

DOI: 10.20103/j.stxb.202206281830

蔡新成,花立民,叶国辉,楚彬.基于标志重捕法的高原鼯鼠种群动态及其环境影响因子.生态学报,2024,44(2):591-601.

Cai X C, Hua L M, Ye G H, Chu B. Population characteristics of plateau zokor (*Eospalax baileyi*) and its relationship with environmental factors. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(2): 591-601.

基于标志重捕法的高原鼯鼠种群动态及其环境影响因子

蔡新成,花立民,叶国辉,楚彬*

甘肃农业大学草业学院,国家林业草原高寒草地鼠害防控工程技术研究中心,兰州 730070

摘要:高原鼯鼠(*Eospalax baileyi*)是青藏高原优势地下啮齿动物,研究其种群数量变化规律及其与环境因子关系,对于保护高寒草地生物多样性和科学防控草原鼠害具有重要意义。于2014—2019年在天祝县抓喜秀龙乡高原鼯鼠分布区,采用标志重捕法调查每年5月和10月高原鼯鼠种群密度、存活率、补充量及体重,利用样方法调查各植物功能群地上、地下生物量,并从中国气象数据中心获取同期气象数据。通过灰色关联度分析,探究高原鼯鼠种群特征变化与环境因子关联程度。结果表明:高原鼯鼠种群数量存在年际和季节性变化规律,年际间高原鼯鼠种群数量总体呈下降趋势,秋季高原鼯鼠种群数量高于春季种群数量;灰色关联分析表明,春季高原鼯鼠种群数量变化与降雨量、极端温度和杂类草生物量关联程度较高,而秋季高原鼯鼠种群数量与环境因子关联程度较低。研究结果不仅为今后构建高原鼯鼠种群数量预测预报模型提供基础依据,也为适时防控高原鼯鼠危害提供有益参考。

关键词:高原鼯鼠;标志重捕;种群特征;环境因子

Population characteristics of plateau zokor (*Eospalax baileyi*) and its relationship with environmental factors

CAI Xincheng, HUA Limin, YE Guohui, CHU Bin*

College of Pratacultural Science, Gansu Agricultural University; Engineering and Technology Research Center for Alpine Rodent Pests Control, National Forestry and Grassland Administration, Lanzhou 730070, China

Abstract: Population characteristics serve as fundamental indicators that reflect the current survival status of wild species, which are subject to dynamic changes due to internal and external environmental factors. Plateau zokor (*Eospalax baileyi*), a dominant subterranean rodent inhabiting the Tibetan Plateau, plays a vital role in maintaining species diversity and scientifically managing rodent damage in alpine grasslands. Therefore, it is crucial to investigate the population characteristics of the plateau zokor and its relationship with the environmental factors. For this study, we selected the typical plateau zokor distribution area, with an area of 1.5hm², in Zhuaxixiulong Town, Tianzhu County. We used the capture-mark-recapture method to analyze the population density, survival rate, recruitments per hectare, and body weight of plateau zokor in May and October from 2014 to 2019. Additionally, the aboveground and belowground biomass of each plant functional group was investigated by sampling method, and also obtained the climate data for the same period from the China Meteorological Data Center. Finally, we examined the relationship between population characteristics and the environmental factors by using the gray correlation analysis. The results indicated that the population characteristics of the plateau zokor

基金项目:国家自然科学基金项目(32160338);甘肃省教育厅产业支撑计划项目(2021CYZC-05);甘肃农业大学公招博士科研启动基金项目(GAU-KYQD-2020-19);国家林业和草原局草地啮齿动物危害防控创新团队项目

收稿日期:2022-06-28; **网络出版日期:**2023-10-17

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ryan_713@163.com

exhibited interannual and seasonal variations. From 2014 to 2019, the population density and survival rate of the plateau zokor displayed a declining trend. Moreover, the population density in spring was lower than that in autumn, while the survival rate and recruitments per hectare of plateau zokor from spring to autumn were higher than those from autumn to the following spring. Grey correlation analysis revealed that the population density, survival rate and body weight of plateau zokor were highly correlated with rainfall, extreme temperature, and the biomass of forbs in spring. However, the recruitments per hectare of the plateau zokor population showed a low correlation with spring climatic factors and plant biomass. In autumn, the population density and recruitments per hectare of plateau zokor exhibited less correlation with climatic factors, except for a higher correlation between the survival rate and body weight with temperature. Furthermore, in autumn, the correlation between the population density and survival rate of the plateau zokor and plant biomass was relatively lower, except for a slightly higher correlation between the recruitments per hectare and body weight with plant biomass. In summary, these findings not only provide a foundation for the establishment of the plateau zokor population prediction but also offer valuable insights for the prevention and control of the plateau zokor outbreak in time.

Key Words: *Eospalax baileyi*; capture-mark-recapture; population characteristics; environmental factor

种群动态是种群生态学研究的核心问题,而种群数量特征又是种群动态重要研究内容^[1]。长期以来,种群数量特征及其与环境因子关系一直是动物种群动态研究的热点问题^[2-4]。研究动物种群数量特征变化不仅可帮助人类认识种群生存现状及发展规律,而且对于野生动物保护和有害生物防控具有重要意义^[5-6]。

采用合理的动物种群数量调查方法是研究其种群数量变化规律的基础。野外啮齿动物数量调查方法有很多,地上啮齿动物主要采用堵洞盗开法、夹日法、目测法等^[7-8];地下啮齿动物主要采用土丘系数法^[9]。以上这些方法,虽可以方便快捷的对啮齿动物数量进行调查,但对于了解种群参数等方面具有一定的局限性。标志重捕法作为种群数量调查的另一种方法,可以较准确地获得种群数量、存活率、补充量等重要种群参数。国外很早就已运用此种方法进行啮齿动物种群动态研究^[10]。国内采用标志重捕法研究啮齿动物种群动态主要集中在地上鼠,而关于地下鼠的研究报道较少。

高原鼢鼠(*Eospalax baileyi*)属啮齿目(Rodentia),鼢形鼠科(Spalacidea),鼢鼠亚科(Myospalacinae),是青藏高原高寒草地优势地下啮齿动物^[11]。高原鼢鼠采食、挖掘洞道及推土造丘行为对高寒草地生态系统产生多种影响。一方面,高原鼢鼠挖掘行为造成草地土壤更新,造丘行为产生异质性微生境,有利于植物多样性的维持。另一方面,当高原鼢鼠种群密度超出环境容量时,导致草地生产力下降,生物多样性丧失,严重影响青藏高原高寒草地生态系统服务功能的正常发挥^[12-13]。因此,掌握高原鼢鼠种群数量波动规律,研究其种群数量变化与环境因子的关系,对于保护高寒草地物种多样性和科学防控草原鼠害具有重要意义。

目前,国内外对啮齿动物种群动态及其影响因素研究已有大量报道,但主要以地面鼠为主^[14-16]。众多研究表明,啮齿动物种群特征存在明显的年际和季节性波动,通过对黑线姬鼠(*Apodemus agrarius*)、子午沙鼠(*Meriones meridianus*)、布氏田鼠(*Lasiopodomys brandtii*)等啮齿动物种群动态长年监测,发现其种群数量在不同年度、月份和季节间均有显著的周期性变化^[17-19]。此外,啮齿动物种群特征受多种因素影响,其中环境条件的变化是影响啮齿动物种群波动的重要原因。Turchin 等^[20]研究发现栖息地植物生长状况直接决定啮齿动物食物资源的数量和品质,可有效调控棕色旅鼠(*Lemmus sibiricu*)种群数量。温度、降水等气候因子可通过改变鼠类栖息环境、食物资源丰富度等方式影响动物生存和繁殖状况,进而对啮齿动物种群数量产生影响^[21-23]。然而,由于高原鼢鼠常年营地下生活,关于其种群动态研究报道较少,仅有汪志刚等^[24]、郭强等^[6]研究者采用鼠丘数量作为相对种群密度指标探讨高原鼢鼠种群数量动态,但研究结果很难反映实际种群特征状况。因此,本研究选取祁连山东段高原鼢鼠栖息区,采用标志重捕法调查 2014—2019 年春、秋两季高原鼢鼠种群特征,并从中国气象数据中心获取同期气象数据,利用样方法调查各植物功能群生物量,通过灰色关联分析,明晰高原鼢鼠种群数量变化规律及其与环境因子的关系,以期为保护高寒草地生物多样性和科学防控

草原鼠害提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究区选在甘肃省武威市天祝藏族自治县抓喜秀龙乡的高原鼢鼠栖息区(37°12'N, 102°46'E; 图 1), 研究区面积为 1.5hm², 海拔 2937m, 气候阴冷潮湿, 昼夜温差大, 太阳光照强。年均气温 -0.1℃, 其中最冷月平均温度为 -18.3℃(1 月), 最热月平均温度为 12.7℃(7 月); 年均降水 416mm, 以 7—9 月地形雨为主, 年均蒸发量 1592mm; >0℃ 的年积温 1380℃, 植物生长期仅 120—140d, 全年无绝对无霜期^[25]。该区地势平缓, 土层厚 40—80cm, 以高山草甸土为主。草地类型为高寒草甸, 植被盖度 90% 左右, 以禾本科和莎草科为主, 伴有其他杂类草, 主要植物有垂穗披碱草(*Elymus nutans*)、早熟禾(*Poa annua*)、矮嵩草(*Kobresia humilis*)、鹅绒委陵菜(*Potentilla anserina*)、珠芽蓼(*Polygonum viviparum*)、平车前(*Plantago depressa*)、秦艽(*Gentiana macrophylla*)等^[26]。高原鼢鼠是该区域唯一的地下啮齿动物^[27]。此外, 2014—2019 年该研究区放牧强度相同, 放牧对高原鼢鼠种群干扰程度一致。

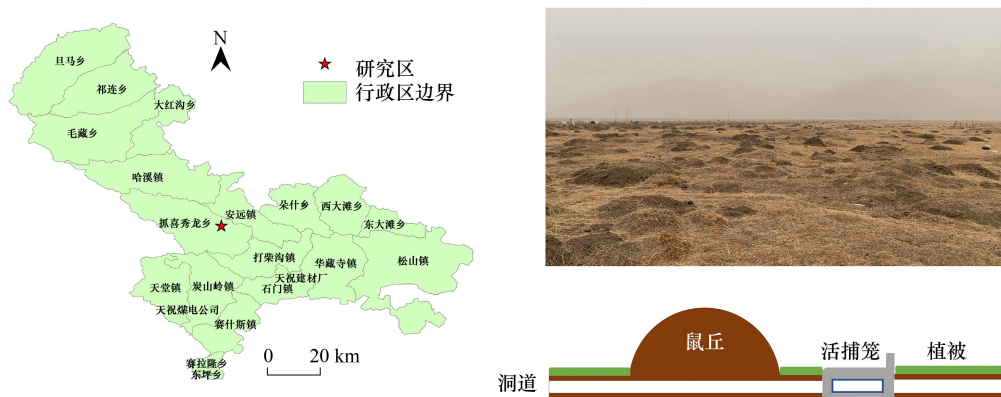


图 1 研究区概况

Fig.1 Overview of the study area

1.2 试验设计

2014—2019 年春季(5 月)和秋季(10 月)采取标志重捕法对高原鼢鼠个体进行标记重捕。由于该种群在自然状态下属开放种群, 利用 Jolly-Seber 模型估算每年高原鼢鼠种群数量、存活率及个体补充量^[28]。此外, 选取两季平均气温、平均最高气温、平均最低气温、平均地温、平均最高地温、平均最低地温、平均降水量和湿润度作为气候因子, 每年盛草期, 在样地内利用网格法设置 9 个 0.1m² 调查样方, 调查禾本科、莎草科和杂类草 3 种功能群植物地上、地下生物量, 运用灰色关联度分析方法, 揭示高原鼢鼠种群特征与气候和食物因子的关系。由于高原鼢鼠种群特征对环境因子存在滞后效应^[20], 分别采用春季(3—5 月)、秋季(8—10 月)气象数据, 并用前一年植物数据与当年春季高原鼢鼠种群特征之间的关系进行分析。

1.3 研究方法

1.3.1 高原鼢鼠捕获和标记

2014—2019 年每年春(5 月)、秋(10 月)两季利用活捕笼在试验区对高原鼢鼠进行活捕标记, 标志期为 5d。调查期间, 每天 09:00—12:00 在高原鼢鼠新推土丘位置附近利用探钎探明并剖开其活动洞道, 并在洞道中布设 10 个活捕笼^[29](图 1, 图 2), 于 18:00 检查笼体是否捕获鼢鼠, 首次被捕获的个体采用皮下注射被动式电子标签(图 2; SMC-G13421, 台湾瑞新公司)的方式对其进行标记^[30], 记录其性别、体重和捕获日期。在之后调查中对捕获个体使用电子标签扫描仪(图 2; SMC-H1000, 台湾瑞新公司)识别重捕个体, 并记录动物性

别、体重和重捕日期。

1.3.2 环境因子数据获取

(1) 气候因子

本研究选取春(3—5月)、秋(8—10月)两季平均气温、平均最高气温、平均最低气温、平均地温、平均最高地温、平均最低地温、平均降水量7个气候因子,气候数据来自中国气象数据网(<http://data.cma.cn>)。

湿润度用雨量指数^[31]表示,雨量指数 = $\frac{R}{T}$, 其中 R 表示每月降雨量, T 表示每月平均气温。

(2) 植物地下生物量调查

在2014—2019年每年盛草期完成研究区植被地上、地下生物量调查,采用网格法设置9个0.1m×0.1m×0.2m(长×宽×深)草块,草土分离后,将得到的植物根据功能群分为禾本科、莎草科和杂类草3类,分离地上、地下部分,在65℃烘箱烘至恒重并进行称重。

1.4 数据分析

1.4.1 高原鼯鼠种群参数估算

自然状态下高原鼯鼠种群数量、存活率、补充量等参数利用Jolly-Seber模型^[32]估算,数据处理采用R3.5.2中“FSA”包的“mrOpen”函数。

1.4.2 环境因子与高原鼯鼠种群特征间的灰色关联度分析

灰色关联度分析法是基于灰色系统的多因素分析方法,依据各因素的样本数据能够描述各因素关系的强弱、大小和次序^[33—34]。本研究将高原鼯鼠种群特征和环境因子(气候因子和食物因子)看作一个灰色系统,其中各年份高原鼯鼠种群特征设为参考数列 $X_i = \{X_i(k), k=1, 2, \dots, n\}$, 各环境因子设为对比数列 $X_j = \{X_j(k), k=1, 2, \dots, n\}$, ($i=1, 2, \dots, p; j=1, 2, \dots, q$) 其中, p 代表种群特征数量, q 代表环境因子数量。

关联系数计算公式: $r_{ij}(k) = \frac{\min_i \min_j \Delta_j(k) + \rho \max_j \max \Delta_i(k)}{\Delta_i(k) + \rho \max_j \max \Delta_i(k)}$, $\Delta_i(k) = |X_i(k) - X_j(k)|$, ρ 为分辨系数, $\rho = 0.5$ 。

关联度计算公式: $r_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n r_{ij}(k)$, n = 年份, $r_{ij}(k)$ = X_i 与 X_j 在 k 点的关联系数。

采用Excel 2016对所有数据进行整理,利用SPSS 19.0进行数据分析。统计分析前对所有数据先进行正态性检验(Kolmogorov-Smirnov检验)和方差齐性检验(Levene检验),采用配对样本 t 检验分析春、秋两季间体重间的差异。对于不同年际间气候和植物数据,先对数据进行 F 检验,整体差异显著后,采用单因素方差分析中的最小显著差异法(LSD)分析气候、植物在不同年份间的差异,显著水平均为 $\alpha = 0.05$ 。全文图表均采用GraphPad Prism 8.0绘制。

2 结果与分析

2.1 高原鼯鼠种群特征年际间变化

2014—2019年共捕获高原鼯鼠161只,其中雄性99只,雌性62只,重捕个体50只,重捕率为31.06%(表1,表2)。春季高原鼯鼠雌、雄个体体重(雌: (175.63 ± 6.63) g, 雄: (225.27 ± 9.53) g) 高于秋季(雌: (173.52 ± 6.69) g, 雄: (198.90 ± 8.26) g), 但无显著性差异。年际间,高原鼯鼠种群密度、存活率整体呈下降趋势,而高原鼯鼠种群每公顷补充量呈现先升高后下降的趋势。季节间,春季高原鼯鼠种群密度均低于秋季



图2 标志重捕工具

Fig.2 The tools of capture-mark-recapture

(除2017 年),每年春季到秋季高原鼫鼠种群存活率、每公顷补充量均高于当年秋季至次年春季(图3)。

表 1 高原鼫鼠捕获情况
Table 1 Capture situation of plateau zokor

项目 Items	2014		2015		2016	
	春季 Spring	秋季 Autumn	春季 Spring	秋季 Autumn	春季 Spring	秋季 Autumn
捕获数	雌性 3	13	6	13	9	14
Number of capture	雄性 9	5	10	2	8	2
体重 Weight/g	雌性 231.53±19.41Aab	180.64±11.19Ab	263.19±17.17Aa	221.47±16.03Ab	206.57±17.89Aab	196.92±11.93Ab
	雄性 151.65±7.65Ac	166.32±15.35Aa	194.30±10.00Aa	191.77±1.14Aa	183.44±4.83Aabc	165.37±12.37Aa
项目 Items	2017		2018		2019	
	春季 Spring	秋季 Autumn	春季 Spring	秋季 Autumn	春季 Spring	秋季 Autumn
捕获数	雌性 8	6	5	7	7	8
Number of capture	雄性 6	4	4	6	2	4
体重 Weight/g	雌性 187.73±23.09Ab	209.31±21.47Ab	265.88±25.06Aa	217.49±17.32Ab	228.00±21.57Aab	260.73±16.85Aa
	雄性 164.03±7.82Abc	161.61±18.17Aa	192.80±13.87Aab	165.28±9.55Aa	206.99±8.37Aa	201.75±21.86Aa

不同小写字母代表年际间差异显著,不同大写字母表示季节间差异显著($P<0.05$)

表 2 高原鼫鼠标志重捕资料及种群参数估计
Table 2 The marker recapture data and the estimation of population parameters of plateau zokor

时间 Time	n_i	m_i	S_i	R_i	Z_i	M_i	N_i	Φ_i	B_i
2014 春季 Spring	12	—	12	8	—	—	—	1.04	—
秋季 Autumn	18	4	18	8	2	13.00	47	0.87	15
2015 春季 Spring	16	6	16	5	6	25.20	56	0.64	21
秋季 Autumn	15	5	15	5	6	23.00	56	0.61	14
2016 春季 Spring	17	6	17	6	5	20.17	49	0.74	27
秋季 Autumn	16	5	16	5	6	24.20	62	0.67	0
2017 春季 Spring	14	7	14	3	4	25.67	41	0.52	12
秋季 Autumn	10	4	10	2	3	19.00	33	0.46	9
2018 春季 Spring	9	3	9	2	2	12.00	24	0.43	21
秋季 Autumn	13	2	13	5	2	7.2.00	31	0.85	-1
2019 春季 Spring	9	5	9	1	2	23.00	25	—	—
秋季 Autumn	12	3	12	—	—	—	—	—	—

n_i :第*i* 次取样时捕获的动物数; m_i :第*i* 次取样的捕获数中,已标志的动物数; S_i :第*i* 次取样时释放的动物总数,包括过去标志和新标志的; R_i :在第*i* 次取样时释放的动物总数(即 S_i) 中以后被陆续重捕到的动物总数; Z_i :在第*i* 次取样前标志的,在第*i* 次取样中未捕获到,但在以后取样中又被重捕到的动物总数; M_i :第*i* 次取样前,野外种群中全部已标志动物总数的估计值; N_i :第*i* 次取样时的种群大小估计值; Φ_i :从*i* 到*i* + 1 期种群的存活率; B_i :从*i* 到*i* + 1 期中新补充的动物数

2.2 高原鼫鼠栖息地环境因子变化

2.2.1 气候因子变化

如图 4 所示,2014—2019 年春季气温、地温、降水量和湿润度年际间均无显著差异。平均气温、平均最低气温和平均最高气温在 6 年间变化趋势一致,均表现出 2017 年最低(0.17℃、-3.89℃、5.38℃),2018 年最高(3.03℃、-2.00℃、9.30℃)。平均地温和平均最低地温年际间变化波动较小,而平均最高地温波动较大,在 2017 年最低(19.34℃),2018 年最高(27.24℃)。平均降水量呈先降低后增高的趋势,2019 年平均降水量最高(38.90mm)。湿润度年际间波动较大,在 2018 年最小(5.60mm/℃),2019 年最大(49.89mm/℃)。

研究样地 2014—2019 年秋季气象因子变化特征如图 5 所示。气温、地温、降水量和湿润度年际间均无显著差异。平均气温、平均最低气温、平均最高气温、平均地温、平均最低地温和平均最高地温年际间变化幅度

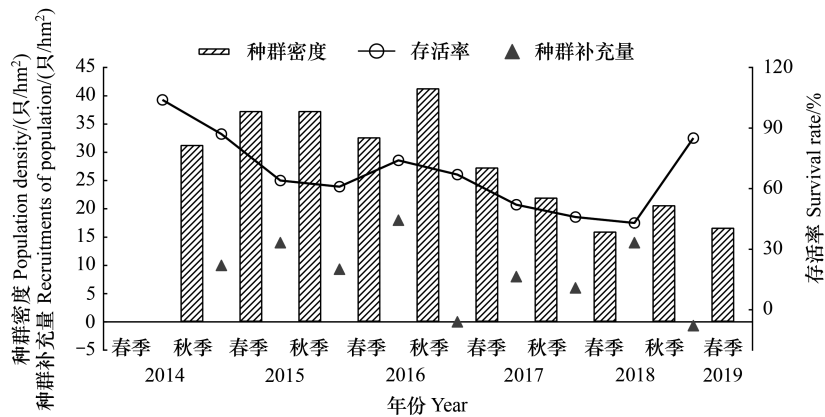


图3 高原鼯鼠种群参数年际变化

Fig.3 Seasonal and interannual variation of population parameters of plateau zokor

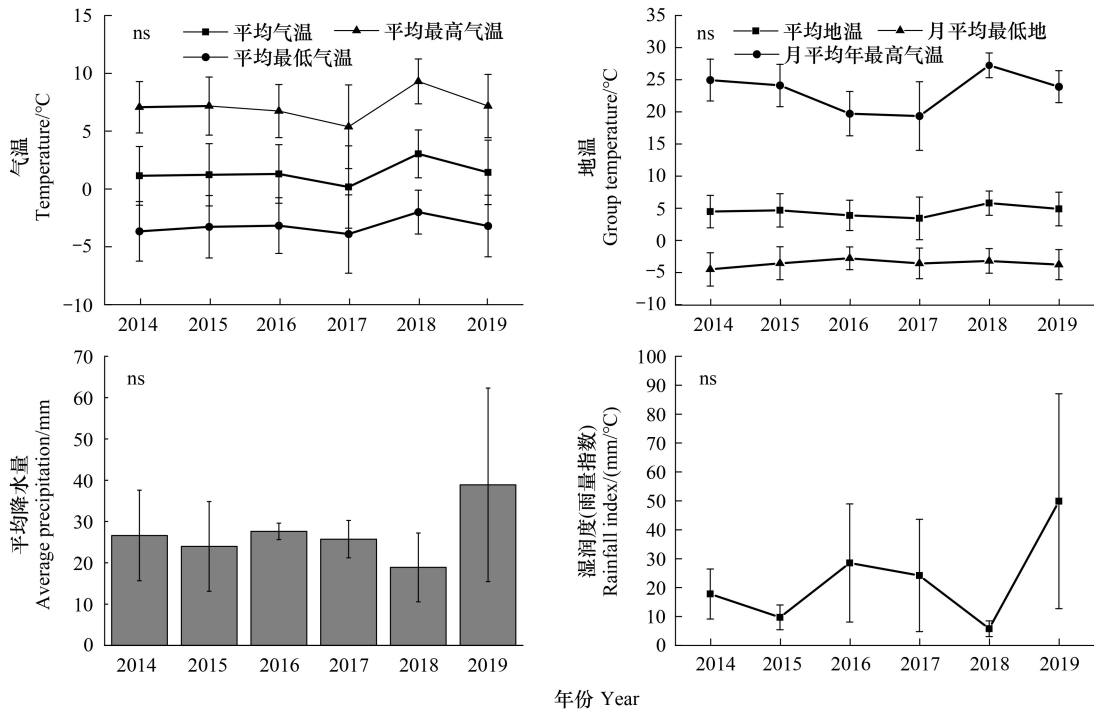


图4 春季试验区气候因子变化

Fig.4 Differences of meteorological factors at the experimental area in Spring

ns 表示气象因子在年际间差异不显著

较小,变化幅度未超过 4℃。秋季平均降水量和湿润度在年际间波动较大,均呈先升高后降低的趋势,其中 2018 年最高(91.3mm、22.49mm/℃),2015 年最低(49.33mm、8.19mm/℃)。

2.2.2 植物生物量变化

6 年间植物地上生物量年际变化特征如图 6。2014 年禾本科和莎草科植物地上生物量均显著低于 2017 年和 2019 年($F=1.48, P<0.05$; $F=1.99, P<0.05$),杂类草地上生物量呈先降低后增高趋势,2019 年杂类草地上生物量显著高于 2016 年($F=1.27, P<0.05$),与其他年份无显著差异。总地上生物量在 2017 年和 2019 年较高,且显著高于 2016 年和 2018 年($F=4.05, P<0.05$)。

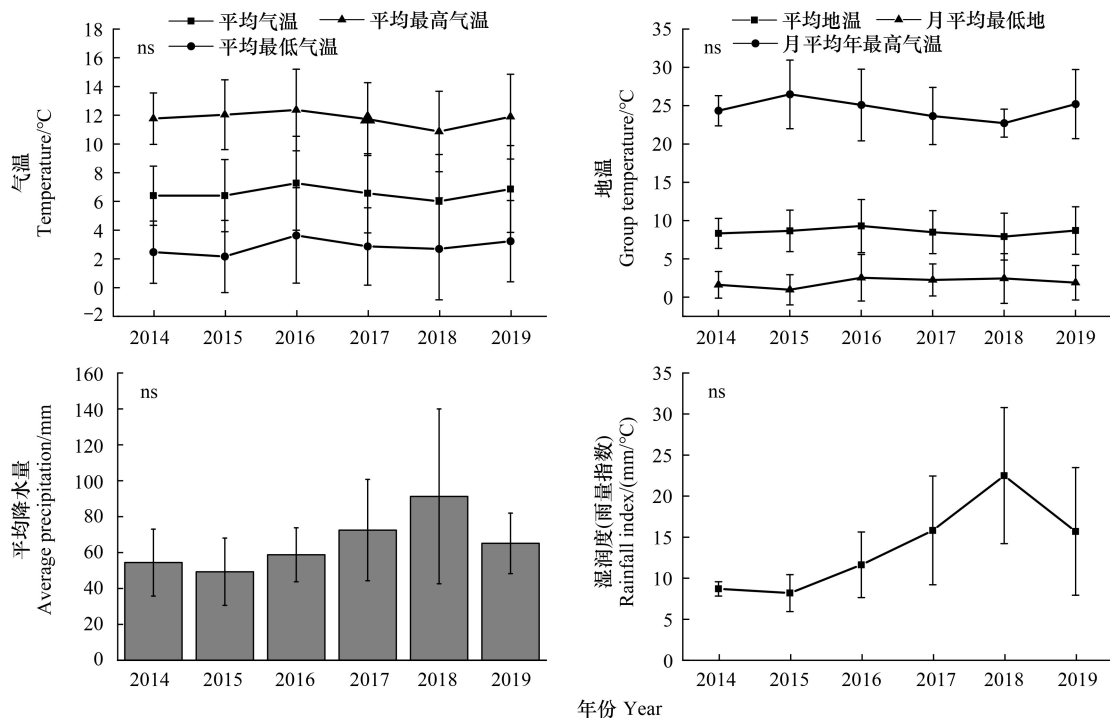


图 5 秋季试验区气候因子变化

Fig.5 Differences of meteorological factors at the experimental area in Autumn

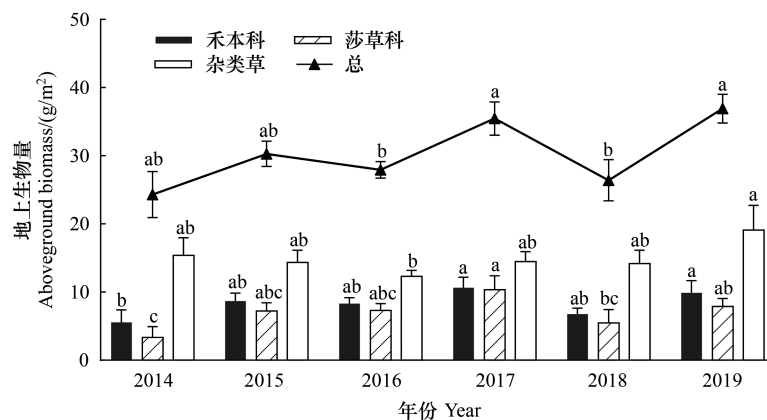


图 6 试验区植物地上生物量年际变化

Fig.6 The interannual variation of plant aboveground biomass in test area

不同小写字母代表年际间差异显著 ($P < 0.05$)

6 年间植物地下生物量年际变化特征如图 7 所示。2015 年禾本科植物地下生物量显著高于 2019 年 ($F = 2.64, P < 0.05$)。2019 年莎草科植物地下生物量显著高于 2016 和 2017 年 ($F = 2.39, P < 0.05$)。杂类草植物地下生物量年际间无显著性差异, 其中 2014 年最高 (268.6 g/m^2), 2016—2018 年相对较低。2015 年总地下生物量最高 (1003.19 g/m^2), 且显著高于 2016 年和 2017 年 ($F = 3.18, P < 0.05$)。

2.3 高原鼢鼠种群特征与环境因子的关系

2.3.1 高原鼢鼠种群特征与气候因子的灰色关联度分析

高原鼢鼠种群特征与气候因子的灰色关联度分析结果如图 8 所示。春季高原鼢鼠种群密度与平均最低气温的关联度最高 (0.52), 种群存活率与平均降水量关联度最高 (0.75), 高原鼢鼠雌、雄个体体重分别与平均

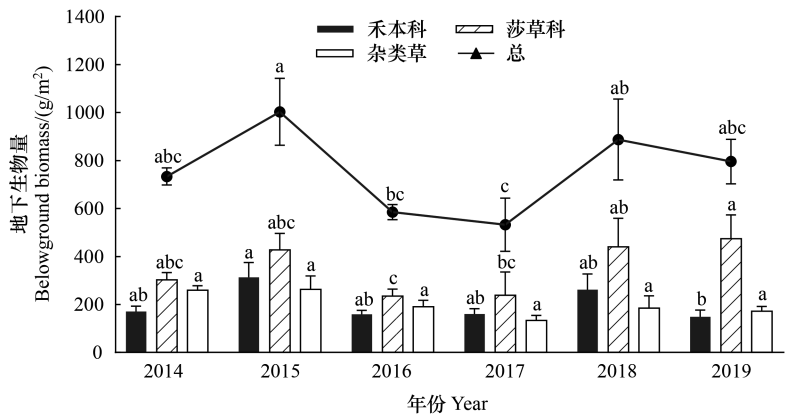


图 7 试验区植物地下生物量年际变化

Fig.7 The interannual variation of plant belowground biomass in test area

不同小写字母代表年际间差异显著 ($P<0.05$)

最低地温(0.94)和平均最高地温(0.80)关联度最高。而高原鼯鼠种群每公顷补充量与春季气候因子关联性均较低。秋季高原鼯鼠种群密度和每公顷补充量与气候因子关联性均较低,而高原鼯鼠存活率与平均最低气温和平均最高气温具有较高的关联性,关联系数分别为 0.46 和 0.42;高原鼯鼠雌、雄个体体重分别与平均最高地温(0.73)和平均气温(0.63)关联度最高。

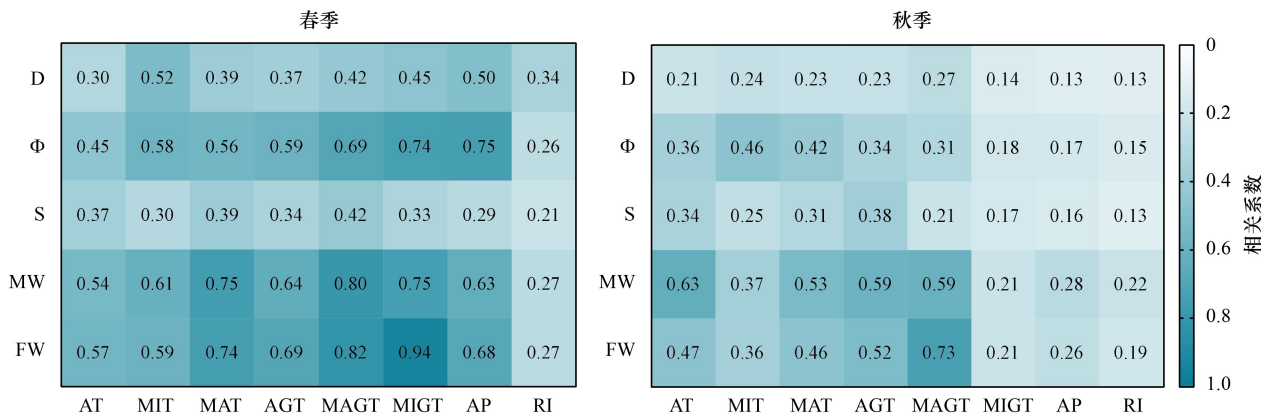


图 8 高原鼯鼠种群特征与气候因子的关联度(2014—2019 年)

Fig.8 Correlation degree between plateau zokor population characteristics and meteorological factors (2014—2019)

D:种群密度 Population density;Φ:存活率 Survival rate;S:每公顷补充量 Recruits per hectare;MW:雄性高原鼯鼠体重 The weight of male plateau zokor;FW:雌性高原鼯鼠体重 The weight of female plateau zokor;AT:平均气温 Average temperature;MIT:平均最低气温 Average minimum temperature;MAT:平均最高气温 Average maximum temperature;AGT:平均地温 Average ground temperature;MIGT:平均最低地温 Average minimum ground temperature;MAGT:平均最高地温 Average maximum ground temperature;AP:平均降水量 Average precipitation;RI:湿润度 Rainfall index

2.3.2 高原鼯鼠种群特征与植物因子的灰色关联度分析

如图 9 所示,春季高原鼯鼠种群密度、存活率均与杂类草地下生物量关联度最大(0.53,0.55),而高原鼯鼠每公顷补充量与植物生物量的关联度均较低,高原鼯鼠雌、雄个体体重与杂类草地上生物量关联度最大(0.53,0.52)。秋季高原鼯鼠种群密度和存活率与植物生物量关联度相对较低,而其每公顷补充量与杂类草植物地上生物量有较高的关联性(0.51),雄性和雌性体重分别与杂类草地上生物量和总地上生物量表现出较高的关联度(0.53,0.40)。

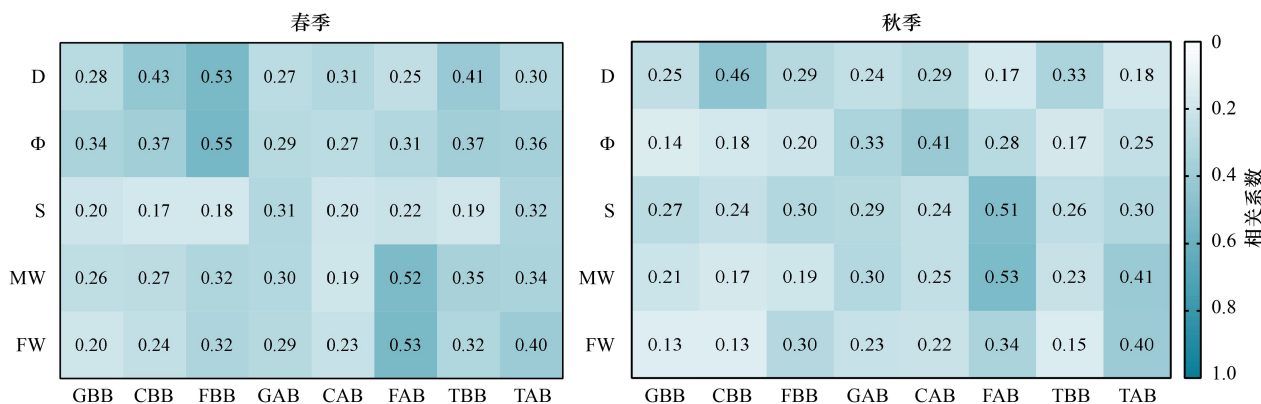


图9 高原鼫鼠种群特征与植物生物量的关联度(2014—2019年)

Fig.9 Correlation degree between plateau zokor population characteristics and plant biomass (2014—2019)

GBB:禾本科植物地下生物量 The bellowground biomass of Gramineae;CBB:莎草科植物地下生物量 The bellowground biomass of Cyperaceae; FBB:杂类草植物地下生物量 The bellowground biomass of forbs;GAB:禾本科植物地上生物量 The aboveground biomass of Gramineae;CAB:莎草科植物地上生物量 The aboveground biomass of Cyperaceae;FAB:杂类草植物地上生物量 The aboveground biomass of forbs;TBB:总地下生物量 The total bellowground biomass of plant;TAB:总地上生物量 The total aboveground biomass of plant

3 讨论

3.1 高原鼫鼠种群数量变化

动物种群特征是反映野生物种当前生存状态优劣的基本指标,在内外环境因素的综合作用下动态变化^[5]。研究表明,啮齿动物种群特征存在明显的年际和季节性波动^[35–36]。卫万荣^[37]发现,高原鼠兔(*Ochotona curzoniae*)种群数量年际动态具有周期性,波动周期为5年,通常经历潜伏(2年)、上升(2年)、高峰(1年)三个时期,之后种群数量断崖式下降。杨再学等^[38]分析了1984—2012年黑腹绒鼠(*Eothenomys melanogaster*)种群数量动态,发现黑腹绒鼠种群数量全年在春季和秋季出现两个数量高峰,具有明显的季节性变化。本研究结果表明,2014—2019年高原鼫鼠种群密度整体呈下降趋势,季节间高原鼫鼠种群密度表现出春季低于秋季的季节性规律。这与张堰铭等^[39]对高原鼫鼠种群数量变化规律的研究结果类似。其次,本研究对高原鼫鼠种群存活率和每公顷补充量估算结果显示,高原鼫鼠种群存活率和每公顷补充量在6年间也存整体下降趋势,并有明显的季节波动,每年春季至秋季的存活率和每公顷补充量均高于当年秋季至次年春季。这是因为高原鼫鼠每年3—6月进入繁殖期,至秋季后,大量新生个体加入种群,另一方面,春季至秋季的环境条件对高原鼫鼠生活较为适宜,从而提高了高原鼫鼠该时期的种群存活率,进而导致秋季种群数量相对较高,而从秋季至次年春季,经过严酷的越冬期,再加食物资源短缺,种群内个体的死亡率增加,导致次年春季种群数量的降低。此外,动物体重与栖息地环境和年龄关系密切^[40–41],春季过后至秋季,高原鼫鼠食物资源充足,其种群体重理应高于春季,然而,本研究结果显示,秋季高原鼫鼠种群中雌雄个体体重均普遍低于春季,这是因为新生个体的出现造成了秋季高原鼫鼠种群平均体重的降低。从此也证实,高原鼫鼠幼体的加入是秋季高原鼫鼠种群密度增高的重要原因。但有些年份高原鼫鼠种群数量的季节性变动表现出相反的趋势,这可能与动物迁入率增高或繁殖率降低有关。

3.2 环境因子对高原鼫鼠种群特征的影响

啮齿动物种群波动是外源性因素和内源性因素综合作用的结果^[42]。其中,外源性理论认为环境因子是影响啮齿动物种群波动的重要原因^[2],而何种环境因子对啮齿动物种群特征产生主要影响,目前仍存在争论。武晓东等^[43]发现降水和温度对子午沙鼠种群动态具有显著影响,包俊江等^[33]对6种啮齿动物种群数量与降水量的关系进行研究后发现,各鼠种与年降水量的相关性存在差异,但群落中总的啮齿动物种群数量与

年降水量呈显著正相关,徐金会等^[44]研究认为温度可能通过诱导鼠类能量代谢及行为活动使啮齿动物季节性繁殖和种群数量发生变化。本研究发现,降雨对高原鼯鼠种群特征的影响具有季节性,春季降雨与高原鼯鼠种群数量有很大影响,而秋季降雨对其影响则较小。楚彬等^[45]认为土壤含水量是影响高原鼯鼠栖息地选择的重要因素,春季降雨一方面改变了高原鼯鼠栖息地土壤湿度,另一方面春季降雨促进了植物生长,使高原鼯鼠食物资源有了及时的补充,更有利于高原鼯鼠生活。而高寒草甸在春季过后降雨量逐渐增多,湿润度相对较高,秋季降雨量年际间的波动不足以使草地环境发生很大改变,因此对高原鼯鼠种群特征影响较小。另外,本研究结果显示,温度变化与春、秋两季高原鼯鼠种群动态也有较高的关联性。温度对啮齿动物种群数量变动的影响可能表现在两方面,其一,环境温度(尤其极端温度)的变化可干扰高原鼯鼠生活状态和繁殖策略^[2],进而使其种群特征发生波动;其二,温度会通过影响食物资源的可利用性间接引起高原鼯鼠种群变化。

栖息环境中食物资源是啮齿动物生存和繁殖的基础,食物资源的可利用性直接决定啮齿动物种群数量和分布区域^[46]。郭强等^[6]研究发现,丰富的食物资源可增加高原鼯鼠种群数量。本研究发现,春季杂类草生物量和高原鼯鼠种群特征有很高的关联度,而秋季植物因子对高原鼯鼠种群的影响较小。这是因为高原鼯鼠喜食杂类草植物根茎,春季植物开始返青,高原鼯鼠食物资源匮乏,杂类草生物量作为限制因子对高原鼯鼠种群特征的变动极其重要。而秋季高原鼯鼠食物资源丰富,植物因子年际间的变化较小,不足以引起高原鼯鼠对食物因子的响应,因此秋季植物因子对高原鼯鼠种群特征的影响较小。本研究虽发现气候和食物资源与高原鼯鼠种群特征关系密切,但也不能忽视其他因素的作用。如高原鼯鼠繁殖状况和年龄结构均会对种群数量产生直接影响,种群内胎仔数、怀孕率的增加可使雌鼠在繁殖中产生更多后代,导致种群数量增加^[47]。种群年龄结构能反映出该种群是增长型、稳定型还是衰退型。然而,调查高原鼯鼠繁殖状况和年龄结构需要对个体解剖后进行观察^[41],这种方法势必会对研究区内高原鼯鼠种群数量产生影响,从而影响本研究结果。因此,本研究未开展繁殖状况和年龄结构的调查。

4 结论

高原鼯鼠种群特征存在明显的年际和季节性波动,其中降雨、极端温度和杂类草生物量与高原鼯鼠春季种群数量关联程度较高,而秋季高原鼯鼠种群数量与环境因子关联程度较低。本研究结果不仅可为今后高原鼯鼠种群数量预测预报提供基础数据,也为适时防控高原鼯鼠危害提供参考。

参考文献(References):

- [1] 史雪威,张晋东,欧阳志云. 野生大熊猫种群数量调查方法研究进展. 生态学报, 2016, 36(23): 7528-7537.
- [2] 黄彬,卫万荣,张灵菲,张燕堃,徐吉伟,杨国荣,张卫国. 环境条件对啮齿动物种群的影响. 草业科学, 2013, 30(6): 949-953.
- [3] Chen L J, Wang G M, Wan X R, Liu W. Complex and nonlinear effects of weather and density on the demography of small herbivorous mammals. Basic and Applied Ecology, 2015, 16(2): 172-179.
- [4] Nater C R, van Benthem K J, Canale C I, Schradin C, Ozgul A. Density feedbacks mediate effects of environmental change on population dynamics of a semidesert rodent. Journal of Animal Ecology, 2018, 87(6): 1534-1546.
- [5] 王静,孙军平,徐涛,祁军,张远林,张学炎,孟秀祥. 甘肃兴隆山保护区野生马麝分布、数量特征及影响因素. 生态学报, 2020, 40(21): 7997-8004.
- [6] 郭强,王玉琴,鲍根生,王宏生. 气象因子对高原鼯鼠种群数量的影响. 草业学报, 2020, 29(8): 188-194.
- [7] 房继明. 啮齿动物的空间分布格局. 生态学杂志, 1994, 13(1): 39-44, 68.
- [8] 赵天飙. 大沙鼠种群空间分布格局、栖息地选择及种群动态的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2006.
- [9] 赵天飙,陶波尔,董希超,唐蒙昌. 啮齿动物种群数量调查方法及其评价. 中国媒介生物学及控制杂志, 2007, 18(4): 332-334.
- [10] Ingles L G. The ecology of the mountain pocket gopher, *thomomys Monticola*. Ecology, 1952, 33(1): 87-95.
- [11] 花立民,蔡新成. 高原鼯鼠(*Eospalax baileyi*)的生态学研究进展. 甘肃农业大学学报, 2021, 56(2): 1-10, 17.
- [12] Ye G H, Chu B, Tang Z S, Alongi F, Bao D, Hua R, Hua L M, Niu Y J. Disturbance of plateau zokor (*Eospalax baileyi*) mounds increase plant and soil macroinvertebrate richness by offering a diversified microenvironment. Ecological Engineering, 2022, 183: 106754.
- [13] Chu B, Ye G H, Yang S W, Zhou F F, Zhang F Y, Zhou J W, Hua L M. Effect of plateau zokor (*Myospalax fontanierii*) disturbance on plant community structure and soil properties in the eastern qinghai-tibet plateau, China. Rangeland Ecology & Management, 2020, 73(4): 520-530.

- [14] Eva J, Marta H, Ladislav C. Rodent food quality and its relation to crops and other environmental and population parameters in an agricultural landscape. *Science of the Total Environment*, 2016, 562: 164-169.
- [15] 张灵菲, 卫万荣, 石高宇, 张卫国. 高寒草甸植物群落结构对高原鼠兔种群密度的影响. *草业学报*, 2019, 28(3): 93-100.
- [16] 李欣海, 于家捷, 张鹏, 朴正吉, 肖治术. 应用红外相机监测结果估计小型啮齿类物种的种群密度. *生态学报*, 2016, 36(8): 2311-2318.
- [17] 李恩涛, 周全忠, 李跃辉, 余文芹. 瓮安县黑线姬鼠种群数量变化规律. *江西农业学报*, 2013, 25(10): 93-95.
- [18] 董维惠, 侯希贤, 杨玉平. 子午沙鼠种群数量动态分析. *中国媒介生物学及控制杂志*, 2005, 16(1): 23-25.
- [19] 李仲来, 刘天驰. 锡林郭勒草原布氏田鼠数量的周期性和啮齿动物群落的演替. *动物学研究*, 1999, 20(4): 284-287.
- [20] Turchin P, Batzli G O. Availability of food and the population dynamics of arvicoline rodents. *Ecology*, 2001, 82(6): 1521-1534.
- [21] 费蕾, 汪祖国, 姚瑶, 徐相明, 顾品强. 上海奉贤区农田鼠类种群数量变动以及气候和耕作因素的影响. *应用生态学报*, 2015, 26(2): 579-587.
- [22] 侯祥, 韩宁, 封托, 张博, 陈晓宁, 王京, 常罡. 气候因素对黑线姬鼠种群动态影响的非线性效应. *生态学报*, 2020, 40(14): 4836-4841.
- [23] Tian H Y, Yu P B, Cazelles B, Xu L, Tan H, Yang J, Huang S Q, Xu B, Cai J, Ma C F, Wei J, Li S, Qu J H, Laine M, Wang J J, Tong S L, Stenseth N C, Xu B. Interannual cycles of Hantaan virus outbreaks at the human-animal interface in Central China are controlled by temperature and rainfall. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2017, 114(30): 8041-8046.
- [24] 汪志刚, 董漾, 朱文, 如甲, 张永贵. 高原鼫鼠种群数量的季节变化. *四川草原*, 1994(3): 55-58.
- [25] 姬程鹏, 周建伟, 楚彬, 周睿, 王志鹏, 王婷, 田永亮, 周延山, 花立民. 祁连山东段高原鼫鼠暖季活动节律及其影响因素. *兽类学报*, 2018, 38(2): 201-210.
- [26] 楚彬, 马素洁, 周延山, 姬程鹏, 周建伟, 周睿, 田永亮, 花立民. 祁连山东段高原鼫鼠(*Eospalax baileyi*)土丘空间分布格局及其与环境因子的空间关联性. *生态学报*, 2018, 38(3): 964-974.
- [27] Niu Y J, Zhu H M. Plant diversity is closely related to the density of zokor mounds in three alpine rangelands on the Tibetan Plateau. *Peerj*, 2019, 7:6921-6943..
- [28] 孙儒泳, 王德华, 牛翠娟, 刘定震. 动物生态学原理. 北京: 北京师范大学出版社, 2019.
- [29] Hua L M, Ji W H, Zhou J W, Zuo S T. A live trap and trapping technique for subterranean zokors (Rodentia). *Mammalia*, 2015, 79(4): 487-490.
- [30] 楚彬, 花立民, 周延山, 姬程鹏, 周建伟. 被动式电子标签在监测高原鼫鼠种群生态变化中的应用. *草原与草坪*, 2016, 36(3): 7-11.
- [31] Chowdhury, A I. Assessment of intensity and distribution of aridity over Bangladesh using different climate indices with GIS. *Climat change*, 2018, 4(16): 743-749.
- [32] Jolly G M. Explicit estimates from capture-recapture data with both death and immigration-stochastic model. *Biometrika*, 1965, 52(1/2): 225-248.
- [33] 包俊江, 武晓东, 付和平, 张福顺, 李颖, 班晓瑞. 啮齿动物种群数量与年降水量的灰色关联度分析. *草业科学*, 2011, 28(4): 642-647.
- [34] 侯蒙京, 高金龙, 葛静, 李元春, 刘洁, 殷建鹏, 冯琦胜, 梁天刚. 青藏高原东部高寒沼泽湿地动态变化及其驱动因素研究. *草业学报*, 2020, 29(1): 13-27.
- [35] 张旭, 鲍毅新, 刘军, 沈良良, 章书声, 方平福. 千岛湖岛屿社鼠的种群数量动态特征. *生态学报*, 2013, 33(15): 4665-4673.
- [36] Desoky A S S. Fields studies on population density and seasonal distribution of rodent species in Newly-Reclaimed land, El-Kawamel city, Sohag Region, Egypt. *Academic Web Journal of Agricultural Research*, 2016, 1(1): 1-3.
- [37] 卫万荣. 高原鼠兔和高原鼫鼠种群消长规律及其与植被关系的研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2018.
- [38] 杨再学, 雷邦海, 金星, 郭永旺, 杨通武. 凯里市黑腹绒鼠种群数量变动规律. *中国农学通报*, 2013, 29(36): 378-381.
- [39] 张堰铭, 周文扬, 樊乃昌, 张道川. 高原鼫鼠种群生态学研究. *中国媒介生物学及控制杂志*, 1993, 4(5): 359-361.
- [40] 周延山, 楚彬, 马素洁, 刘丽, 姬程鹏, 花立民. 祁连山东段高原鼫鼠种群特征与环境因子的关系分析. *动物学杂志*, 2016, 51(5): 734-742.
- [41] 苏军虎, 彭然, 南志标, JiWei-Hong, 蔡卓山. 甘南草原高原鼫鼠年龄划分及其组成分析. *动物学杂志*, 2018, 53(1): 46-54.
- [42] 韩群花, 郭聪, 张美文. 密度制约效应对啮齿动物繁殖的影响. *生态学报*, 2013, 33(19): 5981-5989.
- [43] 武晓东, 袁帅, 付和平, 张晓东, 张福顺, 高全荣. 不同干扰下阿拉善荒漠啮齿动物优势种对气候变化的响应. *生态学报*, 2016, 36(6): 1765-1773.
- [44] 徐金会, 王硕, 薛慧良, 徐来祥. 温度对黑线仓鼠能量代谢及开场行为的影响. *动物学杂志*, 2014, 49(2): 154-161.
- [45] 楚彬, 花立民, 周延山, 刘丽, 李帅. 祁连山东段不同放牧强度下高原鼫鼠栖息地选择分析. *草业学报*, 2016, 25(1): 179-186.
- [46] 周建伟, 花立民, 左松涛, 苏军虎, 王巧玲. 高原鼫鼠栖息地的选择. *草业科学*, 2013, 30(4): 647-653.
- [47] 周延山, 花立民, 楚彬, 刘丽, 姬程鹏, 田永亮. 高原鼫鼠繁殖特性与其栖息草地质量的关系. *兽类学报*, 2017, 37(1): 87-96.