

DOI:10.11686/cyxb2021429

http://cyxb.magtech.com.cn

杨可, 袁帅, 武晓东, 等. 不同利用方式荒漠区草地鼠害防治的危害阈值和经济阈值. 草业学报, 2022, 31(11): 36—47.

YANG Ke, YUAN Shuai, WU Xiao-dong, *et al.* Harmful and economic thresholds for rodent pests in the Alxa desert area under different grassland utilization patterns. *Acta Prataculturae Sinica*, 2022, 31(11): 36—47.

不同利用方式荒漠区草地鼠害防治的危害阈值和经济阈值

杨可¹, 袁帅¹, 武晓东¹, 张昊婷¹, 孙珊珊¹, 付和平^{1*}, 赵永泉², 王淑艳³, 刘启富⁴

(1. 内蒙古农业大学草原与资源环境学院, 内蒙古 呼和浩特 010011; 2. 呼伦贝尔市林业和草原事业发展中心, 内蒙古 海拉尔 021008; 3. 呼伦贝尔市林业和草原科学研究所, 内蒙古 海拉尔 021006; 4. 兴安盟林业和草原工作站, 内蒙古 乌兰浩特 137400)

摘要:鼠害危害阈值和经济阈值是草地鼠害防控实践中必须明确的指标,不同草地类型或同一草地类型不同利用方式,这2个指标值均截然不同。危害阈值是引起草地明显损失时的害鼠种群密度,经济阈值是害鼠种群数量增长造成明显经济损失时必须采取防治措施的种群密度。阿拉善荒漠区生态脆弱,鼠害连年发生,研究荒漠区草地鼠害防控危害阈值和经济阈值对鼠害防治具有重要指导意义。于2015—2019年在阿拉善左旗荒漠区选择连续放牧区与禁牧区应用标志重捕法调查害鼠种类和密度,应用样方法调查样区内8月植物地上生物量。使用标准鼠单位与啮齿动物日食量来估算牧草损失产量,利用回归方程得出害鼠密度与牧草产量损失比的拟合关系。结果表明:1)连续放牧区与禁牧区害鼠密度与牧草产量损失比的拟合曲线均符合逻辑斯蒂S型曲线。2)根据回归方程计算得出连续放牧区害鼠防控危害阈值为26个标准鼠单位·hm⁻²,经济阈值为39.3个标准鼠单位·hm⁻²,禁牧区害鼠防控危害阈值为33.2个标准鼠单位·hm⁻²,经济阈值为30.2个标准鼠单位·hm⁻²,连续放牧区经济阈值略大于禁牧区。

关键词:阿拉善荒漠区;鼠害防治;危害阈值;经济阈值

Harmful and economic thresholds for rodent pests in the Alxa desert area under different grassland utilization patterns

YANG Ke¹, YUAN Shuai¹, WU Xiao-dong¹, ZHANG Hao-ting¹, SUN Shan-shan¹, FU He-ping^{1*}, ZHAO Yong-quan², WANG Shu-yan³, LIU Qi-fu⁴

1. College of Grassland, Resource and Environment, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010011, China; 2. Hulunbuir Forestry and Grassland Enterprise Development Center, Hailar 021008, China; 3. Hulunbuir Grassland Science Research Institute, Hailar 021006, China; 4. Xingan League Forestry and Grassland Workstation, Ulanhot 137400, China

Abstract: The rodent damage threshold and the rodent economic threshold are indicators that must be clearly defined in the practice of grassland rodent prevention and control. Different grassland types or different utilization methods of the same grassland type have completely different values for these two indicators. The damage threshold is the population density of pests at which the grassland is obviously compromised, and the economic threshold is the population density at which further pest population increases will cause economic losses. The Alxa desert region is ecologically fragile, and rodents are endemic. This study selected continuous grazing areas and prohibited grazing

收稿日期:2021-11-24;改回日期:2022-02-08

基金项目:国家自然科学基金项目(32060395,32060256,31772667),内蒙古自然科学基金(2019MS03012),内蒙古科技计划项目(2021GG0108),华北农牧交错带西段有害生物多样性调查(2019FY100304)和内蒙古农业大学科技成果转化项目(YZGC2017026)资助。

作者简介:杨可(1996-),女,内蒙古阿左旗人,在读硕士。E-mail: yangke19961006@163.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: fuheping@126.com

areas in the desert area of Alxa Left Banner and from 2015 to 2019 to investigate the species and density of pests using the ‘mark and recapture’ method, together with sampling to investigate the aboveground plant biomass in the sample area in August. The measured rodent unit densities and their daily food intakes were used to estimate the amount of forage loss, and a regression equation was used to obtain a fitted relationship between the rodent density and the ratio of forage loss. It was found that: 1) The fitted curves for the ratio of pest density and forage loss in the continuous and prohibited grazing areas took the form of logistic three-parameter, S-shaped curves. 2) According to the regression equation, the damage threshold in continuous grazing areas was 26 standard rodent units $\cdot\text{ha}^{-1}$ and the economic threshold was 39.3 standard rodent units $\cdot\text{ha}^{-1}$. In prohibited grazing areas, the damage threshold was 33.2 standard rodent units $\cdot\text{ha}^{-1}$ and the economic threshold was 30.2 standard rodent units $\cdot\text{ha}^{-1}$. Thus, the economic threshold pest density of continuous grazing areas was slightly higher than that of prohibiting grazing areas.

Key words: Alxa desert area; rodent control; damage threshold; economic threshold

阿拉善荒漠属于极干旱的温性荒漠草原和荒漠,因其特殊的地理位置,阿拉善荒漠植被成为宁夏平原、河套平原以及甘肃河西走廊的天然保护屏障^[1]。多年来,由于连续放牧、过度开发农业和气候变化以及其他不合理利用导致草地沙化严重,鼠害频繁发生^[2]。鼠害对草地造成的危害一般与其种群密度有直接关系^[3]。在草原鼠害防治中,往往因为缺乏对鼠类分布及其密度配置的大面积调查,在鼠密度较低时投入大量人力物力进行灭鼠,造成浪费;在鼠密度较高时进行防治又为时过晚,造成巨大经济损失^[4]。因此选择合适的密度阈值对于鼠害防治十分重要。

鼠害危害阈值是指引起草地明显损失时的害鼠种群密度。研究鼠害危害阈值一般都利用数学模型,如直线方程^[5]、指数函数^[6]和S型曲线方程^[7]对鼠类密度与产量损失进行拟合,确定它们之间的函数关系,随着鼠类密度增大植物产量损失迅速增长,达到某一个拐点时的鼠密度即为鼠害危害阈值。害虫经济阈值最早于1959年由Stern^[8]根据经典经济学原理提出,之后成为有害生物综合治理的主要依据^[9]。在鼠害治理方面,单位面积的防治费用与害鼠所造成牧草的损失价值相等时,害鼠的种群密度即为鼠害防治的经济阈值^[10]。我国鼠害经济阈值的研究最早见于20世纪80年代,孙崇潞等^[4]建立了黄兔尾鼠(*Lagurus luteus*)的危害产草量与洞口密度的回归曲线,并计算出黄兔尾鼠的经济阈值为260个有效洞口 $\cdot\text{hm}^{-2}$ 。随后,鼠害防治的经济阈值问题受到相关学者的重视,各地陆续展开鼠害经济阈值的研究工作。孙飞达等^[11]在青藏高原高寒草甸生态系统中利用聚类分析将高原鼠兔(*Ochotona curzoniae*)的危害等级分为四类,得出其经济阈值为200只 $\cdot\text{hm}^{-2}$ 高原鼠兔或1360个有效洞口 $\cdot\text{hm}^{-2}$ 。苏永志等^[12]在内蒙古锡林郭勒典型草原采用动态分析法得出内蒙古典型草原布氏田鼠(*Lasiopodomys brandtii*)早春防治经济阈值为40只 $\cdot\text{hm}^{-2}$ 。李燕妮^[13]、叶丽娜^[14]在典型草原设置标准鼠单位,建立鼠密度与牧草损失产量的关系,得出不同放牧方式下的经济阈值与危害阈值。目前关于荒漠区鼠害防控的危害阈值和经济阈值尚未见报道。阿拉善荒漠草地的主要利用方式为放牧^[15],且同时存在多种害鼠^[16],因此本研究通过对连续放牧和禁牧方式下的害鼠种群密度和牧草损失产量关系的研究,明确荒漠区草地不同利用方式鼠害防控的危害阈值和经济阈值,为荒漠生态系统鼠害防治提供可靠依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区(37°24′—38°25′ N, 104°10′—105°30′ E)位于内蒙古阿拉善盟阿拉善左旗南部,腾格里沙漠东缘。气候为典型高原大陆性气候。海拔平均为800~1600 m,该地区年降水量为45~215 mm,年蒸发量为3000~4000 mm,全年的70%降水集中在6—9月,无霜期约156 d。年平均气温约为8.13℃,年日照时数多达2600~3500 h,昼夜温差较大。植被为荒漠、半荒漠草原,植株多矮小、根系发达、耐旱耐盐。土壤为灰漠土和灰棕土。

植被覆盖度一般仅为1%~20%。本试验样区内植被以红砂(*Reaumuria soongarica*)建群,其次为短脚锦鸡儿(*Caragana brachypoda*)、白刺(*Nitraria sphaerocarpa*)和霸王(*Zygophyllum xanthoxylon*)等多年生小灌木,草本植物以糙隐子草(*Cleistogene squarrosa*)、雾冰藜(*Bassia dasyphylla*)、白草(*Pennisetum centasiaticum*)为主。依据对草地的利用方式不同,选择连续放牧区和禁牧区2种生境作为取样区,样区特征如下:

连续放牧区:面积为146.6 hm²,四季放牧,载畜量为550~620只羊。植物以红砂建群,伴生有霸王、白刺、短脚锦鸡儿和驼绒藜(*Ceratoides latens*)等多年生小灌木,草本以骆驼蓬(*Peganum harmala*)和牛心朴子(*Cynanchum komarovii*)等多年生植物为主,一年生植物主要为白草和蒙古虫实(*Corispermum mongolicum*)。

禁牧区:面积为206.6 hm²,从1997年开始围栏封禁,禁止放牧家畜进入。植物以刺叶柄棘豆(*Oxytropis aciphylla*)和白沙蒿(*Artemisia sphaerocephala*)建群,其次为短脚锦鸡儿、红砂等小灌木,草本以蒙古虫实、雾冰藜和糙隐子草为主^[17]。

1.2 测定指标及方法

1.2.1 样地设置与啮齿动物调查 2015—2019年,在研究区设置连续放牧与禁牧,在各样区中心建立1个1 hm²的固定标志重捕样地。在每个样地中按7个×8个的方格布笼,每个网格点上放置1个活捕笼,行距及笼距均为15 m。使用新鲜花生米作诱饵。每年的4—10月每月使用标志重捕法对啮齿动物调查1次,每次连捕4 d。记录捕获个体的种名、性别、繁殖状况和捕获位置,称量捕获个体体重,并对每个捕获个体进行标记,啮齿动物均使用PIT(passive integrated transponder)芯片标记,跳鼠科动物同时使用脚环标记。

1.2.2 植被调查 2015—2019年每年8月在连续放牧和禁牧两种放牧方式的每个重复小区内随机选取3个1 m×1 m样方,记录样方内草本植物的种名、高度、密度,并对生物量(干重)进行测量。随机选取3个10 m×10 m样方记录样方内灌木种名、高度、冠幅,并对生物量(干重)进行测量。

1.2.3 最小存活数 2015—2019年每年4—10月连续放牧区和禁牧区中的啮齿动物捕获量均采用最小存活数法(minimum number known live, MNA)^[18]统计。采用以下公式计算最小存活数:

$$MNA = a + b \quad (1)$$

式中: a 为在某次布笼时刻所捕获的啮齿动物数量; b 为在该次布笼时刻之前标记,在该次布笼之后出现,但没有出现在该次布笼时的啮齿动物数量。该方法不仅考虑到某时刻布笼所捕获的啮齿动物,还考虑到了当时存在于该样区但未被捕获到的啮齿动物,能较为准确地统计当时样区的啮齿动物密度。

1.2.4 啮齿动物日食量测定 三趾跳鼠(*Dipus sagitta*)、五趾跳鼠(*Allactaga sibirica*)、子午沙鼠(*Meriones meridianus*)采用饲养笼饲养。喂养食物为阿拉善荒漠区分布植物,每日定时投放4种植物,并设有一份相同对照,每个鼠种设3个重复。24 h后称量食物残渣重量,并称量对照组重量,计算失水量。日食量计算采用以下公式:

$$Y = A - \frac{B}{1 - E} \quad (2)$$

式中: Y 为啮齿动物日食量(g); A 为当日投食量(g); B 为残渣量(g); E 为失水率。

计算得出三趾跳鼠、五趾跳鼠、子午沙鼠的日食量,羽尾跳鼠(*Stylodipus telum*)的日食量参考三趾跳鼠,小毛足鼠(*Phodopus roborovskii*)与阿拉善黄鼠(*Spermophilus alaschanicus*)的日食量与越冬储草量参考文献[19]。

1.2.5 牧草产量损失的计算 本研究利用啮齿动物日食量、天数以及啮齿动物密度来计算啮齿动物对牧草产量造成的损失。不冬眠啮齿动物计算牧草损失产量时需考虑越冬储草量,计算公式如下:

$$Ly = (P \times D \times N) + S \quad (3)$$

冬眠啮齿动物不考虑越冬储草量,计算公式如下:

$$Ly = P \times D \times N \quad (4)$$

式中: Ly (loss of forage yield)为啮齿动物损失产草量(kg·hm⁻²); P 为啮齿动物密度(只·hm⁻²); D 为啮齿动物日食量(kg); N 为天数; S 为啮齿动物越冬储草量。

本试验中捕获到的啮齿动物种类、体型大小、日食量等都不同,为方便计算,在计算啮齿动物对牧草产量造成

的损失时将子午沙鼠确定为标准鼠(standard rodent, SR),将子午沙鼠的日食量确定为 1 个标准鼠单位,根据表 1 中的日食量(daily food intake, D)对其他种类啮齿动物进行标准鼠折算,得出 3 种啮齿动物折算值:

$$SR(Ds) = \frac{D(Ds)}{D(Mm)} = 1.8 \quad (5)$$

$$SR(As) = \frac{D(As)}{D(Mm)} = 1.7 \quad (6)$$

$$SR(Pr) = \frac{D(Pr)}{D(Mm)} = 0.4 \quad (7)$$

$$SR(Sa) = \frac{D(Sa)}{D(Mm)} = 7.4 \quad (8)$$

$$SR(St) = \frac{D(St)}{D(Mm)} = 1.8 \quad (9)$$

式中:SR(Ds)为三趾跳鼠的折算值;SR(As)为五趾跳鼠的折算值;SR(Pr)为小毛足鼠的折算值;D(Mm)为子午沙鼠的日食量;D(Ds)为三趾跳鼠的日食量;D(As)为五趾跳鼠的日食量;D(Pr)为小毛足鼠的日食量;SR(Sa)为阿拉善黄鼠的折算值;SR(St)为羽尾跳鼠的折算值;D(Sa)为阿拉善黄鼠的日食量;D(St)为羽尾跳鼠的日食量。

牧草产量损失比(forage loss ratio, Lt, %)计算公式如下:

$$Lt = Ly/Y \quad (10)$$

式中:Ly为啮齿动物损失产草量(kg·hm⁻²);Y为牧草总产量(kg·hm⁻²)。

表 1 啮齿动物日食量折算值以及储草量

Table 1 Rodent conversion standards and storage of forage

鼠种 The rodent species	日食量 The daily intake per rodent (g)	折算值 The reduced value	冬眠 Hibernation	储草量 The storage of forage (kg)
三趾跳鼠 <i>D. sagitta</i>	10.1	1.8	1	0
五趾跳鼠 <i>A. sibirica</i>	9.5	1.7	1	0
子午沙鼠 <i>M. meridianus</i>	5.6	1.0	0	0.8952
小毛足鼠 <i>P. roborovskii</i>	2.3	0.4	0	0.2475
阿拉善黄鼠 <i>S. alaschanicus</i>	41.4	7.4	1	0
羽尾跳鼠 <i>S. telum</i>	10.1	1.8	1	0

注:“1”代表冬眠;“0”代表不冬眠。

Note:“1” means hibernation; “0” means no hibernation.

1.2.6 鼠害防控危害阈值的计算 本研究通过使用 Logistic growth 数学模型对啮齿动物密度与牧草产量损失比的关系进行拟合,确定 1/K 点(此点为 S 型曲线的第一个拐点,即为危害阈值)。

1.2.7 鼠害防控经济阈值的计算 经济阈值是种群增长可能达到经济损害水平时的鼠密度,经济损害水平是通过防治,在经济上得与失相等时的鼠密度。经济允许损失率(economic injury level, EIL, %)计算公式如下^[20]:

$$EIL = \frac{CC}{EC \times AY \times P} \times 100\% \quad (11)$$

式中:AY(around yield)为植物平均地上生物量(kg·hm⁻²);CC(cost of control)为防治费用(元·hm⁻²);EC(efficiency of control)为防治效果(%);P为牧草价格(元·kg⁻¹)。

1.3 数据分析

利用 Excel 2016 进行啮齿动物密度、草产量以及牧草损失产量统计与计算。将 5 年中禁牧和放牧方式下的牧草损失产量利用 SPSS 22.0 进行单因素方差分析(One Way ANOVA),显著水平为 $P=0.05$ 。使用 GraphPad Prism 8 对连续放牧和禁牧方式下啮齿动物密度与牧草产量损失比的关系进行回归分析,构建拟合模型,使用

Sigmaplot 12.5 作图。

2 结果与分析

2.1 啮齿动物种类组成

2015—2019年在连续放牧区共捕获了667只啮齿动物,分别为:子午沙鼠、三趾跳鼠、五趾跳鼠、小毛足鼠、阿拉善黄鼠、羽尾跳鼠,共6种。2015—2019年的优势鼠种均为五趾跳鼠(图1A),共捕获306只,占总捕获量的46%。

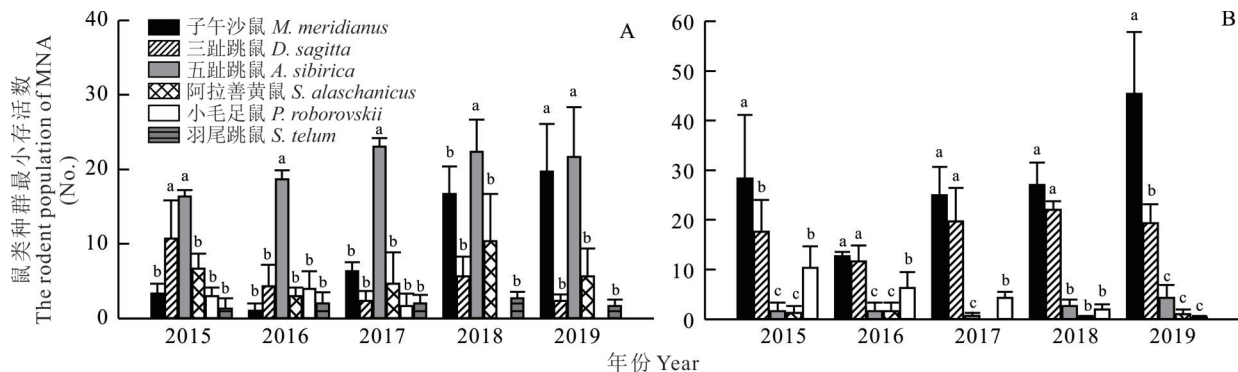


图1 不同放牧区啮齿动物捕获数量

Fig. 1 The population density of rodents captured in different grazing area

A为连续放牧区不同鼠种平均捕获量,B为禁牧区不同鼠种平均捕获量。不同小写字母表示不同鼠种间差异显著($P < 0.05$),下同。A is the average amount of captured of each rodent species in continuous grazing area, B is the average amount of captured of each rodent species in prohibiting grazing area. Different lowercase letters indicate significant differences among different rodent species ($P < 0.05$), the same below.

2015—2019年在禁牧区共捕获了802只啮齿动物,分别为:子午沙鼠、三趾跳鼠、五趾跳鼠、小毛足鼠、阿拉善黄鼠,共5种。2015—2019年的优势鼠种均为子午沙鼠(图1B),共捕获415只,占总捕获量的52%。三趾跳鼠为次优势种,共捕获271只,占总捕获量的34%。

2015—2019年不同鼠种平均捕获量显示,连续放牧区鼠类种群数量为五趾跳鼠>子午沙鼠>阿拉善黄鼠>三趾跳鼠>羽尾跳鼠>小毛足鼠。五趾跳鼠的种群数量显著高于其他5种,而三趾跳鼠、子午沙鼠与阿拉善黄鼠的种群数量之间没有显著差异,又显著高于小毛足鼠与羽尾跳鼠(图2A)。

2015—2019年不同鼠种平均捕获量显示,禁牧区子午沙鼠种群数量显著高于三趾跳鼠、五趾跳鼠、阿拉善黄鼠和小毛足鼠,三趾跳鼠的种群数量又显著高于五趾跳鼠、小毛足鼠和阿拉善黄鼠(图2B)。

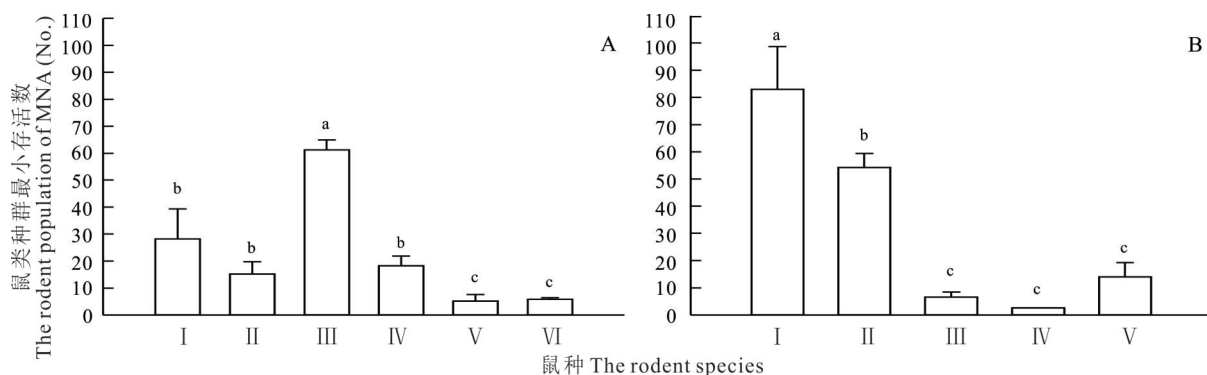


图2 不同鼠种平均捕获量

Fig. 2 The average amount of captured of each rodent species

I: 子午沙鼠 *M. meridianus*; II: 三趾跳鼠 *D. sagitta*; III: 五趾跳鼠 *A. sibirica*; IV: 阿拉善黄鼠 *S. alaschanicus*; V: 小毛足鼠 *P. roborovskii*; VI: 羽尾跳鼠 *S. telum*.

2.2 植物生物量损失分析

标准鼠单位是一个鼠密度计量单位,在一个有多个为害鼠种的地区以优势鼠种为标准,根据害鼠的日食量(即每只鼠每天造成的牧草损失产量)进行折算,将不同的鼠种转化为同一计量标准。在阿拉善荒漠区,有多种为害鼠种存在,不同鼠种的个体大小、食量、食性与危害程度都不同,所以有必要将不同鼠类造成的牧草损失产量标准化。本研究以子午沙鼠为标准鼠单位,一只子午沙鼠为一个标准鼠单位,一只三趾跳鼠为 1.8 个标准鼠单位,一只五趾跳鼠为 1.7 个标准鼠单位,一只小毛足鼠为 0.4 个标准鼠单位(表 1)。

表 2 所示为 2015—2019 年连续放牧区与禁牧区啮齿动物密度与各牧草指标的平均值。5 年间连续放牧区啮齿动物密度显著高于禁牧区 41%($P<0.05$)。牧草产量、牧草损失产量与牧草产量损失比两种放牧方式间差异不显著,禁牧区牧草产量略高于连续放牧区 2%,连续放牧区牧草损失产量与牧草产量损失比均略高于禁牧区,分别高 16% 与 21%。

表 2 不同放牧方式啮齿动物密度与牧草指标

Table 2 The rodent densities and forage indexes in different grazing methods

放牧方式 Grazing methods	啮齿动物密度 Rodents density (standard rodent units per hectare)	牧草产量 Forage yield ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	牧草损失产量 Loss of forage yield ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	牧草产量损失比 The loss ratio of forage yield (%)
连续放牧区 Continuous grazing	102.11±11.80a	639.24±46.69a	131.22±14.88a	21.84±2.48a
禁牧区 Prohibiting grazing	72.21±5.18b	652.05±35.08a	112.71±8.41a	17.94±1.59a
<i>F</i>	5.386	0.048	1.172	1.746
<i>P</i>	0.028	0.828	0.288	0.197

注:表中数据为平均值±标准误,不同小写字母表示两种放牧方式间有显著差异($P<0.05$)。
Note: The values of data in the table are mean value±standard errors, different lowercase letters indicate significant differences between the two grazing methods ($P<0.05$).

2015—2019 年连续放牧区牧草产量差异不显著($P>0.05$),5 年间的啮齿动物密度没有显著差异($P>0.05$),牧草损失产量 5 年间差异不显著($P>0.05$),2015—2019 年间牧草产量损失比没有显著差异($P>0.05$)。2018 年是啮齿动物密度最高的一年,为 146.1 个标准鼠单位· hm^{-2} ,牧草损失产量也最高,为 190.00 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,牧草产量为 760.49 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,牧草产量损失比为 25.63%。2016 年是啮齿动物密度最低的时候,为 68.2 个标准鼠单位· hm^{-2} ,牧草损失产量也最低,为 83.62 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,牧草产量为 636.75 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,牧草产量损失比仅为 13.87%(图 3)。

2015—2019 年禁牧区牧草产量差异不显著($P>0.05$),5 年间啮齿动物密度也没有显著差异($P>0.05$);2019 年牧草损失产量显著高于 2016、2017、2018 年,2015 与 2019 年的牧草产量损失比显著高于 2016、2017、2018 年。2016 年啮齿动物密度为 51.4 个标准鼠单位· hm^{-2} ,此时啮齿动物密度最低,牧草损失产量也最低,为 74.46 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,牧草产量为 667.22 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,牧草产量损失比为 11.02%。2019 年啮齿动物密度为 95 个标准鼠单位· hm^{-2} ,是啮齿动物密度最高的一年,此时牧草损失产量为 155.82 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,牧草产量为 613.34 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,牧草产量损失比为 25.74%。

对比连续放牧区与禁牧区的牧草产量,2015—2019 年两者之间差异不显著($P>0.05$),且增长趋势相同,除 2019 年外,2015—2018 年禁牧区牧草产量均高于连续放牧区;2015—2019 年连续放牧区啮齿动物密度与禁牧区间没有显著差异($P>0.05$),但连续放牧区啮齿动物密度均高于禁牧区;五年间两种放牧方式间牧草损失产量差异不显著($P>0.05$),除 2019 年外,连续放牧区牧草损失产量均高于禁牧区;2015—2019 年连续放牧区牧草产量损失比与禁牧区间差异不显著($P>0.05$),除 2019 年外,其他 4 个年份连续放牧区牧草产量损失比均高于禁牧区。

2.3 啮齿动物密度与牧草产量损失的拟合曲线

自然界中的可利用资源有限,动物的种群密度受资源与种群间相互竞争的影响与限制,不可能无限地增长下

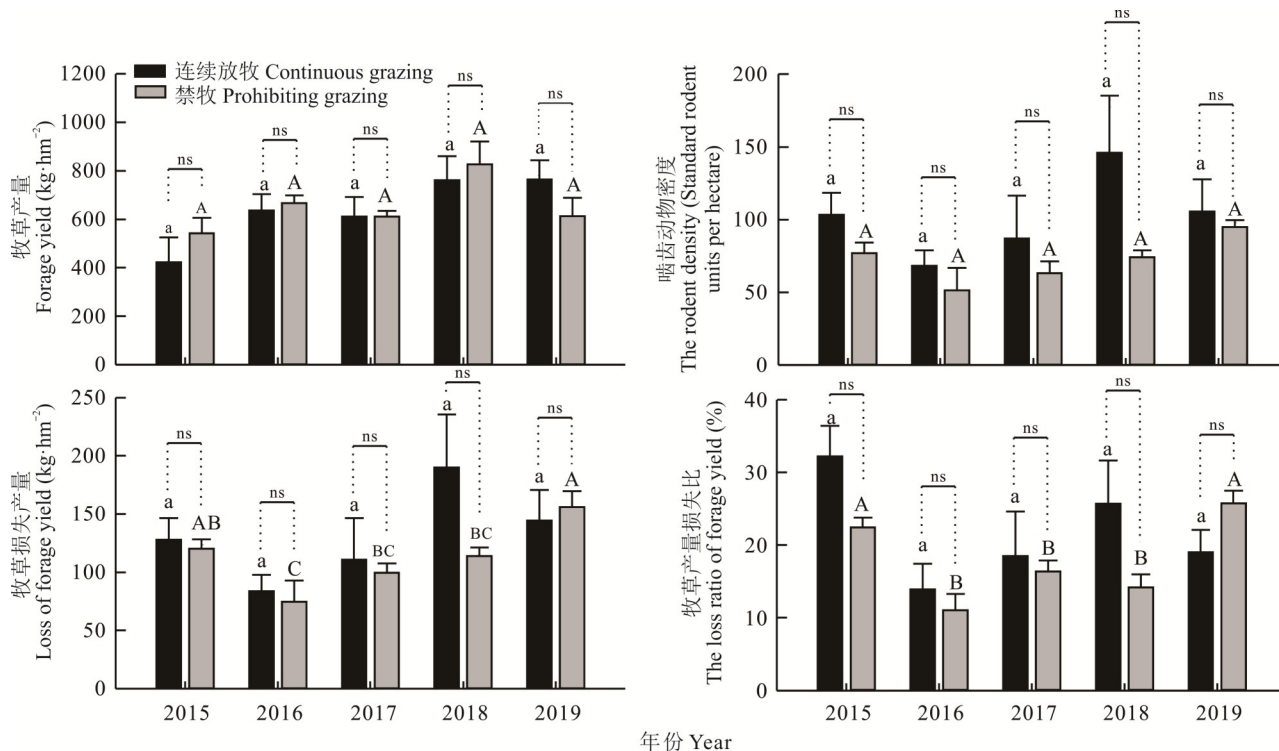


图3 牧草损失产量与啮齿动物密度

Fig. 3 Loss of forage yield and rodent densities

不同小写字母表示连续放牧方式下年度间差异显著,不同大写字母表示禁牧方式下年度间差异显著,*表示两种放牧方式间差异显著,ns表示两种放牧方式间差异不显著,显著水平为 $P=0.05$ 。Different lowercase letters indicate significant differences among years under continuous grazing methods, different capital letters indicate significant differences among years under grazing prohibition methods, * indicates significant differences between the two grazing methods, ns indicates no significant differences between the two grazing methods, significance level $P=0.05$.

去,因此复杂环境中的动物种群增长模型往往符合S型曲线。将连续放牧区与禁牧区啮齿动物密度与牧草产量损失比数据进行拟合,得出拟合曲线(图4)。连续放牧区与禁牧区啮齿动物密度与牧草产量损失比关系符合逻辑斯蒂S型曲线。

连续放牧样地逻辑斯蒂曲线方程:

$$y = \frac{77.72}{35.628e^{-0.0384x} + 2.062} \quad (R^2=0.7305) \quad (12)$$

禁牧样地逻辑斯蒂曲线方程:

$$y = \frac{132.89}{34.175e^{-0.03006x} + 3.525} \quad (R^2=0.7419) \quad (13)$$

对连续放牧方式以及禁牧方式下的拟合曲线进一步分析,通过使曲线方程二阶导函数为零,可以得出S型曲线的两个拐点,也是曲线模型的两个重要值,分别为A、B(图5),并对应三个增长时期:初始期、快速期、缓速期。连续放牧方式下A(26.0, 5.12)、B(104.1, 28.62)。对应S型曲线增长趋势过程为:1)初始期:啮齿动物密度 $\in (0, 26.0)$;2)快速期:啮齿动物密度 $\in (26.0, 104.1)$;3)缓速期:啮齿动物密度 $\in (104.1, \infty)$ 。禁牧方式下A(33.2, 8.25)、B(133.0, 32.01)。对应S型曲线增长趋势过程为:1)初始期:啮齿动物密度 $\in (0, 33.2)$;2)快速期:啮齿动物密度 $\in (33.2, 133.0)$;3)缓速期:啮齿动物密度 $\in (133.0, \infty)$ 。

2.4 鼠害防治的危害阈值

由上述研究结果可得牧草产量损失比的增长要经过3个阶段,分别为初始期、快速期和缓速期。初始期随着鼠密度增大,牧草产量损失比增长缓慢。当鼠密度大于S型曲线的第一个拐点,牧草产量损失比的增长速度就进入快速期,此时随着鼠密度的增长,牧草产量损失比快速增加。随着鼠密度的继续增长,牧草产量损失比的增长

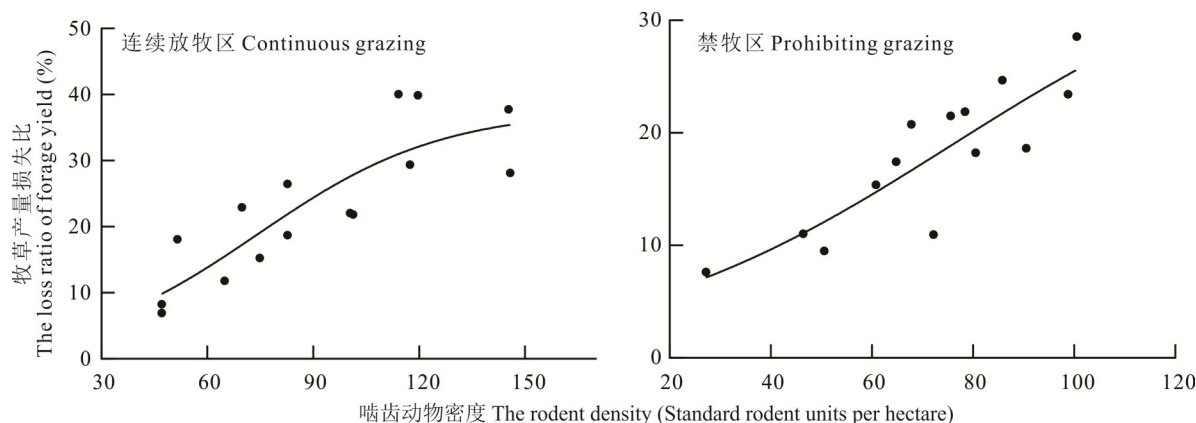


图4 啮齿动物密度与牧草产量损失比的拟合关系

Fig. 4 Relationship of rodent densities with the loss ratio of forage yield

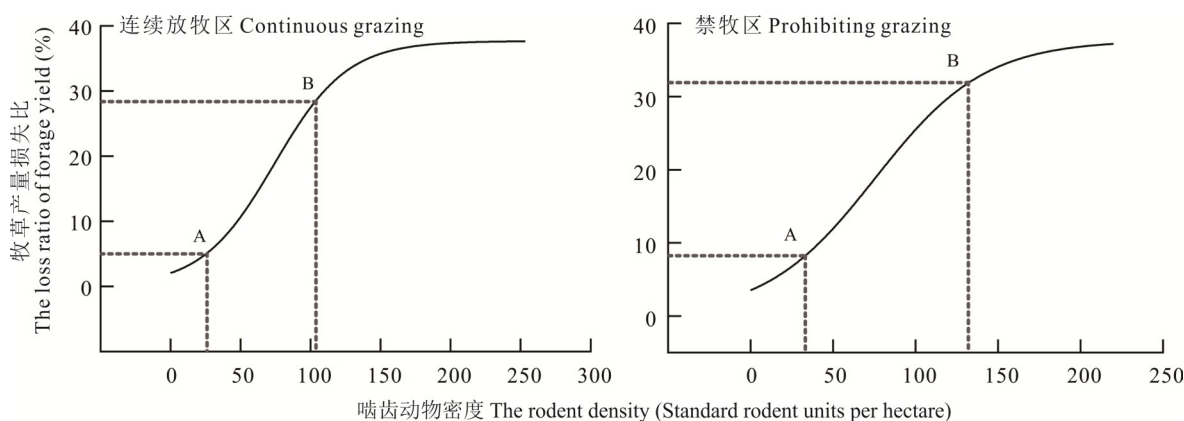


图5 啮齿动物密度与牧草产量损失比的建模关系

Fig. 5 Modeling relation of rodent densities with the loss ratio of forage yield

速度进入缓速期。由此可得鼠害防治的危害阈值为A点时的啮齿动物密度。连续放牧的危害阈值为26个标准鼠单位· hm^{-2} ,禁牧的危害阈值为33.2个标准鼠单位· hm^{-2} ,应在此阈值前进行防治,超过此阈值鼠类对牧草的危害就会大幅度增长。

2.5 鼠害防治的经济阈值

鼠害防治经济阈值的定义为单位面积的防治费用与鼠害所造成的损失价值相当时害鼠的种群密度。经济阈值受牧草价格、防治成本的影响,而牧草价格和防治成本会随着经济的发展而改变,因此经济阈值是一个动态指标。从阿拉善盟草原站获得2015—2019年防治成本、牧草价格与防治效率的平均值,分别为45元· hm^{-2} 、1元· kg^{-1} 、90%。计算得出连续放牧区啮齿动物经济阈值为39.3个标准鼠单位· hm^{-2} 。禁牧区啮齿动物经济阈值为30.2个标准鼠单位· hm^{-2} 。结果表明连续放牧区经济阈值略高于禁牧区。

3 讨论

有鼠存在并不意味着有鼠害存在,到底什么程度的鼠密度可以算作鼠害暴发仍有争议^[21],需要有一个阈值作为鼠害防治的标准。而研究害鼠密度和植物损失产量的关系是确定危害阈值的基础^[22]。许多学者探究过鼠密度与植物损失量之间的关系。徐满厚等^[6]在古尔班通古特沙漠发现,单株梭梭(*Haloxyylon ammodendrom*)整体的受害程度与其冠幅下鼠洞密度呈指数函数关系,当单株梭梭冠幅下鼠洞密度大于5个·株⁻¹时,梭梭受害程度将会呈指数式增长。李燕妮等^[23]在锡林郭勒盟典型草原的研究表明,害鼠密度与牧草产量损失比的关系更加符合逻辑斯蒂增长模型,当鼠密度大于174个标准鼠单位· hm^{-2} 时,对牧草的损失程度会大大增加。Brown等^[24]发现

小鼠密度与其对小麦造成的产量损失之间的关系符合逻辑斯蒂S型曲线,当鼠密度大于 $42\text{只}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时将会对小麦产量造成严重损害。事实上,自然界的资源有限,鼠类种群数量会受到食物、空间、竞争等影响不可能无限增长下去,当种群密度达到环境容纳量时,此时鼠密度被制约,鼠类喜食牧草也消耗殆尽,牧草损失产量也不会无限增长下去。因此本研究利用逻辑斯蒂增长模型分别拟合了连续放牧和禁牧方式下鼠密度与牧草产量损失比的关系,研究表明随着鼠密度的增长,牧草产量损失比的增长符合逻辑斯蒂S型曲线,进一步对模型分析得出连续放牧方式下的危害阈值为 $26\text{个标准鼠单位}\cdot\text{hm}^{-2}$,禁牧方式下的危害阈值为 $33.2\text{个标准鼠单位}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。危害阈值是最低安全值,当鼠密度大于危害阈值时,鼠类对牧草所造成的损失将快速增长,不仅会降低草地生产力,更会减少物种多样性,破坏荒漠草地生态系统种间平衡,加速草地退化。

而开展鼠害经济阈值研究是科学、精准防控鼠害的前提^[25]。鼠害防治是一项经济活动,为了获得最大的净经济效益,必须将防治所付出的代价与防治收益进行权衡。本研究使用标准鼠单位通过研究害鼠密度与牧草产量损失比的关系计算得出阿拉善荒漠连续放牧和禁牧两种草地利用方式下啮齿动物经济阈值。结果表明,连续放牧方式下啮齿动物经济阈值为 $39.2\text{个标准鼠单位}\cdot\text{hm}^{-2}$,禁牧方式下啮齿动物经济阈值为 $30.2\text{个标准鼠单位}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。目前国内外对啮齿动物经济阈值的研究,大多集中于单一鼠种。贾立军^[26]在陕西定边通过研究长爪沙鼠(*Meriones unguiculatus*)有效洞口数与草地植物减产量的关系得出长爪沙鼠的经济阈值为有效洞口数 $115\text{个}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。苏永志等^[12]采用种群动态分析法,根据各经济数据的动态变化研究得出内蒙古典型草原布氏田鼠的春季防治经济阈值为 $40\text{只}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。根据中国农业行业标准《草原鼠荒地治理技术规范》(NY/T 1240-2006)^[27],荒漠草地害鼠大沙鼠(*Rhombomys opimus*)的经济阈值为有效洞口数 $400\text{个}\cdot\text{hm}^{-2}$ 或大沙鼠数量 $30\text{只}\cdot\text{hm}^{-2}$,长爪沙鼠的经济阈值为有效洞口数 $500\text{个}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。但在草地生态系统中,不同类型的草地中不仅是单一鼠种存在,往往是多种啮齿动物共存,共同危害草地。武晓东等^[28]和付和平等^[16]在阿拉善荒漠区鼠害区划研究中发现形成危害的关键鼠种为子午沙鼠、三趾跳鼠、五趾跳鼠与小毛足鼠。本研究结果与此一致。因此使用标准鼠单位确定鼠类密度研究鼠害危害阈值与经济阈值能更准确地反映草地受害情况。

经济阈值作为一个防治指标,在制定过程中受到很多因素的影响^[29],不同类型的草地、草地不同利用方式以及害鼠种类不同都会导致结果不同。叶丽娜^[14]在锡林郭勒盟典型草原不同放牧方式下鼠害防治的经济效益研究结果表明禁牧方式下鼠害经济阈值为标准鼠单位 $94\text{只}\cdot\text{hm}^{-2}$,连续放牧方式下鼠害经济阈值为标准鼠单位 $20\text{只}\cdot\text{hm}^{-2}$,禁牧方式下的鼠害经济阈值显著高于连续放牧。本研究结果与此差异较大,一方面,典型草原植被茂密,草地生产力较高,物种多样性较高,草地承载力也较高;荒漠草地植被稀疏,物种匮乏,草地生产力较低,草地承载力也较低,两者之间有较大差异,不同利用方式对其影响的响应也不同。另一方面,因气候、地形、温度等的差异,典型草原不同利用方式下主要害鼠为布氏田鼠^[30],阿拉善荒漠不同利用方式下优势害鼠种类不同,禁牧方式下优势鼠种为子午沙鼠,连续放牧方式下优势鼠种为五趾跳鼠。本研究结果表明禁牧区鼠类种群数量、造成的牧草损失产量与牧草产量损失比均高于连续放牧区。子午沙鼠属为群居鼠种,喜欢较为郁闭的空间,活动觅食范围局限于巢穴周围^[31]。五趾跳鼠为独居鼠种,喜欢较为开阔的地区,活动能力强,能到较远的地方活动捕食^[32]。因此子午沙鼠可能会在合适的条件下形成高密度种群,对植物造成更大的损失。长此以往禁牧区草地对鼠类的承载力就会下降,导致禁牧区鼠害经济阈值低于连续放牧区。因此,经济阈值的制定应从当地的实际情况出发,因地制宜,根据草地类型和危害鼠种的不同进行有针对性的治理。

鼠类作为生态系统中的一员对维持生态系统稳定性十分重要,许多研究表明适度啮齿动物对生态系统有积极的作用^[33-34],因此抛开种群水平和生态系统功能背景来谈鼠害是片面的^[21]。通过探究阿拉善荒漠区不同利用方式下啮齿动物密度、牧草产量、牧草产量损失比以及三者之间的函数关系计算出危害阈值与经济阈值,为试验区以及相同类型的草地鼠害防治提供确定的防治阈值,将鼠类密度控制在有鼠无害的范围内,对鼠害治理具有重要的指导意义。

4 结论

在阿拉善荒漠区中,连续放牧和禁牧方式下害鼠密度与牧草产量损失比的拟合曲线均符合逻辑斯蒂S型曲

线,由此得出连续放牧方式下鼠害危害阈值为 26 个标准鼠单位 $\cdot\text{hm}^{-2}$,经济阈值为 39.3 个标准鼠单位 $\cdot\text{hm}^{-2}$;禁牧方式下鼠害危害阈值为 33.2 个标准鼠单位 $\cdot\text{hm}^{-2}$,经济阈值为 30.2 个标准鼠单位 $\cdot\text{hm}^{-2}$ 。鼠害防治时可根据具体要求选择合适的防治阈值进行防治。

参考文献 References:

- [1] Chen S K, Bao P, Zhang X Y. Ecological crisis of Alashan desert grassland and its management strategies. *Grassland and Turf*, 2000, 2(3): 9—11.
陈善科, 保平, 张学英. 阿拉善荒漠草地生态危机及其治理对策. *草原与草坪*, 2000, 2(3): 9—11.
- [2] Yao Y F, Ba Y E, Chang G X, *et al.* Research on biological hazards and control of forest pests in Alxa Left Banner. *Inner Mongolia Forestry Investigation and Design*, 2019, 42(5): 42—45, 52.
姚艳芳, 巴依尔, 常桂霞, 等. 阿拉善左旗灌木林主要林业有害生物危害及防治研究. *内蒙古林业调查设计*, 2019, 42(5): 42—45, 52.
- [3] Wang X T, Hua L M, Su J H, *et al.* A study on the economic injury level of plateau pika (*Ochtona curzoniae*) and its control index. *Acta Prataculturae Sinica*, 2009, 18(6): 198—203.
王兴堂, 花立民, 苏军虎, 等. 高原鼠兔的经济损害水平及防治指标研究. *草业学报*, 2009, 18(6): 198—203.
- [4] Sun C L, Hao S S, Fan F L, *et al.* Economic threshold in the yellow steppe lemming (*Lagurus luteus*). *Current Zoology*, 1986, 32(1): 86—91.
孙崇璐, 郝守身, 范福来, 等. 黄兔尾鼠防治中经济阈值的探讨. *动物学报*, 1986, 32(1): 86—91.
- [5] Liang H C, Hu X P, Shi D Z. Relationship between the number of great long-tailed hamster and its damage to corn. *Plant Protection*, 2008, 34(4): 105—107.
梁红春, 胡晓鹏, 施大钊. 大仓鼠数量与玉米受害程度的关系. *植物保护*, 2008, 34(4): 105—107.
- [6] Xu M H, Liu T, Jiang L. Study on the harm characteristics of rodents to *Haloxylon ammodendrom* and its control for ecological threshold value in the south of Gurbantonggut desert. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2012, 26(6): 126—133.
徐满厚, 刘彤, 姜莉. 古尔班通古特沙漠南部梭梭鼠害特征及防治生态阈值研究. *干旱区资源与环境*, 2012, 26(6): 126—133.
- [7] Kaboodvandpour S, Leung K P. Modelling density thresholds for managing mouse damage to maturing wheat. *Crop Protection*, 2012, 42(7): 134—140.
- [8] Stern V M. Control of aphids attacking barley and analysis of yield increases in the Imperial Valley, California. *Journal of Economic Entomology*, 1967, 60(2): 485—490.
- [9] Leslie G W. Estimating the economic injury level and the economic threshold for the use of α -cypermethrin against the sugarcane borer, *Eldana saccharina* Walker (Lepidoptera: Pyralidae). *International Journal of Pest Management*, 2009, 55(1): 37—44.
- [10] Zhang Z B, Wang Z W. Ecology of important agricultural pests and control measures. Beijing: Ocean Press, 1998.
张知彬, 王祖望. 农业重要害鼠的生态学及控制对策. 北京: 海洋出版社, 1998.
- [11] Sun F D, Gou W L, Li F, *et al.* Plateau pika population survey and its control threshold in the alpine meadow ecosystems of the Tibetan Plateau. *Sichuan Journal of Zoology*, 2016, 35(6): 825—832.
孙飞达, 苟文龙, 李飞, 等. 青藏高原高寒草甸生态系统高原鼠兔种群调查及其防控阈值研究. *四川动物*, 2016, 35(6): 825—832.
- [12] Su Y Z, Wan X R, Wang M J, *et al.* Economical thresholds of Brandt's vole in the typical steppe in Inner Mongolia grassland. *Chinese Journal of Zoology*, 2013, 48(4): 521—525.
苏永志, 宛新荣, 王梦军, 等. 典型草原区布氏田鼠鼠害防治的经济阈值. *动物学杂志*, 2013, 48(4): 521—525.
- [13] Li Y N. The thresholds of economical and damage of rodent control under different grazing patterns in typical steppe. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2017.
李燕妮. 不同放牧方式下典型草原鼠害防治的危害阈值与经济阈值. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2017.
- [14] Ye L N. The study of economic benefits in rodent pest control under different grazing patterns in typical steppe. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2018.
叶丽娜. 典型草原不同放牧方式下鼠害防治经济效益研究. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2018.
- [15] Li N N, Yang J Y, Jia Z T, *et al.* Effects of different grazing patterns on community characteristics and soil nutrients in the main pasture types of Alxa Zuoqi. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, 29(5): 991—1003.

- 李娜娜, 杨九艳, 贾喆亭, 等. 不同放牧方式对阿拉善左旗主要草场类型群落特征和土壤养分的影响. 草地学报, 2021, 29(5): 991—1003.
- [16] Fu H P, Wu X D, Ma C M, *et al.* Analysis on harm cause and control division of rodents in desert region of Alashan of Inner Mongolia. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2002, 16(4): 106—109.
付和平, 武晓东, 马春梅, 等. 内蒙古阿拉善荒漠区鼠害成因及防治区划. 干旱区资源与环境, 2002, 16(4): 106—109.
- [17] Yang S W, Yuan S, Fu H P, *et al.* The population density and breeding characteristic of Mid-day Jerbil (*Meriones meridianus*) in the desert habitats, with different disturbance. Chinese Journal of Zoology, 2017, 52(5): 745—753.
杨素文, 袁帅, 付和平, 等. 不同干扰荒漠生境中子午沙鼠的繁殖及种群动态特征. 动物学杂志, 2017, 52(5): 745—753.
- [18] Krebs C J. Demographic changes in fluctuating populations of *Microtus californicus*. Ecological Monographs, 1965, 36(3): 239—273.
- [19] Wang L M, Zhou Y L, Bao W D. Resource use of rodent community in the sand land of Ordos plateau II — Analysis of food resource use. Journal of Inner Mongolia University (Natural Science Edition), 2002, 33(1): 65—72.
王利民, 周延林, 鲍伟东. 鄂尔多斯高原沙地啮齿动物群落资源利用研究 II ——食物资源维利用研究. 内蒙古大学学报(自然科学版), 2002, 33(1): 65—72.
- [20] Huang H M, Wang T Z. Study on food habits and food consumption of mandarin vole (*Microtus mandarinus*) in agriculture area on loess plateau in west of Henan. Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition), 1999, 27(3): 88—92.
黄惠敏, 王廷正. 棕色田鼠食性食量的研究. 陕西师范大学学报(自然科学版), 1999, 27(3): 88—92.
- [21] Wang D L, Li X C, Pan D F, *et al.* The ecological significance and controlling of rodent outbreaks in the Qinghai—Tibetan grasslands. Journal of Southwest Minzu University (Natural Science Edition), 2016, 42(3): 237—245.
王德利, 李心诚, 潘多峰, 等. 青藏高原草地鼠害的生态释义及控制. 西南民族大学学报(自然科学版), 2016, 42(3): 237—245.
- [22] Yu H C, Chen J H, Sun L F, *et al.* Study on relationship between population density and yield loss of spring maize and economic threshold of armyworm, *Mythimna separata* (Walker). Journal of Northeast Agricultural University, 2021, 52(3): 13—19.
于洪春, 陈佳欢, 孙苓芙, 等. 黏虫虫口密度与春玉米产量损失关系及经济阈值研究. 东北农业大学学报, 2021, 52(3): 13—19.
- [23] Li Y N, Yuan S, Fu H P, *et al.* Relationship of rodent densities with forage loss in typical steppe. Acta Theriologica Sinica, 2018, 38(4): 369—376.
李燕妮, 袁帅, 付和平, 等. 典型草原啮齿动物密度与牧草损失产量的关系. 兽类学报, 2018, 38(4): 369—376.
- [24] Brown P R, Huth N I, Banks P B, *et al.* Relationship between abundance of rodents and damage to agricultural crops. Agriculture Ecosystems & Environment, 2007, 120(2): 405—415.
- [25] Meng X Y, Li L L, Ouyang F, *et al.* Ecological and economic threshold (EET) and its estimation method. Chinese Journal of Applied Entomology, 2020, 57(1): 214—217.
门兴元, 李丽莉, 欧阳芳, 等. 害虫防治的生态经济阈值及其估算方法. 应用昆虫学报, 2020, 57(1): 214—217.
- [26] Jia L J. Study on the economic loss level caused by *Meriones unguiculatus* and its control index in Dingbian County of Shanxi Province. Grassland and Turf, 2014, 34(3): 76—81.
贾立军. 陕西定边长爪沙鼠的经济损失水平及防治指标研究. 草原与草坪, 2014, 34(3): 76—81.
- [27] Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Technical specification for grassland wasteland management, NY/T 1240-2006. Beijing: Ministry of Agriculture of the People's Republic of China, 2006.
中华人民共和国农业部. 草原鼠荒地治理技术规范, NY/T 1240-2006. 北京: 中华人民共和国农业部, 2006.
- [28] Wu X D, Su J A, Xue H R, *et al.* Study of rodent pest division and control strategy in semi-arid region of Inner Mongolia. Journal of Inner Mongolia Institute of Agriculture & Animal Husbandry, 1997, 18(1): 47—53.
武晓东, 苏吉安, 薛何儒, 等. 内蒙古荒漠区鼠害区划及防治策略研究. 内蒙古农牧学院学报, 1997, 18(1): 47—53.
- [29] Gu A X, Zhou F C, Yang Y Z, *et al.* Study on the damage of *Bemisia tabaci* to cotton and the economic threshold in cotton fields. Xinjiang Agricultural Sciences, 2019, 56(1): 67—73.
顾爱祥, 周福才, 杨益众, 等. 棉田烟粉虱的为害及其经济阈值分析. 新疆农业科学, 2019, 56(1): 67—73.
- [30] Ma J, Yuan S, Guo Q W, *et al.* Responses of typical grassland rodent communities to different grazing disturbances. Grassland and Prataculture, 2021, 33(2): 27—31, 59.
马久, 袁帅, 郭乾伟, 等. 典型草原啮齿动物群落对不同放牧干扰的响应. 草原与草业, 2021, 33(2): 27—31, 59.

- [31] Song K, Liu R T. The ecology of midday gerbil (*Meriones meridianus* Pallas). *Acta Theriologica Sinica*, 1984, 4(4):291–300.
宋恺, 刘荣堂. 子午沙鼠(*Meriones meridianus* Pallas)的生态研究. 兽类学报, 1984, 4(4): 291–300.
- [32] Zhao K T. The ecology of five toed jerboa (*Allactaga sibirica*). *Chinese Journal of Zoology*, 1982, 17(5): 18–22.
赵肯堂. 五趾跳鼠的生态调查. 动物学杂志, 1982, 17(5): 18–22.
- [33] Pang X P, Jia T T, Li Q Q, *et al.* Effect of available burrow densities of plateau pika (*Ochotona curzoniae*) on characteristics and distribution pattern of *Kobresia pygmaea* community. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(3): 873–884.
庞晓攀, 贾婷婷, 李倩倩, 等. 高原鼠兔有效洞穴密度对高山嵩草群落及其主要种群空间分布特征的影响. 生态学报, 2015, 35(3): 873–884.
- [34] Zhang Y, Dong S K, Gao Q Z, *et al.* Responses of alpine vegetation and soils to the disturbance of plateau pika (*Ochotona curzoniae*) at burrow level on the Qinghai–Tibetan Plateau of China. *Ecological Engineering*, 2016, 88(3): 232–236.