般为鼠类喜食的食物(夏武平, 1996)。无论是杀鼠剂研究还是诱饵研究在1980年之前的发文量几乎为零。之后有关药物的研究的期刊文章呈现快速增加的趋势,但是有关诱饵的研究却基本处于停滞状态(图1)。仅有的文献多是在研究鼠药药效时进行了诱饵对比,而专门的研究诱饵的文章极少(图1)。这可能是由于潜在商业价值,更多研发处于保密或受专利保护的状态(刘晓辉, 2018)。但是从专利授权情况来看,虽然与鼠害防治诱饵相关的专利授权数呈上升趋势,但专利总数并不多,草原鼠害防治诱饵专利更少(表1, 图2),这表明我国鼠害防治诱饵研发仍然处于起步阶段,具有较大发展空间。

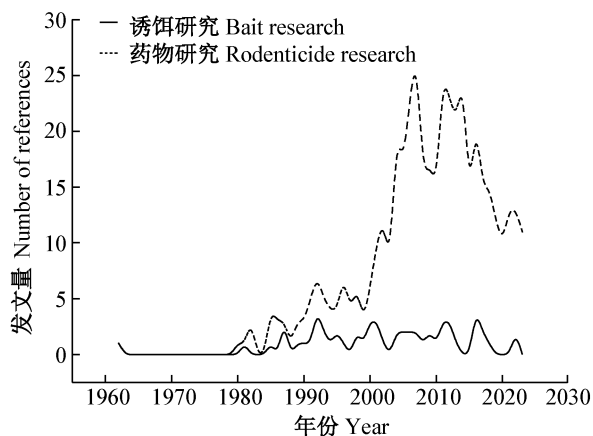


图1 杀鼠剂及诱饵研究文献量

Fig. 1 Number of research papers on rodenticides and baits

3 诱饵类型及其优缺点

不同配方会影响诱饵在动物胃肠道中滞留时间及胃肠道对药物的吸收效果(Williams et al., 2019)。按照配方成分的数量可将诱饵大致分为单一成分诱饵和复合诱饵2大类。

3.1 单一成分诱饵

我国鼠害防治诱饵多为单一成分诱饵,占比约70%,远高于复合诱饵的使用(图3-A),其中,粮食作为单一成分诱饵使用的占比接近60%(图3-B)。关于诱饵的研究整体数量不多,虽然单一成分诱饵

研究占比相对较大,但专门研究单一成分诱饵适口性的文章并不多(图4)。在单一成分诱饵研究中,主要防治对象为城市和农田害鼠,包括家栖的褐家鼠 *Rattus norvegicus*、黄胸鼠 *Rattus flavipectus* 和小家鼠 *Mus musculus* 及农田的黑线姬鼠 *Apodemus agrarius*。主要使用的诱饵以稻谷、大米、玉米和小麦(王谷生等, 1992; 王国良, 2003)。农田环境下,害鼠多以谷物类为食源,故农田灭鼠多选择鼠类喜食谷物为诱饵,这些诱饵一般也都是单一成分诱饵(董天义和邓址, 1987; 卢方林和安万琴, 2001; 刘兵林, 2010)。

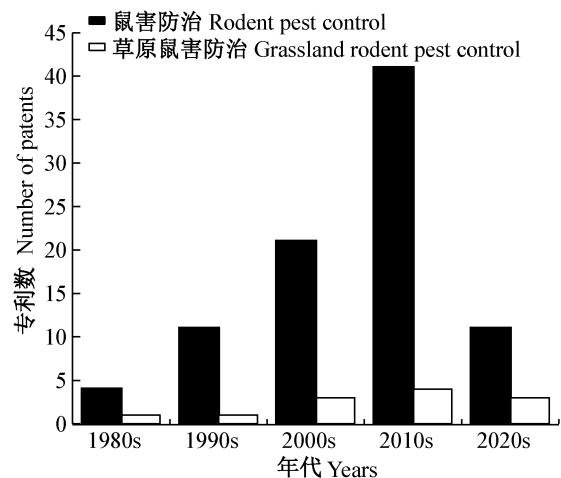


图2 鼠害防治诱饵授权专利数量

Fig. 2 The number of granted patents for rodent pest baits

虽然草原鼠害防治使用单一成分诱饵的研究仅占诱饵种类研究比例的21.8%,但草原灭鼠中毒饵使用单一成分诱饵为载体的研究论文数量仍远高于使用复合诱饵的研究论文数量(图3-A),且同样以粮食成分为主(图3-B)。如胡国元等(2016)以燕麦为诱饵搭载D型肉毒毒素制成颗粒毒饵,对高原鼠兔 *Ochotona curzoniae* 进行防治试验,灭效达95%以上。

3.2 复合诱饵

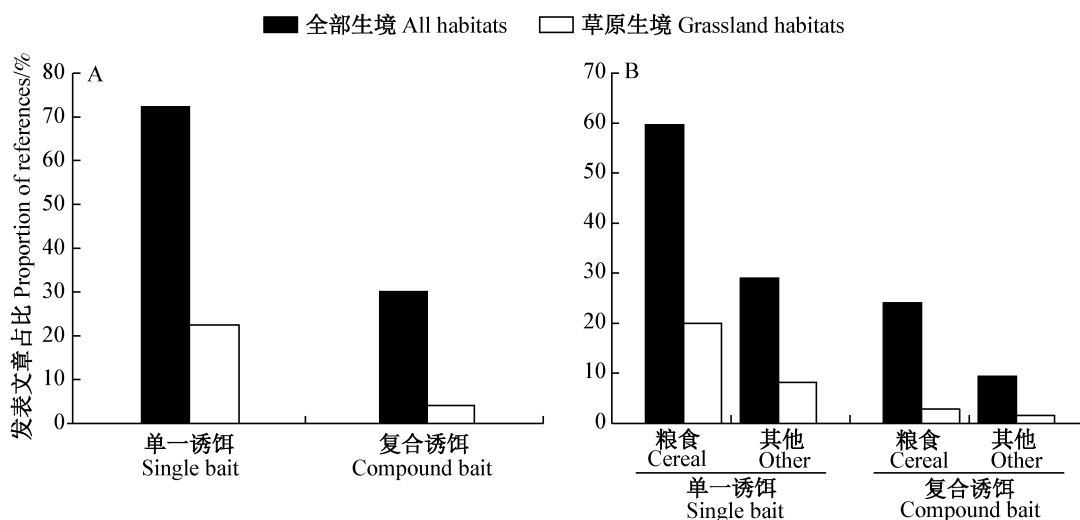
复合诱饵是指由一种以上成分按照一定配比混合而成的诱饵。复合诱饵根据成分性质分为粮草复合诱饵和非粮草复合诱饵。我国鼠害防治涉及复合诱饵研究的文章数量远低于单一成分诱饵,占比约为30%左右(图3-A)。且这些研究中涉及的复合诱饵也以粮食成分为主(图3-B)。专门进行复合诱饵适口性研究的每10年发文量长期低于10篇的水平(图4)。

