DOI: 10.20103/j.stxb.202303240569

赵璐瑶,吴永波,查晶晶,魏逸荪,安玉亭,王立波.不同月份麋鹿食源植物 $\delta^{13}C$ 和 $\delta^{15}N$ 及其贡献率分析.生态学报,2025,45(5):2494-2504.

Zhao L Y, Wu Y B, Zha J J, WEI Y S, An Y T, Wang L B.Analysis of the $\delta^{13}C$ and $\delta^{15}N$ values and their contribution rates in dietary plants of *Elaphurus davidianus* in different months.Acta Ecologica Sinica,2025,45(5):2494-2504.

不同月份麋鹿食源植物 $\delta^{13}C$ 和 $\delta^{15}N$ 及其贡献率分析

赵璐瑶[1,2],吴永波[1,2,*],查晶晶[1,2],魏逸荪[1,2],安玉亭[3,4],王立波[3]

1 南京林业大学生态与环境学院,南京 210037

2 江苏省南方现代林业协同创新中心,南京 210037

3 江苏大丰麋鹿国家级自然保护区,盐城 224136

4 江苏盐城湿地珍禽国家级自然保护区,盐城 224333

摘要:食源分析是麋鹿保护中研究麋鹿栖息地需求的核心,也是了解麋鹿与环境之间的相互关系、判断环境容量以及进行资源管理的前提和基础。选取保护区第一核心区和第三核心区为研究区域,分别于 2019 年 5 月、7 月、10 月和 12 月进行野外调查,收集麋鹿食源植物样本及粪便样本,运用碳氮稳定同位素技术分别对不同月份互花米草、碱蓬、白茅、狼尾草、狗牙根和糙叶薹草 6 种食源植物及麋鹿粪便进行测定并进行相关性分析,应用贝叶斯模型分析不同植物对麋鹿食源的贡献率,分析不同季节麋鹿食性变化。研究发现,食源植物的种类、数量及营养价值均影响麋鹿取食行为。结果显示,5 月、7 月、10 月和 12 月对麋鹿食源贡献率最高的植物分别为互花米草、狗牙根、互花米草和互花米草,贡献率分别为 39.0%、42.8%、47.9%和 31.9%。5 月、7 月、10 月和 12 月,狗牙根和互花米草对麋鹿食源的贡献存在显著变化,表明麋鹿对食源植物的选择存在季节差异。C_3 植物和 C_4 植物在不同月份对麋鹿的贡献率存在差异。在不同季节,麋鹿粪便的 $\delta^{13}C$ 值与食源植物的 $\delta^{13}C$ 值显示出一定变化趋势,保护区内麋鹿混食 C_3 和 C_4 植物,尽管 C_4 植物占比大于 C_3 植物,但不能确定麋鹿更喜爱 C_4 植物;互花米草对第三核心区麋鹿食源的贡献率较高,狼尾草对麋鹿食源的贡献率较低,表明麋鹿在选择食物时偏好营养价值高的植物;不同月份麋鹿粪便的 $\delta^{13}C$ 和 $\delta^{15}N$ 值变化表明,不同季节麋鹿的食物组成不同,以满足其营养需求。了解麋鹿食性变化不仅为今后制定有效管理和保护策略提供科学支持,也为麋鹿保护区的管理与生境恢复提供理论依据。

关键词:麋鹿;食源分析;稳定性同位素技术;互花米草

Analysis of the $\delta^{13}C$ and $\delta^{15}N$ values and their contribution rates in dietary plants of *Elaphurus davidianus* in different months

ZHAO Luyao[1,2], WU Yongbo[1,2,*], ZHA Jingjing[1,2], WEI Yisun[1,2], AN Yuting[3,4], WANG Libo[3]

1 *College of Ecology and Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing* 210037, *China*

2 *Co-Innovation Center of the Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing* 210037, *China*

3 *Dafeng Milu National Nature Preserves Jiangsu China, