

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.01.016

引用格式:布仁其其格,叶国辉,陈国康,等.气候因子对五趾跳鼠体重和肌肉组织碳氮稳定同位素的影响[J].草地学报,2026,34(1):163—171

Burenqiqige, YE Guo-hui, CHEN Guo-kang, et al. Effects of Climatic Factors on Body Weight and Stable Carbon and Nitrogen Isotopes in Muscle Tissue of *Orientallactaga sibirica*[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(1):163—171

气候因子对五趾跳鼠体重和肌肉组织碳氮稳定同位素的影响

布仁其其格^{1,2,3}, 叶国辉^{1,2,3}, 陈国康^{1,2,3}, 孙珊珊^{1,2,3}, 李鑫^{1,2,3},
杨文蕾⁴, 付和平^{1,2,3*}, 袁帅^{1,2,3*}

(1. 内蒙古农业大学草业学院, 内蒙古呼和浩特 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, 内蒙古呼和浩特 010011; 3. 内蒙古农业大学草地资源教育部重点实验室, 内蒙古呼和浩特 010011;
4. 鄂托克前旗敖勒召其镇人民政府, 内蒙古鄂尔多斯 016100)

摘要:水、热和食物资源对于干旱生态系统中的动物生存至关重要,但同一物种在较大空间尺度上对上述因子的响应过程尚不明确。五趾跳鼠(*Orientallactaga sibirica*)作为干旱区广泛分布的啮齿动物,其生存状况能敏感地反映气候变化和生境资源变化。研究环境变化对五趾跳鼠体型的影响,对于揭示小型哺乳动物的环境适应性具有重要意义。本研究于2019年6—8月,在五趾跳鼠主要分布区,以网捕法采集样本,称量体重,测定肌肉组织 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值,探究年均温、年降水量和归一化植被指数(Normalized difference vegetation index, NDVI)对这些指标的影响。结果表明:随年均温上升,五趾跳鼠体重极显著降低($P<0.01$);年降水量与肌肉组织的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 呈极显著负相关($P<0.01$)。分段结构方程模型分析显示,年降水量通过NDVI和 $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ 对五趾跳鼠体重具有显著负向影响($P<0.05$)。可见,五趾跳鼠体重及摄食随栖息地变化而进行适应性调整。

关键词:五趾跳鼠;稳定同位素;年均温度;年降水量;NDVI指数

中图分类号:S812.6

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)01-0163-09

Effects of Climatic Factors on Body Weight and Stable Carbon and Nitrogen Isotopes in Muscle Tissue of *Orientallactaga sibirica*

Burenqiqige^{1,2,3}, YE Guo-hui^{1,2,3}, CHEN Guo-kang^{1,2,3}, SUN Shan-Shan^{1,2,3}, LI Xin^{1,2,3},
YANG Wen-lei⁴, FU He-ping^{1,2,3*}, YUAN Shuai^{1,2,3*}

(1. College of Grassland, Resources and Environment, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010011, China; 2. Key Laboratory of Grassland Rodent Ecology and Rodent Pest Control at Universities of Inner Mongolia Autonomous, Hohhot, Inner Mongolia 010011, China; 3. Key Laboratory of Grassland Resources, Ministry of Education, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010011, China; 4. Aolezhaoqi Town People's Government of Otog Front Banner, Ordos, Inner Mongolia 016100, China)

Abstract: Rainfall, temperature, and habitat resources are essential for the survival of animals in arid ecosystems, but the responses of the same species to these factors on a larger spatial scale are not clear. *Orientallactaga sibirica* is a widely distributed rodent in arid areas, and its living conditions can sensitively reflect climate change and habitat resource changes. It is of great significance to reveal the environmental adaptability of small mammals by studying the effects of environmental changes on the body size of *O. sibirica*. In this study, from

收稿日期:2025-02-08;修回日期:2025-03-30

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 32060256, 32060395);内蒙古自治区科技重大专项(No. 2021ZD0006);内蒙古自治区科技计划项目(No. 2021GG0108);内蒙古自治区青年科技人才发展计划(No. NJYT22044);内蒙古自治区直属高校基本科研业务费(No. BR22-13-07, BR220106, BR221037);草原生态保护修复治理补助(RK2300002632)资助

作者简介:布仁其其格(1998-),女,蒙古族,内蒙古兴安盟人,硕士研究生,主要从事啮齿动物生态学与草地保护方面的研究, E-mail: qiqige19981130@163.com; *通信作者 Author for correspondence, E-mail: yuanshuai2020@163.com; fuheping@126.com

June to August 2019, samples were collected by net capture method in the main distribution area of the *O. sibirica*. The body weight was weighed, and the $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ values of muscle tissue were measured. The effects of annual average temperature, annual precipitation and normalized difference vegetation index (NDVI) on these indicators were explored. The results showed that the body weight of *O. sibirica* decreased significantly with the increase of annual average temperature ($P < 0.01$). The annual precipitation was significantly negatively correlated with the $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ of muscle tissue ($P < 0.01$). The segmented structural equation model analysis showed that the annual precipitation had a significant negative effect on the body weight of *O. sibirica* through NDVI and $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ ($P < 0.05$). Thus, the body weight and feeding habits of *O. sibirica* adaptively adjusted with habitat changes.

Key words: *Orientallactaga sibirica*; Stable isotope; Mean annual temperature; Annual precipitation; NDVI

全球气候变化背景下,频繁发生的极端气候事件严重威胁动物栖息环境及物种生存^[1-2]。动物可通过改变体型适应气候变化进而保证种群延续。体型作为生物关键表型特征,对其生理功能、生存能力、繁殖策略和种内竞争等具有重要影响^[3]。动物体型大小不仅与遗传基因相关,还受到气候、资源分布和食物链结构等因子的影响^[4],而气候因素是影响动物体型大小的关键因素之一^[5]。国内外学者对气候变化与动物体型发育之间的关系进行了深入探讨^[6-9]。这些研究认为温度和降水会影响物种生长发育速度、性成熟时间和体型大小^[10-11]。水热是干旱生态系统中动物生存的关键限制因子。降水的不均衡性不仅对动物产生直接影响,还可通过限制植被生长造成食物资源波动,进而对动物的生长和发育造成影响^[11-12]。而高温则会导致动物热应激反应,进而干扰其觅食和繁殖等行为活动^[13]。啮齿动物是陆地生态系统中的重要组分,能够对环境变化做出快速响应^[14]。一些学者虽然研究了气候变化对啮齿动物体型及动植物互作的影响^[9,15],但温度、降水及植被在较大空间尺度上对同种啮齿动物的协同作用尚不明确。

目前,稳定同位素技术在动物生态学研究中被广泛应用。动物组织同位素组成与其食物资源同位素组成相一致^[16-17],通过分析动物组织中的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 稳定同位素,即可推断环境中食物资源状况。而食物资源状况的改变与气候变化密切相关,气候变化会改变食物资源的丰度和可利用性,进而间接影响动物体型大小^[12]。

五趾跳鼠(*Orientallactaga sibirica*)是分布于中国北方地区体型最大的一种跳鼠,主要以植物为食^[18],栖息地类型包括荒漠化草原、沙漠、戈壁、湿润林地、石质山地和盐化灌丛^[19]。五趾跳鼠通过取食、挖掘和繁殖等行为,在生态系统的能量流动、物质循环及土壤养分循环等方面发挥着重要作用,这

些行为是对环境的一种适应性表现^[20-21]。因此,本研究以中国北方不同生境中的五趾跳鼠为研究对象,分析年均温度、年降水量和归一化植被指数(Normalized difference vegetation index, NDVI)变化对其体重及肌肉组织碳氮稳定同位素值的影响,旨在揭示气候因子在较大空间尺度上对五趾跳鼠体重的调节过程,为进一步理解干旱生态系统中物种对环境变化的响应机制提供一定科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

通过查阅相关文献^[21-23],选择河北省蔚县、内蒙古自治区东胜区和青海省果洛藏族自治州玛多县等12个地区进行五趾跳鼠取样(表1,图1)。

1.2 研究方法

1.2.1 动物样品采集 2019年6—8月,在五趾跳鼠分布区选择12个取样区,在每个取样区内各设置一个5 km×5 km的样地,采用网捕法(网孔尺寸为1 cm×1 cm、网口直径为60 cm、手柄长度为120 m的长柄扫网)对五趾跳鼠进行捕捉。每晚21:00—次日2:00,在采样区内以5 km·h⁻¹的速度沿S形路线驾车巡查。巡查时,利用灯光对五趾跳鼠的影响(五趾跳鼠受到强光照射后活动受限),当光线照射到捕捉目标时,迅速使用长柄扫网进行捕捉。每个采样区连续捕获4 d,共捕获112只五趾跳鼠,其中选取完整样本106只。记录性别和体重后,对捕获物实施安乐死,并从每个个体后腿部取10 g肌肉组织放入冻存管,液氮冷冻,带回实验室放入-80℃冰箱保存。根据体重将五趾跳鼠划分为3个年龄组,I龄组体重62~80 g(包括80 g),II龄组体重80~110 g(不包括80,但包括110 g),III龄组体重>110 g^[24]。

表 1 研究区自然环境特征

Table 1 Characteristics of natural environment in the study area

采样地 Sampling site	经纬度 Longitude & Latitude	气候类型 Climate type	年均温度 Mean annual temperature/℃	年降水量 Annual precipitation/mm	NDVI 指数	海拔 Altitude/ m
河北省蔚县 Yu county, Hebei Province(H4)	114°11'~115°04'E, 39°33'~40°12'N	温带大陆性季风气候 Temperate continental monsoon climate	6.6	364.8	0.462 502 986	498
内蒙古自治区东胜区 Dongsheng District of Inner Mongolia Autonomous Region(M27)	109°08'~110°23'E, 39°00'~39°58'N	温带大陆性气候 Temperate continental climate	5.2	433.8	0.371 975 005	1434
甘肃省环县 Huan County, Gansu Province(G10)	106°21'~107°44'E, 36°10'~37°00'N	干旱半干旱大陆性季风气候 Arid and semi-arid continental monsoon climate	9.2	446.0	0.248 535 007	1612
河北省围场县 Weichang County, Hebei Province(H6)	116°32'~118°14'E, 41°35'~42°40'N	温带大陆性季风气候 Temperate continental monsoon climate	3.6	412.9	0.666 499 972	1235
宁夏回族自治区西吉县 Xiji County, Ningxia Autonomous Region(N11)	105°20'~106°04'E, 35°35'~36°14'N	温带大陆性气候 Temperate continental climate	7.0	503.7	0.672 608 018	2598
内蒙古自治区二连浩特市 Erenhot City, Inner Mongolia Autonomous Region(M13)	111°17'~112°25'E, 42°55'~43°53'N	温带大陆性气候 Temperate continental climate	3.4	236.9	0.359 993 994	1087
新疆维吾尔自治区和布克赛尔蒙古自治县 Hoboksar Mongolian Autonomous County, Xinjiang Uygur Autonomous Region(W8)	84°37'~87°20'E, 45°20'~47°12'N	温带大陆性干旱气候 Temperate continental arid climate	3.0	302.6	0.121 165 000	1454
新疆维吾尔自治区额敏县 Emin County, Xinjiang Uygur Autonomous Region(W9)	83°24'~85°10'E, 46°09'~47°03'N	温带大陆性气候 Temperate continental climate	5.5	188.9	0.188 627 005	925
新疆阿勒泰地区 Xinjiang aletai prefecture(W5)	85°31'~91°04'E, 45°00'~49°10'N	温带大陆性寒冷气候 Temperate continental cold climate	6.5	162.5	0.122 437 000	495
青海省贵南县 Guinan County, Qinghai Province(Q2)	100°13'~101°33'E, 35°09'~36°08'N	高原大陆性气候 Highland continental climate	2.3	730.1	0.677 432 001	3738
青海省海南藏族自治州兴海县 Xinghai County, Hainan Tibetan Autonomous Prefecture, Qinghai Province(Q4)	99°01'~100°59'E, 34°48'~36°14'N	高原大陆性气候 Highland continental climate	0.4	466.4	0.576 174 974	3626
青海省果洛藏族自治州玛多县 Maduo County, Guoluo Tibetan Autonomous Prefecture, Qinghai Province(Q10)	96°50'~99°20'E, 33°50'~35°40'N	高寒草原气候 Alpine grassland climate	-4	407.1	0.369 437 993	4229

1.2.2 样品处理 将肌肉组织样品置于 65℃烘箱中烘干 24 h 至恒重,然后使用球磨仪(Retsch MM400)将样品粉碎后保存在干燥器中。为避免脂质对实验结果的潜在影响,首先对样品进行脱脂处理。具体步骤如下:

将样品置于 50 mL 圆底离心管中,加入甲醇和氯仿 2:1 的混合溶液,浸泡 12 h 后放入高速离心机(德国哈默 Z323K,4000 r·min⁻¹)离心 10 min。离心后去除上清液,用去离子水清洗样品,并浸泡 30 min^[25-26]。将样品再次置于相同的脱脂混合液中浸泡 12 min 后,使用去离子水进行清洗。完成脱脂处理后,将样品在 65℃下干燥 24 h 后,称量 1.90~2.10 mg 用锡杯(4 mm×6 mm)包装,进行碳、氮稳定同位素分析。

1.2.3 稳定同位素分析 采用 IsoPrime 100 稳定同位素质谱仪(英国)与 vario ISOTOPE cube 元素分析仪(德国)对样品的稳定碳、氮同位素比值进行测定。稳定同位素比值($\delta\text{‰}$)的计算公式如下^[27-28]:

$$\delta\text{‰} = \left(\frac{R_{\text{sample}}}{R_{\text{standard}}} - 1 \right) \times 1000$$

式中: R 表示样品与标准物质中重同位素与轻

同位素的丰度比值,包括 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$, $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ 。 $\delta^{13}\text{C}$ 的参考标准物质为 V-PDB(Vienna Pee Dee Belemnite), $\delta^{15}\text{N}$ 的参考标准物质为空气。

1.2.4 栖息地环境数据来源 栖息地环境数据包括年降水量、年均温度及 NDVI 等多项数据。年降水量和年均温度数据来源于国家气象科学数据中心(<http://data.cma.cn/>);NDVI 数据来源于中国科学院资源环境中心数据库(<https://www.Resdc.cn/>),NDVI 指数未按生长季划分,其时间范围为 2019 年 1—12 月,空间分辨率为 30 m,空间范围根据取样点经纬度确定。

1.3 数据处理

利用 ArcGis 将年均温度、年降水量和归一化植被指数(NDVI)数据可视化。使用 Origin 2021 软件,对年均温度、年降水量与 NDVI 指数之间进行线性回归分析并制图。使用广义线性混合效应模型(Generalized linear mixed model, GLMM)(R. 4.3.2 版本 glmmTMB 软件包中的“nbinom2”功能)分析五趾跳鼠体重和肌肉组织碳、氮稳定同位素值的影响因素^[29]。将五趾跳鼠体重和碳、氮稳定同位素值

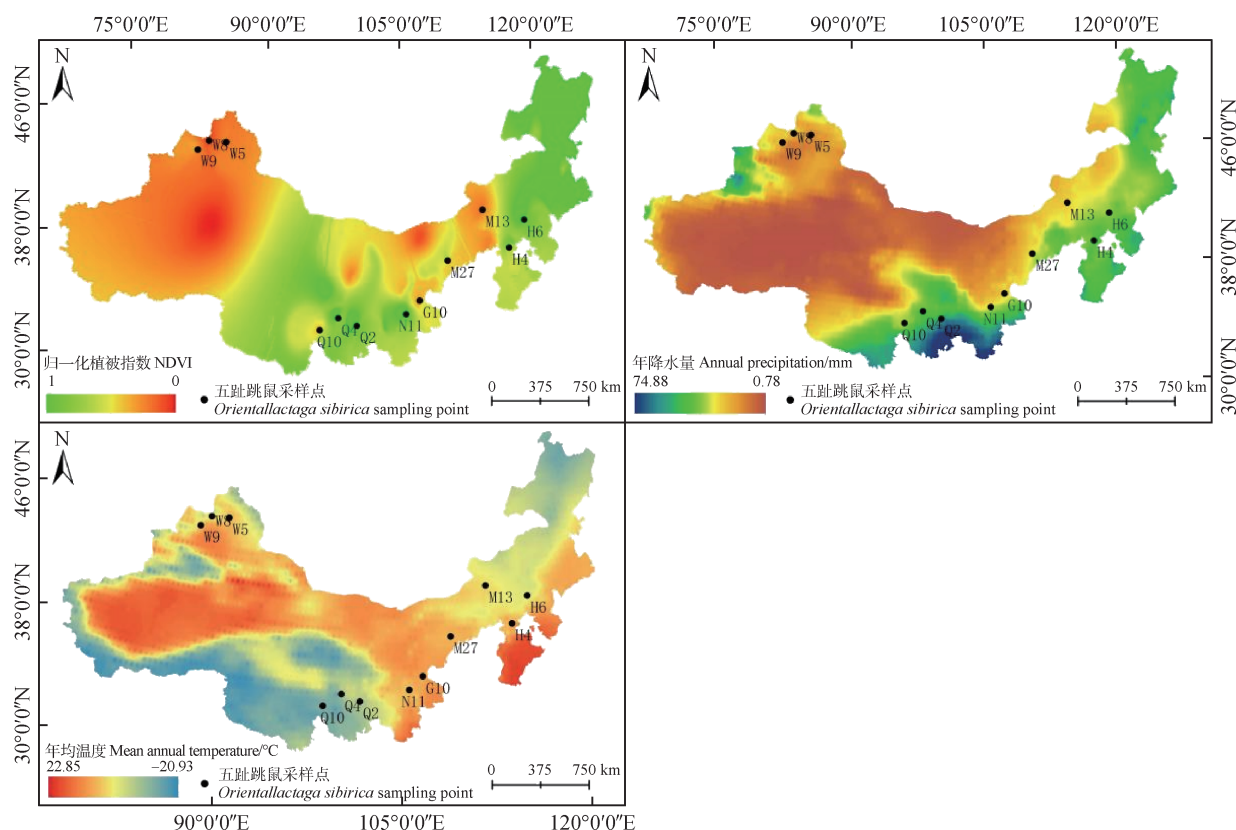


图 1 研究区概况图

Fig. 1 Summary map of study area

注:该图由自然资源部标准地图服务网站下载,审图号为GS(2019)1822号标准地图制作,底图无修改。N11为宁夏回族自治区西吉县,G10为甘肃省环县,H4为河北省蔚县,H6为河北省围场县,M13为内蒙古自治区二连浩特市,M27为内蒙古自治区东胜区,W5为新疆阿勒泰地区,W8为新疆维吾尔自治区和布克赛尔蒙古自治县,W9为新疆维吾尔自治区额敏县,Q2为青海省贵南县,Q4为青海省海南藏族自治州兴海县,Q10为青海省果洛藏族自治州玛多县

Note: The map is downloaded from the standard map service website of the Ministry of Natural Resources. The map approval number is GS (2019) 1822 standard map, and the base map is not modified. N11 represents Xiji County, Ningxia Autonomous Region, G10 represents Huan County, Gansu Province, H4 represents Yu County, Hebei Province, H6 represents Weichang County, Hebei Province, M13 represents Erenhot City, Inner Mongolia Autonomous Region, M27 represents Dongsheng District of Inner Mongolia Autonomous Region, W5 represents xinjiang aletai prefecture, W8 represents Hoboksar, Mongolian Autonomous County, Xinjiang Uygur Autonomous Region, W9 represents Emin County, Xinjiang Uygur Autonomous Region, Q2 represents Guinan County, Qinghai Province, Q4 represents Xinghai County, Hainan Tibetan Autonomous Prefecture, Qinghai Province, Q10 represents Maduo County, Guoluo Tibetan Autonomous Prefecture, Qinghai Province

作为因变量,以年均温度、年降水量和NDVI指数作为自变量,将年均温度、年降水量和NDVI指数设定为固定效应,年龄和性别设定为随机效应,对固定效应方差膨胀因子(Variance inflation factor, VIF)进行评估,检测多重共线性,删除VIF值大于10的因子(R. 4. 3. 2版本car软件包中的“vif”功能)^[30]。将年均温度、年降水量和NDVI指数作为固定效应,年龄和性别作为随机效应分析对五趾跳鼠体重的影响,以Akaike的信息标准比较拟合的模型。利用R 4. 3. 2软件中Piecewise SEM包构建分段结构方程模型(Piecewise structural equation modeling,

PSEM),以赤池信息量准则(Akaike information criterion, AIC)进行模型拟合比较。

2 结果与分析

2.1 五趾跳鼠分布区年降水量和年均温度对植被的影响

线性回归分析表明,五趾跳鼠分布区的NDVI指数与年降水量呈极显著正相关关系($R^2=0.55$, $P<0.01$)(图2a);年均温度与NDVI指数无显著相关性($R^2=0.02$, $P>0.05$)(图2b)。

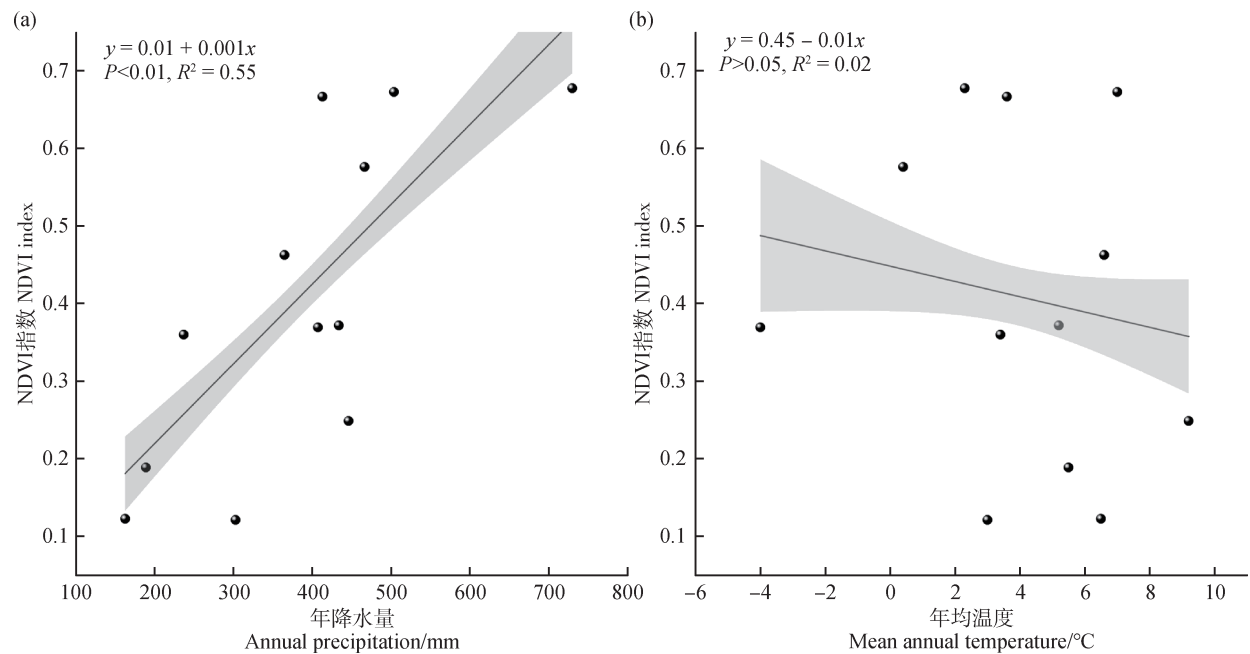


图 2 五趾跳鼠分布区年降水量和年均温度对 NDVI 指数的影响

Fig. 2 The impact of annual precipitation and mean annual temperature in the distribution area of *Orientallactaga sibirica* on NDVI index

2.2 年均温度、年降水量和植被对五趾跳鼠体重的影响

广义线性混合效应模型(GLMM)分析结果表明,

年均温度对五趾跳鼠体重具有极显著负向影响($P<0.01$),NDVI 指数对体重具有显著正向影响($P<0.05$),而年降水量对五趾跳鼠体重无显著影响(表 2)。

表 2 五趾跳鼠体重影响因子的广义线性混合模型

Table 2 Generalized linear mixed model of influencing factors for body weight of *Orientallactaga sibirica*

响应变量 Response variable	固定效应 Fixed effect	估计值±标准误 Estimate±S.E.	z 值 z value	P 值 P value
截距 Intercept	—	4.58±0.09	45.28	<0.001***
体重 Body weight	年均温度 Mean annual temperature/°C	−0.04±0.01	−2.92	<0.01**
	年降水量 Annual precipitation/mm	−0.01±0.01	−0.19	0.842
	NDVI 指数 NDVI index	0.03±0.02	2.01	<0.05*

注:五趾跳鼠年龄和性别作为随机效应。模型结果使用最低的 AIC 检验进行选择。***表示 $P<0.001$,**表示 $P<0.01$,*表示 $P<0.05$ 。下同

Note: Age and gender of *Orientallactaga sibirica* were used as random effects. The model results were selected using the lowest AIC test. *** represents $P<0.001$, ** represents $P<0.01$, * represents $P<0.05$. The same as below

2.3 年均温度、年降水量和植被对五趾跳鼠肌肉组织碳氮稳定同位素的影响

广义线性混合效应模型分析结果显示,年降水量对五趾跳鼠肌肉组织中的 $\delta^{13}\text{C}$ 具有极显著的负向影响($P<0.01$),年均温度和 NDVI 指数对 $\delta^{13}\text{C}$ 则不存在显著影响(表 3)。年降水量对五趾跳鼠肌肉组织中的 $\delta^{15}\text{N}$ 产生极显著负向影响($P<0.01$),年均温度对 $\delta^{15}\text{N}$ 不存在显著影响。NDVI 指数对肌肉组织中的 $\delta^{15}\text{N}$ 产生显著的负向影响($P<0.05$)(表 3)。

2.4 环境因子对五趾跳鼠体重的影响途径

分段结构方程模型分析结果表明,气候因子

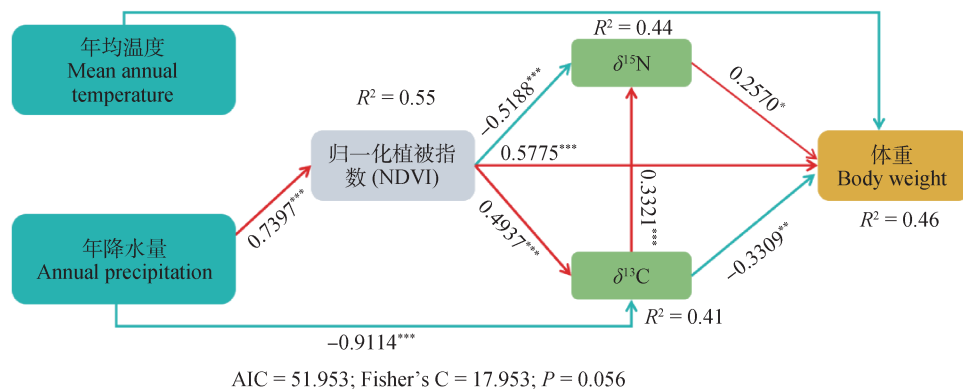
(年均温度、年降水量)和 NDVI 指数对五趾跳鼠体重具有显著影响。其中年降水量对 NDVI 指数影响解释力为 55%,年降水量和 NDVI 指数对肌肉组织中 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 的影响解释力分别为 41% 和 44%,对体重的影响解释力为 46%(图 3a)。年均温度对五趾跳鼠体重具有极显著的负向影响($P<0.001$),年降水量通过 NDVI 指数和 $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ 对五趾跳鼠体重产生的总间接效应为极显著正向影响,总效应为极显著正向影响($P<0.01$)。NDVI 指数通过 $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ 对五趾跳鼠体重产生的直接效应和总效应为显著的正向影响($P<0.001$),总间接效应则为显著的负向影响($P<0.05$)(图 3a-b)。

表 3 五趾跳鼠碳氮稳定同位素影响因子的广义线性混合模型

Table 3 Generalized linear mixed model of influencing factors of carbon and nitrogen stable isotopes in *Orientallactaga sibirica*

响应变量 Response variable	固定效应 Fixed effect	估计值±标准误 Estimate±S.E.	z 值 z value	P 值 P value
截距 Intercept	—	-18.05±0.96	-18.75	<0.001***
$\delta^{13}\text{C}$ 值	年均温度 Mean annual temperature /°C	-0.15±0.09	-1.59	0.113
	年降水量 Annual precipitation/mm	-0.01±0.01	-2.84	<0.01**
	NDVI 指数	-3.39±1.75	-1.93	0.053
截距 Intercept	—	11.44±0.77	14.80	<0.001***
$\delta^{15}\text{N}$ 值	年均温度 Mean annual temperature /°C	-0.13±0.08	-1.69	0.091
	年降水量 Annual precipitation/mm	-0.01±0.00	-2.91	<0.01**
	NDVI 指数	-3.40±1.41	-2.42	<0.05*

(a)



(b)

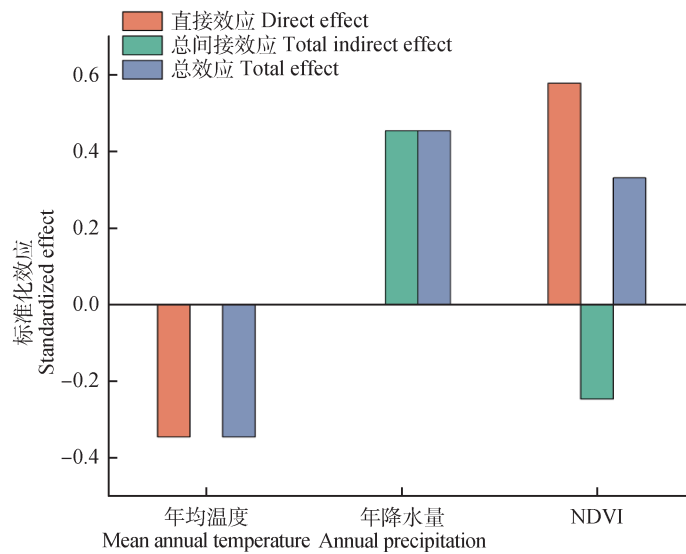


图 3 气候植被因子对五趾跳鼠体重的影响途径

Fig. 3 The influence of climatic vegetation factors on the body weight of *Orientallactaga sibirica*

注:(a)年均温度、年降水量和NDVI指数对五趾跳鼠体重的影响途径(b)年均温度、年降水量和NDVI指数对五趾跳鼠体重的影响效应值红色和蓝色实线分别表示显著正相关和负相关关系($P<0.05$)。 R^2 表示模型解释的方差。线条上方数字表示路径系数。线条粗细表示相关性大小。***表示 $P<0.001$, **表示 $P<0.01$, *表示 $P<0.05$

Note: (a) The pathways through which annual mean temperature, annual precipitation, and NDVI index affect the weight of the *Orientallactaga sibirica* (b) The effect values of annual mean temperature, annual precipitation, and NDVI index on the weight of the *Orientallactaga sibirica*. The red and blue solid lines indicated a significant positive correlation and a negative correlation, respectively ($P<0.05$). R^2 represents the variance explained by the model. The number above the line represents the path coefficient. The thickness of the line indicates the size of the correlation. *** represents $P<0.001$, ** represents $P<0.01$, * represents $P<0.05$

3 讨论

气候作为关键的环境变量会影响生物体代谢过程中同位素效应,导致不同同位素比率变化^[31]。这种效应在动物呼吸、排泄和同化作用中都可能发生^[32]。本研究发现,五趾跳鼠肌肉组织中的 $\delta^{13}\text{C}$ 值与年降水量间存在极显著负相关关系,这与食物资源有关。相关研究指出, C_3 植物的碳稳定同位素值($\delta^{13}\text{C}$)通常比 C_4 植物低^[33]。 C_4 植物适应于高温环境,而 C_3 植物则更倾向于在低温、湿润的环境中生长^[34]。因而年降水量的增加促进 C_3 植物的生长^[35],为五趾跳鼠提供更多 C_3 植物食物源,而摄食较多 C_3 植物导致肌肉组织中 $\delta^{13}\text{C}$ 值减小。因此,年降水量增加时五趾跳鼠体内的 $\delta^{13}\text{C}$ 值下降。但NDVI指数与五趾跳鼠肌肉组织中的 $\delta^{13}\text{C}$ 值间呈正相关关系。这一结果与Uno等人^[36]的研究结论相一致,他发现NDVI指数与大象牙齿和尾部毛发中的 $\delta^{13}\text{C}$ 值存在相关关系。这是由于随着NDVI指数升高,植被生长更加茂盛,大象饮食中 C_4 植被比例增加,导致象牙中的 $\delta^{13}\text{C}$ 和尾部毛发中的 $\delta^{13}\text{C}$ 值上升^[36]。与 $\delta^{13}\text{C}$ 值相反,年降水量通过NDVI指数对五趾跳鼠肌肉组织中的 $\delta^{15}\text{N}$ 值具有显著的负向影响。因为降水量的增加会降低土壤有效氮含量,并使植物叶片的 $\delta^{15}\text{N}$ 值减少^[37],当五趾跳鼠食用这些植物资源后,其肌肉组织中的 $\delta^{15}\text{N}$ 值也会随之下降。同时,如果食物链较短,五趾跳鼠营养级较低,则体内氮同位素值会降低^[38]。

动物饮食状况受栖息地气候条件制约,气候条件改变食物资源的丰度和可利用性,进而影响动物体重^[39-40]。五趾跳鼠以植物为主要食物,其食物资源在干旱生态系统中具有较为明显的波动性^[18]。相关研究发现,动物组织中的同位素组成与其食物资源同位素组成相一致^[14],通过分析动物组织中的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 稳定同位素,即可推断环境中食物资源状况,并且相关研究表明 $\delta^{15}\text{N}$ 富集与体重存在关联^[41]。五趾跳鼠肌肉组织中 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 稳定同位素分析发现,五趾跳鼠食物来源和营养级对其体重具有显著影响。五趾跳鼠肌肉组织中的 $\delta^{15}\text{N}$ 值与其体重呈正相关关系,这与兴凯鲈(*Dabryi shinkainensis*)的研究结论相一致,即体内 $\delta^{15}\text{N}$ 值与体重之间存在正相关关系^[42]。与 $\delta^{15}\text{N}$ 值相反, $\delta^{13}\text{C}$ 值与五趾跳鼠体重间呈负相关,这一结果与中华绒螯蟹(*Eriocheir sinensis*)食物源的研究结论相符,在该研究中,中华绒螯蟹肌肉组织中的 $\delta^{13}\text{C}$ 值与体重呈负相关关系^[43]。随着年降水量增加,NDVI指数呈上升趋势,而年降水

量通过NDVI指数和碳、氮稳定同位素对五趾跳鼠体重具有极显著的正向影响($P<0.01$),表明年降水量通过促进植被覆盖度和生物量^[44],增加了五趾跳鼠食物资源,进而有利于它们体型的增长。同时,NDVI指数直接对五趾跳鼠体重产生正效应,表明植被对五趾跳鼠体型的影响除食物途径外还存在其他途径。有研究表明植被覆盖度和生物量的增加,不仅可为五趾跳鼠提供丰富的食物资源,还可为其提供更好的栖息地,以减少天敌捕食压力,从而有利于其生长和体重增加^[45]。此外,随年均温度降低五趾跳鼠体重有增加趋势,这与贝格曼法则核心思想一致,该法则认为寒冷地区的恒温动物为提高保温效率,通常体型比温暖地区的动物偏大^[46-48]。

综合来看,在较大空间尺度上,年均温度、年降水量和植被等环境因子相互作用,共同对五趾跳鼠体型产生影响。年均温度和年降水量作为关键环境因子,通过改变植被情况进而影响食物丰度与质量,最终对五趾跳鼠体重产生显著影响,其联合解释力达到了46%。因此,气候因素对五趾跳鼠体型具有塑造作用。

4 结论

本研究通过野外调查取样结合稳定同位素技术,探究了五趾跳鼠体重及肌肉组织的碳、氮稳定同位素与年均温度、年降水量及NDVI指数之间的响应关系,揭示了动物体型与其食物获取策略会随环境变化而进行适应性变化。发现年降水量和年均温度通过NDVI指数和碳、氮稳定同位素来调控五趾跳鼠体重,其中,年降水量对五趾跳鼠体重呈显著的正向影响,年均温度对五趾跳鼠体重呈显著的负向影响。未来的研究可以进一步探讨这些因素的长期影响,以及气候-植物-动物之间的相互作用机制。

参考文献

- [1] UMMENHOFER C C, MEEHL G A. Extreme weather and climate events with ecological relevance: a review [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B, Biological Sciences, 2017, 372(1723): 20160135
- [2] COUMOU D, RAHMSTORF S. A decade of weather extremes [J]. Nature Climate Change, 2012, 2(7): 491-496
- [3] BLANCKENHORN W U. The evolution of body size: What keeps organisms small? [J]. The Quarterly Review of Biology, 2000, 75(4): 385-407
- [4] BARHAM K E, DWYER R G, FRERE C H, et al. Cooling down is as important as warming up for a large-bodied tropical reptile [J]. Proceedings Biological Sciences, 2024, 291(2034):

- 20241804
- [5] TEPLITSKY C, MILLIEN V. Climate warming and bergmann's rule through time: is there any evidence? [J]. *Evolutionary Applications*, 2014, 7(1):156-168
- [6] COURTALON P, BUSCH M. Community structure and diversity of sigmodontine rodents (Muridae: Sigmodontinae) inhabiting maize and soybean fields in Pampean Agroecosystems, Argentina [J]. *Interciencia*, 2010, 35(11):812-817
- [7] 袁帅, 武晓东, 付和平, 等. 不同干扰下荒漠啮齿动物群落多样性的多尺度分析 [J]. *生态学报*, 2011, 31(7):1982-1992
YUAN S, WU X D, FU H P, et al. Multi-scales analysis on diversity of desert rodent communities under different disturbances [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(7):1982-1992
- [8] REYNOLDS S D, FRANKLIN C E, NORMAN B M, et al. Effects of climate warming on energetics and habitat of the world's largest marine ectotherm [J]. *Science of The Total Environment*, 2024, 951:175832
- [9] JIANG G S, LIU J, XU L, et al. Intra-and interspecific interactions and environmental factors determine spatial-temporal species assemblages of rodents in arid grasslands [J]. *Landscape Ecology*, 2015, 30(9):1643-1655
- [10] 房丽君, 关建玲. 蝴蝶对全球气候变化的响应及其研究进展 [J]. *环境昆虫学报*, 2010, 32(3):399-406, 311
FANG L J, GUAN J L. Progress in the studies of butterflies in responding to global climate change [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2010, 32(3):399-406, 311
- [11] 吴建国. 气候变化对陆地生物多样性影响研究的若干进展 [J]. *中国工程科学*, 2008, 10(7):60-68
WU J G. The Advances of the study on effects of climate change on the terrestrial biodiversity [J]. *Engineering Sciences*, 2008, 10(7):60-68
- [12] 李俊生, 宋延龄, 张晓岚. 甘肃河西小型哺乳动物物种多样性与水热分布的关系 [J]. *生态科学*, 2005, 24(4):330-335
LI J S, SONG Y L, ZHANG X L. Preliminary analyses on the relationship between the distributional patterns of the small mammals diversity and spatial distribution pattern of water-heat in Hexi region of Gansu Province, China [J]. *Ecologic Science*, 2005, 24(4):330-335
- [13] NARANJO-GÓMEZ J S, URIBE-GARCÍA H F, HERRERA-SÁNCHEZ M P, et al. Heat stress on cattle embryo: gene regulation and adaptation [J]. *Heliyon*, 2021, 7(3):e06570
- [14] 徐金会, 王硕, 薛慧良, 等. 温度对黑线仓鼠能量代谢及开场行为的影响 [J]. *动物学杂志*, 2014, 49(2):154-161
XU J H, WANG S, XUE H L, et al. Influence of temperature on the energy metabolism and open field behavior of *Cricetulus barabensis* [J]. *Chinese Journal of Zoology*, 2014, 49(2):154-161
- [15] JIANG G, ZHAO T, LIU J, et al. Effects of ENSO-linked climate and vegetation on population dynamics of sympatric rodent species in semiarid grasslands of Inner Mongolia, China [J]. *Canadian Journal of Zoology*, 2011, 89(8):678-691
- [16] BALASSE M, TRESSET A, AMBROSE S H. Stable isotope evidence ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$) for winter feeding on seaweed by Neolithic sheep of Scotland [J]. *Journal of Zoology*, 2006, 270(1):170-176
- [17] DENIRO M J, EPSTEIN S. Influence of diet on the distribution of carbon isotopes in animals [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1978, 42(5):495-506
- [18] 娜日苏, 苏和, 武晓东. 五趾跳鼠的植物性食物选择与其栖息地植被的关系 [J]. *草地学报*, 2009, 17(3):383-388
NA R S, SU H, WU X D. Botanic food preference of *Allactaga sibirica* forster and its relationship with the vegetation conditions of their habitat [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2009, 17(3):383-388
- [19] 孙珊珊, 杨可, 张昊婷, 等. 五趾跳鼠研究进展 [J]. *草原与草业*, 2022, 34(2):1-6
SUN S S, YANG K, ZHANG H T, et al. Research progress of *Allactaga sibirica* [J]. *Grassland and Prataculture*, 2022, 34(2):1-6
- [20] 祁爱民, 何生伟, 杜怡, 等. 鄂尔多斯荒漠草原五趾跳鼠空间分布特征 [J]. *中国媒介生物学及控制杂志*, 1997, 8(4):303-304
QI A M, HE S W, DU Y, et al. Spatial distribution characteristics of *Allactaga sibirica* in Ordos desert steppe [J]. *Chinese Journal of Vector Biology and Control*, 1997, 8(4):303-304
- [21] 蒋志刚, 马勇, 吴毅等. 中国哺乳动物多样性及地理分布 [M]. 北京: 科学出版社, 2015:354-355
JIANG Z G, MA Y, WU Y. Mammalian diversity and geographical distribution in China [M]. Beijing: Science Press, 2015:354-355
- [22] 赵肯堂. 中国的跳鼠 [J]. *铁道师院学报*, 1991, 8(S1):29-36
ZHAO K T. Chinese jerboa [J]. *Journal of University of Science and Technology of Suzhou (Social Science Edition)*, 1991, 8(S1):29-36
- [23] 陈钧, 王定国. 河西走廊啮齿动物地理分布的初步调查 [J]. *兽类学报*, 1985, 5(3):195-200
CHEN J, WANG D G. A preliminary survey on geographical distribution of the rodents in Hexi Corridor, Gansu province [J]. *Acta Theriologica Sinica*, 1985, 5(3):195-200
- [24] 杨素文, 张蓉, 袁帅, 等. 阿拉善荒漠区五趾跳鼠不同年龄组体重与体尺特征的关系模型 [J]. *动物学杂志*, 2018, 53(6):833-840
YANG S W, ZHANG R, YUAN S, et al. The age groups sectionalization of five-toed jerboa (*Allactaga sibirica*) by relational model between weight and body characteristics [J]. *Chinese Journal of Zoology*, 2018, 53(6):833-840
- [25] WILLSON J D, WINNE C T, PILGRIM M A, et al. Seasonal variation in terrestrial resource subsidies influences trophic niche width and overlap in two aquatic snake species: a stable isotope approach [J]. *Oikos*, 2010, 119(7):1161-1171
- [26] MUÑOZ-ARNANZ J, CORTÉS-AVIZANDA A, DONÁZAR-ARAMENDÍA I, et al. Levels of persistent organic pollutants (POPs) and the role of anthropic subsidies in the diet of avian scavengers tracked by stable isotopes [J]. *Environmental Pollution*, 2024, 343:123188
- [27] DE SMET S, BALCAEN A, CLAEYS E, et al. Stable carbon isotope analysis of different tissues of beef animals in relation to their diet [J]. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 2004, 18(11):1227-1232

- [28] 陈国康,袁帅,付和平,等. 阿拉善荒漠区两种优势跳鼠种间营养生态位[J]. 生态学报,2023,43(17):7193-7202
CHEN G K, YUAN S, FU H P, et al. Interspecific trophic niches of two dominant jerboas in the Alax Desert [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(17): 7193-7202
- [29] FANTOZZI M C, SANCHEZ J P, LARESCHI M, et al. Effects of host factors on the dynamics of fleas (Siphonaptera) in Sigmodontinae Rodents (Cricetidae) from El Espinal Ecoregion, Argentina [J]. Acta Tropica, 2022, 225: 106177
- [30] CHEN H Y, GUO R, HUNG C C, et al. Behavioral intentions of bank employees to implement green finance [J]. Sustainability, 2023, 15(15): 11717
- [31] 彭凯秀,刘欢,刘鸽,等. 稳定同位素技术在动植物源食品溯源中的应用研究[J]. 食品工业科技, 2021, 42(8): 338-345
PENG K X, LIU H, LIU G, et al. Application and Research Progress of Stable Isotope Technology in Animal and Plant Food Traceability [J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(8): 338-345
- [32] 王万洁,侯兴旺,刘穆燕,等. 传统稳定同位素技术在环境科学领域的应用及研究进展[J]. 环境化学, 2021, 40(12): 3640-3650
WANG W J, HOU X W, LIU J Y, et al. Application and research progress of traditional stable isotope technology in environmental science [J]. Environmental Chemistry, 2021, 40(12): 3640-3650
- [33] ELEY Y, DAWSON L, PEDENTCHOUK N. Investigating the carbon isotope composition and leaf wax n-alkane concentration of C_3 and C_4 plants in Stiffkey saltmarsh, Norfolk, UK [J]. Organic Geochemistry, 2016, 96: 28-42
- [34] 殷立娟,李美荣. 中国 C_4 植物的地理分布与生态学研究 I. 中国 C_4 植物及其与气候环境的关系[J]. 生态学报, 1997(4): 16-29
YIN L J, LI M R. A study on the geographic distribution and ecology of c_4 plants in china. C_4 plant distribution in china and their relation with regional climatic condition [J]. Acta Ecologica Sinica, 1997(4): 16-29
- [35] 马静,单立山,王珊,等. 不同降水量条件下 C_3 植物红砂— C_4 植物珍珠混生光合特性研究[J]. 草地学报, 2019, 27(4): 921-927
MA J, SHAN L S, WANG S, et al. Studies on photosynthetic characteristics of C_3 plant Reaumuria soongarica and C_4 plant Salsola passerina in a mixed community under different precipitations [J]. Acta Agrestia Sinica, 2019, 27(4): 921-927
- [36] UNO K T, FISHER D C, SCHUSTER G, et al. High-resolution stable isotope profiles of modern elephant (*Loxodonta africana*) tusk dentin and tail hair from Kenya: Implications for identifying seasonal variability in climate, ecology, and diet in ancient proboscideans [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2020, 559: 109962
- [37] 吕广一,贺梦婷,徐学宝,等. 增温、增雨对荒漠草原植物和土壤总氮及稳定氮同位素的影响[J]. 生态学报, 2023, 43(10): 4167-4175
LÜ G Y, HE M T, XU X B, et al. Effects of warming and increasing precipitation on total nitrogen and stable nitrogen isotopes of plants and soil in the desert steppe [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(10): 4167-4175
- [38] KLOSKOWSKI J, TREMBACZOWSKI A, FILIPIUK M. Higher reproductive performance of a piscivorous avian predator feeding on lower trophic-level diets on ponds with shorter food chains [J]. Journal of Ornithology, 2021, 162(4): 1049-1062
- [39] CATON S, BAI Y, BURGET L, et al. Short term effects of a ketogenic diet on body weight, energy expenditure and exercise capacity in rodents [J]. Experimental and Clinical Endocrinology & Diabetes, 2007, 115(S 1): OR06_4
- [40] RAVUSSIN Y. You are what you eat? Rodent study suggests defended body weight mainly dictated by fat content of diet [J]. Obesity, 2023, 31(4): 896-897
- [41] BUBADUÉ J, CÁCERES N, MELO G, et al. Niche partitioning in small mammals: interspecific and biome-level analyses using stable isotopes [J]. Journal of Mammalogy, 2021, 102(5): 1235-1248
- [42] 袁宇翔. 基于C、N稳定同位素技术的兴凯湖食物网结构研究[D]. 北京:中国科学院大学, 2018, 93-94
YUAN Y X. Using stable Carbon and Nitrogen isotopes to study the food web structure of lake xingkai in China [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2018, 93-94
- [43] 苗静,刘峰,闫法军,等. 基于稳定同位素的黄河三角洲盐碱地稻蟹种养系统中华绒螯蟹食物源分析[J]. 应用生态学报, 2022, 33(6): 1489-1496
MIAO J, LIU F, YAN F J, et al. Analysis of food sources of Eriocheir sinensis in rice-crab integrated ecosystem based on stable isotopes in saline-alkali land of the Yellow River Delta [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(6): 1489-1496
- [44] 杨梅焕,赵澄澄,王涛,等. 黄土高原极端降水变化及其对植被覆盖度影响[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(8): 3086-3095
YANG M H, ZHAO Y Y, WANG T, et al. Extreme precipitation changes and its effects on fractional vegetation cover in the Loess Plateau [J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(8): 3086-3095
- [45] 金苗,姚志诚,石锐,等. 贺兰山西坡啮齿动物生境选择及种间关系[J]. 生态学报, 2022, 42(18): 7676-7684
JIN M, YAO Z C, SHI R, et al. Habitat selection and interspecific relationship of rodent in the west slope of Helan Mountain [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(18): 7676-7684
- [46] LEVIN R N, CORREA S M, FREUND K A, et al. Latitudinal and elevational variation in the reproductive biology of house wrens, Troglodytes aedon [J]. Ecology and Evolution, 2023, 13(9): e10476
- [47] GIGLIOTTI L C, BERG N D, BOONSTRA R, et al. Latitudinal variation in snowshoe hare (*Lepus americanus*) body mass: a test of Bergmann's rule [J]. Canadian Journal of Zoology, 2020, 98(2): 88-95
- [48] DE QUEIROZ A, ASHTON K G. The phylogeny of a species-level tendency: species heritability and possible deep origins of Bergmann's rule in tetrapods [J]. Evolution; International Journal of Organic Evolution, 2004, 58(8): 1674-1684