3.2.1 粮草复合诱饵

粮草复合诱饵通常以不同的原粮、秸秆或牧草等成分按照一定比例配制而成。潘凤庚等(1985)根

据防治对象食性,将玉米粉、小麦碴、大麦碴、高粱粉、面粉和麸皮等按不同比例,加适量水制成诱饵;Hartley et al.(2000)在碎小麦粒和谷粒中添加5%的蛋壳粉和3%的植物油作为诱饵,在人类生活区杀灭褐家鼠等啮齿动物时的效果显著。关于以作物秸秆混合工业、农业副产物替代粮食诱饵的研究也有报道,如孙进忠等(2018)使用高粱秆、玉米芯、玉米秸、葵花饼、小麦秸、酒糟和醋糟,经粉碎机粉碎后,加入成形材料膨润土配成复合诱饵。草原鼠害防治中使用牧草为主要成分的复合诱饵早期也有相关报道,如董维惠和侯希贤(1980)以天然草为主要成分

复合一定比例莠面、麦麸或豆饼制成颗粒诱饵对布氏田鼠 *Lasiopodomys brandti*、达乌尔黄鼠 *Spermophilus dauricus*、高原鼠兔 *O. curzoniae* 和长爪沙鼠 *Meriones unguiculatus* 进行防治效果测定,发现不同鼠类对诱饵具有不同的选择性,这有利于针对不同鼠种研发靶向性诱饵。张平森等(1996)利用红豆草 *Onobrychis viciifolia* 草粉制成颗粒并配制成毒饵,将草粉、面粉、黄土和水按一定比例混合均匀压制成草粉颗粒,搭载灭鼠剂后对高原鼠兔进行防治。总的来看,粮草复合诱饵的研究及实践应用并不多。



A: 单一成分诱饵和复合诱饵发文占比; B: 粮食成分在单一成分诱饵和复合诱饵研究中的发文占比。

A: The research paper proportions of single component baits and compound baits; B: the paper proportions of grains components in the study of single-component baits and compound baits.

图3 不同生境鼠害防治研究中涉及不同种类诱饵发表文章比例

Fig. 3 Research paper proportions of different baits in rodent pest control in different habitats

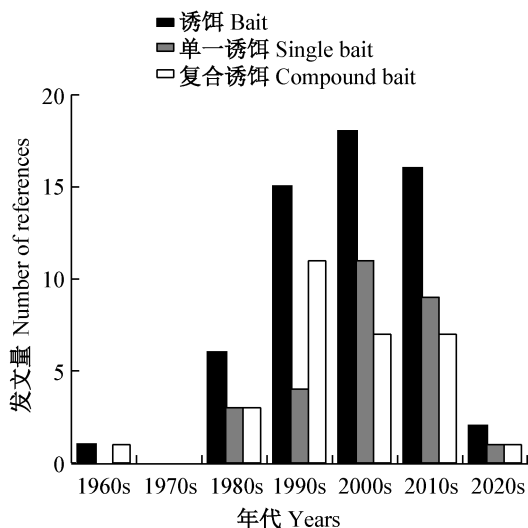


图4 鼠害防治诱饵研究的发文章量

Fig. 4 The number of research papers on rodent pest baits

3.2.2 非粮草复合诱饵

非粮草复合诱饵的成分主要为除粮食、牧草和秸秆以外的物质。国内学者曾将土、石粉制成绿豆大小的丸剂搭载氟乙酰胺配制成毒饵。包正等(1981)研究发现滑石粉丸、白粉丸、大白土粉丸、观音土丸、观音土+黄泥粉丸和黄泥粉丸等诱饵在达乌尔黄鼠、布氏田鼠和长爪沙鼠的防治中具有一定效果。虽然这种诱饵成本低廉,原料容易获得,但适口性差。蜡块也是国内外常见的一种灭鼠诱饵,它按一定比例将灭鼠剂、饵料、引诱剂倒入融溶的蜡液中,凝固定型而成。蜡块诱饵具有防潮性好、不易发霉变质并通过毒饵站投放保护其他非靶标动物、不会引起禽畜误食的优点,适合应用于沟渠、下水道等较为潮湿场所灭鼠,是一种较好的商品灭鼠剂型(张晓等,2016;李瑞和尹家祥,2020)。但蜡块多用于城

市灭鼠诱饵,在草原鼠害防治中很少使用。

3.3 不同类型诱饵优缺点

单一成分诱饵大多数采用1种原粮作物如稻谷、大米、小麦等种子(图5-A),在社区、城市、农田和草原鼠害的防控中应用最广泛。其优点是获取方便,配制简单,无论药物是杀灭剂还是不育剂都可以使用。但这种类型诱饵存在以下缺点:一是这些原粮作物的种子对非靶野生动物尤其是鸟类普遍具有吸引力,会增加非靶标动物的误食概率;二是非靶标动物的取食会增加诱饵消耗量,进而增加成本;三是使用单一原粮诱饵进行鼠害防治会使鼠对毒饵的摄食率下降,影响灭鼠效果(李镜辉等,1989;王谷生等,1992)。一些单一成分诱饵,如小麦对于部分杀鼠剂药物的搭载效果并不理想,需要增加额外的粘附剂才能更好的搭载药物。此外,单一成分诱饵多为原粮直接拌药物(图5-A),对粮食消耗较大。全国仅1年在农田灭鼠工作中就要消耗 4.5×10^4 t粮食,不仅防控成本高还造成大量粮食损失(刘晓辉,2018)。内蒙古自治区草原鼠害防治仅2020年锡林郭勒盟1个盟市的原粮消耗就在900 t左右。在国家高度重视粮食安全的情况下,将粮食作为诱饵大量用于鼠害控制不适宜。

目前复合诱饵在对家鼠和农田鼠害的防治中使用较多,但成分也多以粮食为主要配方。复合诱饵具有利于药物渗透、药效易于保持和稳定等特点(张平森等,2004)。由于复合诱饵制作工艺比单一成分诱饵复杂,其初始成本可能高于单一诱饵。但是复合诱饵可通过降低原粮比例,增加就地材料或廉价替代成分来降低成本。复合诱饵可通过添加糖或脂肪等引诱剂,封装或使用掩味剂来改善鼠药适口性差的问题(Witmer & Raymond-Whish, 2021; Stuart et al., 2022);还可以加入针对目标害鼠的靶向引诱剂提高复合诱饵的靶向性。因此,复合诱饵同单一成分诱饵相比具有靶向性高、使用灵活以及易结合药物等诸多优势。但是在草原鼠害的防治中,很少有专门针对某种害鼠进行专属复合诱饵的研究。

4 诱饵研发存在的问题

4.1 靶标性问题

关于诱饵靶标性问题,可以分为不同的靶标特异性问题。第一,啮齿类与非啮齿类(包括家畜、天敌等)的区分问题;第二,相同区域内的不同啮齿类的区分问题。从逻辑上讲,如果可以做到区分单一啮齿动物种类的水平,将可以直接解决杀鼠剂目前

存在的靶标性风险问题。我国草原鼠害防治中主要关注对非啮齿类野生动物的保护,而忽视对啮齿类非靶标动物的保护。许多啮齿动物在草地生态系统中发挥着重要作用,有些甚至属于我国特有种和受胁物种(蒋志刚,2020)。啮齿动物的特性以及我国啮齿类的物种多样性决定了很难在一个地区找到1种药物仅仅对少数害鼠种类有特异灭杀效果(刘晓辉,2023)。常用的杀鼠剂及所有用于野生动物的经口不育剂对很多非靶标动物都有潜在风险(Erickson & Urban, 2004; Massei, 2023)。这种风险可以通过削弱非靶标天敌对害鼠的顶-底控制作用或减少与害鼠同营养级的非靶标动物的竞争作用,进而为害鼠创造有利环境(Lohr & Davis, 2018)。因此必须通过载体解决药物对非靶标动物的影响(Massei, 2023)。而诱饵作为药物传递的最主要载体,在我国草原鼠害防治其对啮齿类非靶标动物的影响并未受到足够重视,如小麦等原粮作物属于低靶向诱饵,但是由于配制和机械撒播简便等因素,常被用做我国草原鼠害防治的主要诱饵(图5-A),但是这类诱饵通常对许多非靶啮齿动物均具有吸引力。

4.2 诱饵研发问题

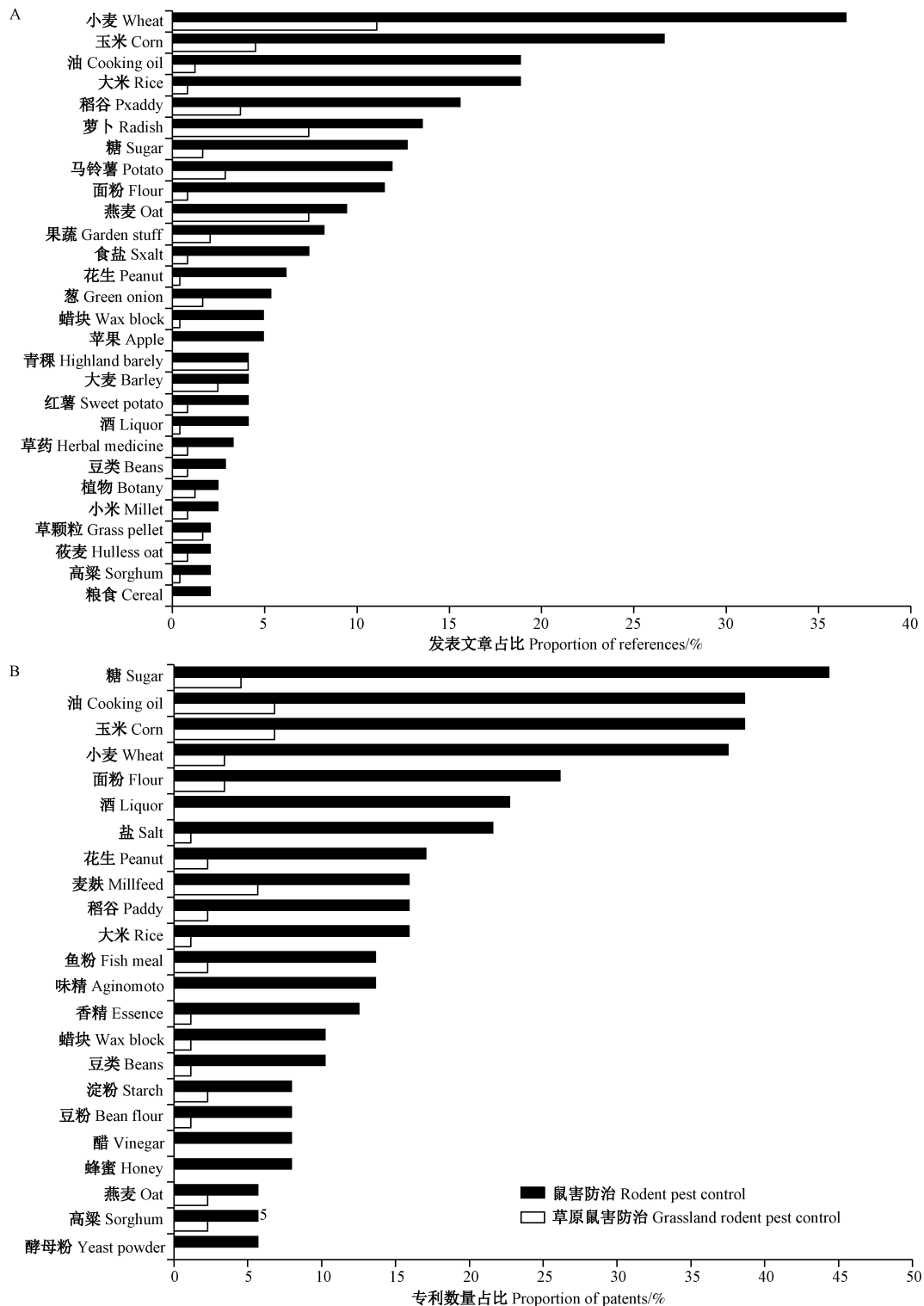
国外通过不断改变诱饵的大小、颜色、成分和施用方法将避免其对非靶标动物的影响作为有害动物控制的关键研究领域之一,并已取得实质性进展(Eason & Spurr, 1995; Glen et al., 2007; Eason et al., 2011),但仍然在进行持续性的研究投入(Taggart et al., 2023)。而我国草原鼠害防治诱饵研究在应用及作用机理方面的研究均较少。我国的草原害鼠种类较多,在没有法律或规章制度明确“一鼠一策”的情况下,针对每种害鼠研发不同的诱饵并不符合企业的利益。相关高校和科研院所对草原鼠害的研究也多集中在害鼠的成灾机制研究及控制药物的研发上,对诱饵研究关注度不高。

4.3 观念与成本问题

用传统的农田植物保护思维进行草原鼠害防治存在误区。草原鼠害防治与农田鼠害防治的不同点在于,农田鼠害防治需要无差别控制啮齿动物,快速降低其种群数量,减少农作物损失。而在草原鼠害防治过程中,由于鼠类在草地生态系统中的重要作用,在挽回牧草损失的同时,还要考虑生态效益。所以,我国不同的草地类型需要多样的“专鼠专治,精准防治”策略。但在实际草原鼠害防治中,诱饵使用并没有过多的考虑靶向性,仍然是以降低同域分布的所有鼠类为主要目的(周成毅,2023),究其原因除

了没有专属的诱饵产品供选择外,主要是传统诱饵操作简单,成本低等导致的。在“生态优先,绿色发展”的理念下,仅考虑操作简便是不可取的。在成本

可接受的范围内,优先选用靶向诱饵。因此需要转变观念,处理好眼前成本与长远成本、操作简单与生态优先的问题。



A: 研究文章中单一诱饵成分排序; B: 授权专利中复合诱饵引诱剂成分排序。A: Sorting of single component baits in research papers; B: sorting of attractant components used in compound baits in granted patents.

图5 鼠害防治诱饵成分排序

Fig. 5 Sorting of bait components for rodent pest control

5 提升诱饵靶向性的途径

增加诱饵的靶向性主要考虑2个方面:一是提升诱饵对目标害鼠的适口性和吸引力;二是降低对非靶标动物的诱惑或增强对其的趋避性。增加诱饵靶向性主要通过以下途径实现。

5.1 发掘特异食性资源

诱饵是不同生境下捕获小型哺乳动物的公认材料,且诱饵类型对啮齿动物捕获率有显著影响(Kok et al., 2013)。不同种小型哺乳动物具有差异化的诱饵偏好。所以,在不同生境使用不同诱饵可影响小型哺乳动物数量及物种组成(Woodman et al., 1996)。Warwick & Schiffman(1992)发现在野外环境下通过确定防控对象的食性来配制诱饵是非常可靠的,这种方式可以提高防控对象的取食率。我国的草原类型多样,草原啮齿动物分布具有明显的地带性,在不同草地类型中往往形成地带性鼠类群落,每个群落的优势鼠种存在差异(武晓东和付和平, 2005)。这些优势鼠种的食性也明显不同,其与同域分布的动物的食性或营养生态位分离(岳闯等, 2020;陈国康等, 2023)。因此,从这些鼠种的特异性食物研究入手,发掘诱饵食物资源是可行的。

5.2 添加害鼠引诱剂或非靶标动物趋避剂

5.2.1 食欲引诱剂

与性引诱剂不同,食欲引诱剂是指能引诱害鼠摄食毒饵的组分或药剂。利用鼠类对食物中某些成分的偏好可以制成食欲引诱剂。在引诱剂的专利中,糖是使用频率最高的非粮食成分(图5-B)。有研究发现,在岛屿上生活的大鼠更喜欢高脂肪和高糖食物,在食物资源有限的情况下,会对脂肪食物产生偏好(Smith & Wilson, 1989; Negus & Ross, 1997)。Johnston et al.(2005)发现啮齿动物非常喜食糖。一些研究表明通过在诱饵配方中添加糖,用发芽谷物代替未发芽谷物或添加淀粉酶将其转化为糖可以提高谷物诱饵的适口性(MacLeod et al., 1953; Smith & Wilson, 1989; Auta et al., 2014)。如 Witmer et al.(1998)通过在燕麦片上涂抹燕麦水解酶提升松鼠对诱饵的摄食率。国内学者杜恩强等(2016)将成分为油、盐、糖、醋、奶粉、豆粉、坚果的引诱剂与适口性较好的秸秆和糟粕按比例制成诱饵进行灭鼠时,发现其效果优于小麦,且成本降低30%。但是糖对其他野生动物同样具有很高的吸引力,所以不适合作为特异性的食欲引诱剂。除粮食成分外,酒、味精、香精、醋等也被作为食欲引诱剂应用于诱饵配方中(图5-B)。

5.2.2 非靶标动物趋避剂及催吐剂

趋避剂是指在诱饵中加入某种制剂后能够抑制非靶标动物摄食的物质。Kelty(2023)研究发现红海葱由于具有强烈的苦味通常被人和家畜拒食,但是鼠类却可以接受这种食物。杨学军等(2002)利用鼠类不具呕吐反应,而多数非靶标动物可具有呕吐的生理特征,在诱饵中添加催吐剂,让非靶标动物误食毒饵后引发呕吐反应避免中毒。可以利用这些研究成果减少对非靶标动物的伤害。

5.3 改变诱饵颜色或规格

利用非靶标动物如鸟类对颜色的偏好,可通过对诱饵涂装不同颜色达到非靶标动物对诱饵拒食或少食的目的(Towns & Broome, 2003; Struebig et al., 2015)。在控制入侵啮齿动物时,根据鸟类对颜色的偏好习性,使用保证啮齿动物取食,但对鸟类不具吸引力的颜色对诱饵进行染色,以此降低诱饵对非靶物种的吸引(Howald et al., 1999; Weser & Ross, 2013)。但非靶标动物的颜色偏好存在较大的物种间差异。例如新西兰知更鸟 *Petroica australis* 更易拒食蓝色诱饵(Hartley et al., 2000),而有些鸟类如雪松太平鸟 *Bombycilla cedrorum* 和暗冠蓝鸦 *Cyanocitta stelleri* 更易拒食绿色诱饵(Slaby & Slaby, 1977; McPherson, 1988)。因此,通过确定更多非靶物种特有的颜色偏好来降低毒药对非靶标动物取食是可行的(Howald et al., 1999)。

通过改变诱饵的形状或大小也可以降低非靶标动物的取食。如董维惠和侯希贤(1980)通过在草原上对比牲畜对不同粒径的草颗粒取食情况发现,直径为3.2 mm的天然草颗粒按照10粒/m²的密度均匀撒播时,羊群不易取食到草颗粒。

5.4 改变诱饵投放时机或方法

毒饵站是我国学者发明的杀鼠剂投放技术,是指允许鼠类自由进入取食而限制其他动物进入、能盛放灭鼠毒饵的一种容器(施大钊等, 2009; 刘晓辉, 2018)。毒饵站可以避免部分非靶标动物对毒饵的取食。随着科学技术的发展,毒饵站向智能化方向发展。一些研究学者将红外监测、智能识别及物联网等科技手段应用于诱饵盛放装置中以实现定时定量投饵,监测诱饵消耗种类和消耗量,识别害鼠种类和监测种群数量等功能(Parsons & Ross, 2020; Beatham et al., 2021)。在害鼠种类识别的基础上,还可以开发针对不同鼠类进行差异化投饵的功能。但受成本影响,智能毒饵站常在城市和农田鼠害防治中使用,草原鼠害防治中只在小范围试用。

根据草原鼠类防治最佳时期,如每年春季投饵,

投饵后短期禁牧等也可避免非靶标动物取食。此外,通过严格限定单位面积投饵量,可降低非靶标动物误食率。Ballard et al. (2020)提出的诱饵投入-产出关系假说认为,对于某些物种来说,更高的诱饵密度将导致更大的引诱效果。设置最优投饵密度,既能以最小的财力和劳动力成本对靶向动物种群产生最佳影响,同时也可避免剩余诱饵对非靶标动物的影响。

5.5 精确评价诱饵对非靶标动物的影响

国外在有害动物控制中一直将避免非靶标动物影响作为关键研究领域,但是我国在面对草原鼠害生态优先控制策略时,缺乏对天敌动物风险的监测及评估,严重影响了不同草地类型中鼠害控制的科学性(刘晓辉,2022),更缺少对非靶啮齿动物的监测及评估。从研究的组织尺度来看,多数研究只集中在毒饵对动物少数个体的影响上,在种群水平上评估对非靶标动物影响的研究较少(Fancourt et al., 2022)。因此,在进行靶向评价时,应尽可能涵盖同域分布的非靶野生动物种类,尽可能在种群水平上评价对非靶标动物影响。准确的结果反馈将有利于诱饵靶向性提升。但是由于法律对野生动物的保护,室内评估只能选择驯化的动物代替评估。野生种群的评估更困难,但是随着科技水平的不断进步,如DNA宏条码、红外相机技术、无人机技术及物联网技术等的应用,未来这一问题将会得到很好的解决。

6 展望

对于野生动物管理者来说,批判性地评估并不断改进操纵种群和诱导生态系统变化的手段是至关重要的。诱饵作为使用范围最广、见效最快的手段,对其评估和改进显得尤为重要(Taggart et al., 2023)。我国草原类型多样,不同类型草原有害鼠种差异较大,在“生态优先,绿色发展”的大背景下,草原鼠害防治需要“一鼠一策”,走“专鼠专治、精准防治”的绿色防控道路。但是,草原鼠害防控中可用的注册药物少,新型药物的研发周期长、审批严格,现有药物靶标特异性差,这一现状短期难以改变。靶向诱饵研发可作为解决上述问题的重要途径,因此在未来我国草原鼠害的防治中将具有广阔的应用前景。未来靶向复合诱饵的研究将通过诱饵机理研究提升其引诱性和搭载药物后的适口性、增加非靶标动物趋避性、替换原粮成分以及降低成本等多个方面入手,提升对现有控鼠药物靶向性的同时,减少对非靶标动物的伤害,节约原粮和维持草原生态系统的生物多样性。

参考文献 (References)

- Auta YI, Suberu HA, Bello IM. 2014. Effect of malting duration on yield and proximate composition of 'Fura' produced with the grains of *Pennisetum typhoides*. Food Science & Quality Management, 27: 33–38
- Ballard G, Fleming PJS, Meek PD, Doak S. 2020. Aerial baiting and wild dog mortality in south-eastern Australia. Wildlife Research, 47(2): 99
- Bao Z, Tao XN, Lü WD, Zhou PY, Liu HP. 1981. Experimental study on rodent control with poison bait loaded with soil and stone powder pills. Chinese Journal of Grassland, 3(1): 53–59 (in Chinese) [包正, 陶孝农, 吕卫东, 周丕义, 刘和平. 1981. 土、石粉丸载体毒饵灭鼠的试验研究. 中国草原, 3(1): 53–59]
- Beatham SE, Goodwin D, Coats J, Stephens PA, Massei G. 2021. A PIT-tag-based method for measuring individual bait uptake in small mammals. Ecological Solutions and Evidence, 2(2): 1–7
- Chen GK, Yuan S, Fu HP, Wu XD, Li X, Li LL. 2023. Interspecific trophic niches of two dominant jerboas in the Alax desert. Acta Ecologica Sinica, 43(17): 7193–7202 (in Chinese) [陈国康, 袁帅, 付和平, 武晓东, 李鑫, 李琳琳. 2023. 阿拉善荒漠区两种优势跳鼠种间营养生态位. 生态学报, 43(17): 7193–7202]
- Dong TY, Deng Z. 1987. Selective test of *Rattus norvegicus* and *Mus musculus* on cereal food. Chinese Journal of Vector Biology and Control, 3(1): 25–26 (in Chinese) [董天义, 邓址. 1987. 褐家鼠和小家鼠对谷类食物的选择性试验. 中国鼠类防治杂志, 3(1): 25–26]
- Dong WH, Hou XX. 1980. Performance of grass pellets bait for rodent pest control. Chinese Journal of Zoology, 15(1): 43–46 (in Chinese) [董维惠, 侯希贤. 1980. 草颗粒灭鼠诱饵的性能. 动物学杂志, 15(1): 43–46]
- Du EQ, Ren HB, Zou B, Lü H, Zhang BD, Li WW, Zhang JH, Zhang XF, Yang MF, Chen J, et al. 2016. Non-raw grain bait rodents JZLY9 dosage form develop and testing the effect of rodents. Agricultural Technology and Equipment, (9): 20–22, 25 (in Chinese) [杜恩强, 任海宝, 邹波, 吕红, 张碧岱, 李卫伟, 张建宏, 张小芳, 杨鸣凤, 陈洁, 等. 2016. 一种非原粮灭鼠诱饵JZLY9剂型的研制与灭鼠效果试验. 农业技术与装备, (9): 20–22, 25]
- Eason C, Miller A, Ogilvie S, Fairweather A. 2011. An updated review of the toxicology and ecotoxicology of sodium fluoroacetate (1080) in relation to its use as a pest control tool in New Zealand. New Zealand Journal of Ecology, 35(1): 1–20
- Eason CT, Spurr EB. 1995. Review of the toxicity and impacts of brodifacoum on non-target wildlife in New Zealand. New Zealand Journal of Zoology, 22(4): 371–379
- Erickson W, Urban D. 2004. Potential risks of nine rodenticides to birds and nontarget mammals: a comparative approach. Washington: United States Environmental Protection Agency, pp. 1–230
- Fancourt BA, Harry G, Speed J, Gentle MN. 2022. Correction to: efficacy and safety of Eradicator® feral cat baits in eastern Australia: population impacts of baiting programmes on feral cats and non-target mammals and birds. Journal of Pest Science, 95(1): 523–524
- Glen AS, Gentle MN, Dickman CR. 2007. Non-target impacts of poison baiting for predator control in Australia. Mammal Review, 37

- (3): 191–205
- Hartley L, Waas J, O'Connor C, Matthews L. 2000. Colour preferences and coloured bait consumption by weka *Gallirallus australis*, an endemic New Zealand rail. *Biological Conservation*, 93(2): 255–263
- Howald GR, Mineau P, Elliott JE, Cheng KM. 1999. Brodifacoum poisoning of avian scavengers during rat control on a seabird colony. *Ecotoxicology*, 8(6): 431–447
- Hu GY, Li ZN, Huang R, Zhang XY, Li SQ, Fan YX, Wang TT. 2016. Test of type D botulinum toxin particles poison bait controlling plateau pika. *Chinese Qinghai Journal of Animal and Veterinary Sciences*, 46(1): 21–22 (in Chinese) [胡国元, 李志宁, 黄荣, 张西云, 李生庆, 范玉霞, 王亭亭. 2016. D型肉毒毒素颗粒毒饵灭治高原鼠兔试验. *青海畜牧兽医杂志*, 46(1): 21–22]
- Hua LM, Chai SQ. 2022. Rodent pest control on grasslands in China: current state, problems and prospects. *Journal of Plant Protection*, 49(1): 415–423 (in Chinese) [花立民, 柴守权. 2022. 中国草原鼠害防治现状、问题及对策. *植物保护学报*, 49(1): 415–423]
- Jiang ZG. 2020. China's red list of biodiversity. Vertebrates, volume I, mammals: volume 1. Beijing: Science Press, pp. 74–78 (in Chinese) [蒋志刚. 2020. 中国生物多样性红色名录. 脊椎动物第1卷哺乳动物: 上册. 北京: 科学出版社, pp. 74–78]
- Johnston JJ, Nolte DL, Kimball BA, Perry KR, Hurley JC. 2005. Increasing acceptance and efficacy of zinc phosphide rodenticide baits via modification of the carbohydrate profile. *Crop Protection*, 24(4): 381–385
- Johnston M, Algar D, O'Donoghue M, Morris J, Buckmaster T, Quinn J. 2020. Efficacy and welfare assessment of an encapsulated para-aminopropiophenone (PAPP) formulation as a bait-delivered toxicant for feral cats (*Felis catus*). *Wildlife Research*, 47(8): 686–697
- Kelty CM. 2023. The ecological origins and consequences of the rodent bait station: from WWII Britain to contemporary California. *Medical Anthropology*, 42(4): 397–414
- Kok AD, Parker DM, Barker NP. 2013. Rules of attraction: the role of bait in small mammal sampling at high altitude in South Africa. *African Zoology*, 48(1): 84–95
- Li JH, Liu DN, Tian YL, Wang CX. 1989. An observation of non-choice feeding tests with *Rattus norvegicus* on three grains. *Chinese Journal of Vector Biology and Control*, 5(2): 65–70 (in Chinese) [李镜辉, 刘党女, 田彦林, 汪诚信. 1989. 褐家鼠对三种谷物的无选择摄食试验观察. *中国鼠类防制杂志*, 5(2): 65–70]
- Li R, Yin JX. 2020. Relationship between the soil element in eco-geographical landscape and the occurrence of plague. *Chinese Journal of Zoonoses*, 36(10): 876–880 (in Chinese) [李瑞, 尹家祥. 2020. 生态地理景观要素土壤与鼠疫的关系. *中国人兽共患病学报*, 36(10): 876–880]
- Liu BL. 2010. Screening test of rodenticide in farmland in southern Shandong Province. *Shandong Agricultural Sciences*, 42(8): 71–72 (in Chinese) [刘兵林. 2010. 鲁南地区农田灭鼠剂筛选试验. *山东农业科学*, 42(8): 71–72]
- Liu XH. 2018. Status and recent progress in rodenticide applications in China. *Plant Protection*, 44(5): 85–90 (in Chinese) [刘晓辉. 2018. 我国杀鼠剂应用现状及发展趋势. *植物保护*, 44(5): 85–90]
- Liu XH. 2022. Discrepancy, paradox, challenges, and strategies in face of national needs for rodent management in China. *Journal of Plant Protection*, 49(1): 407–414 (in Chinese) [刘晓辉. 2022. 中国鼠害防控需求的差异、矛盾、挑战与对策. *植物保护学报*, 49(1): 407–414]
- Liu XH. 2023. Technological bottlenecks, limitations and opportunities for rodent pest management in China. *Plant Protection*, 49(5): 335–339 (in Chinese) [刘晓辉. 2023. 中国鼠害治理的瓶颈、短板与机遇. *植物保护*, 49(5): 335–339]
- Lohr MT, Davis RA. 2018. Anticoagulant rodenticide use, non-target impacts and regulation: a case study from Australia. *The Science of the Total Environment*, 634(1): 1372–1384
- Lu FL, An WQ. 2001. Control effect of different baits on agrarian *Apodemus agrarius*. *Farming and Cultivation*, 21(5): 63–64 (in Chinese) [卢方林, 安万琴. 2001. 不同饵料毒饵防治农田黑线姬鼠效果试验研究. *耕作与栽培*, 21(5): 63–64]
- MacLeod AM, Travis DC, Wreay DG. 1953. Studies on the free sugars of the barley grain. *Journal of the Institute of Brewing*, 59(2): 154–165
- Massei G. 2023. Fertility control for wildlife: a European perspective. *Animals*, 13(3): 428
- McPherson JM. 1988. Preferences of cedar waxwings in the laboratory for fruit species, colour and size: a comparison with field observations. *Animal Behaviour*, 36(4): 961–969
- Mohd-Taib FS, Ishak SN. 2021. Bait preferences by different small mammal assemblages for effective cage-trapping. *Malaysian Journal of Science*, 40(2): 1–15
- Nakayama SMM, Morita A, Ikenaka Y, Mizukawa H, Ishizuka M. 2019. A review: poisoning by anticoagulant rodenticides in non-target animals globally. *The Journal of Veterinary Medical Science*, 81(2): 298–313
- Negus TF, Ross MH. 1997. The response of German cockroaches to toxic baits: strain differences and the effects of selection pressure. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 82(3): 247–253
- Pan FG, Deng Z, He GH, Wang HW. 1985. Development of warfarin poison bait. *Chinese Journal of Vector Biology and Control*, 1(2): 69–72 (in Chinese) [潘凤庚, 邓址, 何国华, 王宏伟. 1985. 杀鼠灵颗粒毒饵的研制. *中国鼠类防制杂志*, 1(2): 69–72]
- Parsons L, Ross R. 2020. A computer-vision approach to bait level estimation in rodent bait stations. *Computers and Electronics in Agriculture*, 172: 105340
- Samaniego-Herrera A, Jolley W, McClelland P. 2022. A lesson for planning rodent eradications: interference of invasive slugs during the Gough Island mouse eradication attempt in 2021. *Wildlife Research*, 50(5): 344–355
- Shi DZ, Guo YW, Su HT. 2009. A progress of rodent and its control in the agriculture and animal husbandry. *Chinese Journal of Vector Biology and Control*, 20(6): 499–501 (in Chinese) [施大钊, 郭永旺, 苏红田. 2009. 农牧业鼠害及控制进展. *中国媒介生物学及控制杂志*, 20(6): 499–501]
- Slaby M, Slaby F. 1977. Color preference and short-term learning by Steller's jays. *Condor*, 79(3): 384
- Smith JC, Wilson LS. 1989. Study of a lifetime of sucrose intake by the fischer-344 rat^a. *Annals of the New York Academy of Sciences*,

- 561(1): 291–306
- Struebig MJ, Wilting A, Gaveau DLA, Meijaard E, Smith RJ, Fischer M, Metcalfe K, Kramer-Schadt S, Abdullah T, Abram N, et al. 2015. Targeted conservation to safeguard a biodiversity hotspot from climate and land-cover change. *Current Biology*, 25(3): 372–378
- Stuart AM, Herawati NA, Risnelli R, Sudarmaji S, Liu M, Zhang ZB, Li HJ, Singleton GR, Hinds LA. 2022. Reproductive responses of rice field rats (*Rattus argentiventer*) following treatment with the contraceptive hormones, quinestrol and levonorgestrol. *Integrative Zoology*, 17(6): 1017–1027
- Sun JZ, Wang CY, Zhang FS, Zhang JB. 2018. Efficacy of 0.005% bromadiolone baits on rats. *Chinese Journal of Hygienic Insecticides and Equipments*, 24(3): 238–240 (in Chinese) [孙进忠, 王纯玉, 张凤顺, 张稷博. 2018. 0.005% 溴敌隆毒饵药效试验研究. *中华卫生杀虫药械*, 24(3): 238–240]
- Taggart PL, Taylor P, Patel KK, Noble DWA. 2023. Baiting in conservation and pest management: a systematic review of its global applications in a changing world. *Biological Conservation*, 284: 110214
- Towns DR, Broome KG. 2003. From small maria to massive campbell: forty years of rat eradications from New Zealand islands. *New Zealand Journal of Zoology*, 30(4): 377–398
- Wang CX. 2019. Review of rats chemical management of the past 70 years in China. *Chinese Journal of Hygienic Insecticides & Equipments*, 25(5): 393–396 (in Chinese) [汪诚信. 2019. 我国害鼠化学治理70年回顾: 纪念中华人民共和国建国70周年. *中华卫生杀虫药械*, 25(5): 393–396]
- Wang DH. 2020. Rodents and their adaptation. *Bulletin of Biology*, 55(1): 1–2 (in Chinese) [王德华. 2020. 啮齿动物的适应性. *生物学通报*, 55(1): 1–2]
- Wang GL. 2003. Research progress of rodent control experiment with drugs in Yunnan. *Chinese Journal of Pest Control*, 19(7): 401–406 (in Chinese) [王国良. 2003. 云南药物灭鼠试验研究进展. *医学动物防制*, 19(7): 401–406]
- Wang GS, Yue MS, Zhang TB, Chen MJ, Li J. 1992. Observation on the acceptability of rodents to the old and new baits in the rodent control areas with single baits. *Chinese Journal of Vector Biology and Control*, 3(3): 181 (in Chinese) [王谷生, 岳木生, 张天宝, 陈茂江, 李进. 1992. 常用单一毒饵灭鼠地区家鼠对原毒饵与新毒饵的接受性观察. *中国媒介生物学及控制杂志*, 3(3): 181]
- Warwick ZS, Schiffman SS. 1992. Role of dietary fat in calorie intake and weight gain. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 16(4): 585–596
- Weser C, Ross JG. 2013. The effect of colour on bait consumption of kea (*Nestor notabilis*): implications for deterring birds from toxic baits. *New Zealand Journal of Zoology*, 40(2): 137–144
- Williams GA, Koenen ME, Havenaar R, Wheeler P, Gowtage S, Lesellier S, Chambers MA. 2019. Survival of *Mycobacterium bovis* BCG oral vaccine during transit through a dynamic *in vitro* model simulating the upper gastrointestinal tract of badgers. *PLoS ONE*, 14(4): e0214859
- Witmer GW, Campbell EW, Boyd F. 1998. Rat management for endangered species protection in the U.S. Virgin Islands. *Proceedings of the Vertebrate Pest Conference*, 18(18): 281–286
- Witmer GW, Raymond-Whish S. 2021. Reduced fecundity in free-ranging Norway rats after baiting with a liquid fertility control bait. *Human-Wildlife Interactions*, 15(1): 111–123
- Woodman N, Timm RM, Slade NA, Doonan TJ. 1996. Comparison of traps and baits for censusing small mammals in Neotropical Lowlands. *Journal of Mammalogy*, 77(1): 274–281
- Wu XD, Fu HP. 2005. Rodent communities in desert and semi-desert regions in Inner Mongolia. *Acta Zoologica Sinica*, 51(6): 961–972 (in Chinese) [武晓东, 付和平. 2005. 内蒙古半荒漠与荒漠区的啮齿动物群落. *动物学报*, 51(6): 961–972]
- Xia WP. 1996. Rodent and ecological balance: theory and practice of rodent pest control. Beijing: Science Press, pp. 2–18 (in Chinese) [夏武平. 1996. 害鼠与生态平衡: 鼠害治理的理论与实践. 北京: 科学出版社, pp. 2–18]
- Yan C, Li CJ, Lin KJ, Fu HP, Zhang ZB. 2023. Current situation, research progress and management strategies of plant diseases, insect pests, and rodent pests in grasslands of China. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 37(4): 580–586 (in Chinese) [严川, 李春杰, 林克剑, 付和平, 张知彬. 2023. 我国草原病虫害现状、研究进展与治理对策. *中国科学基金*, 37(4): 580–586]
- Yang XJ, Han CX, Wang MC, Yang QE, Li F. 2002. Study on the security and effect of Krs1[#] in controlling rat. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 30(6): 167–170 (in Chinese) [杨学军, 韩崇选, 王明春, 杨清娥, 李锋. 2002. 克鼠星1号的防鼠效果及安全性研究. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 30(6): 167–170]
- Yue C, Guo QW, Zhang ZR, Li X, Man DH, Yuan S, Fu HP, Wu XD, Jin G, Liu JW, et al. 2020. Trophic niche of Brandt's voles (*Lasiopodomys brandtii*) and their interspecific relationships with other common rodents in a typical steppe, Inner Mongolia. *Acta Theriologica Sinica*, 40(5): 424–434 (in Chinese) [岳闯, 郭乾伟, 张卓然, 李鑫, 满都呼, 袁帅, 付和平, 武晓东, 金国, 刘建文, 等. 2020. 内蒙古典型草原布氏田鼠营养生态位及其种间关系. *兽类学报*, 40(5): 424–434]
- Zhang PS, Xie HQ, Ma JS, Yang TY, Li TQ, Cai AQ. 2004. Trial production and control of grass powder pellet poison bait. //Zhang XY, Li YH. *Progress of Science and Technology of Prataculture in Sichuan*. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, pp. 191–192 (in Chinese) [张平森, 谢红旗, 马建生, 杨庭勇, 李太强, 蔡安全. 2004. 草粉颗粒毒饵试制及灭治试验. //张新跃, 李元华. *四川草业科技十年进展*. 成都: 四川科学技术出版社, pp. 191–192]
- Zhang X, Wang D, Wang YM, Xin Z. 2016. The chemical control measures in rat control. *Chinese Journal of Hygienic Insecticides & Equipments*, 22(4): 317–321 (in Chinese) [张晓, 王东, 王永明, 辛正. 2016. 鼠类的化学防治. *中华卫生杀虫药械*, 22(4): 317–321]
- Zhou CY. 2023. Research on targeted control base baits for *Lasiopodomys brandtii*. Master thesis. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University (in Chinese) [周成毅. 2023. 布氏田鼠靶向防治基饵研究. 硕士学位论文. 呼和浩特: 内蒙古农业大学]

(责任编辑:王璇)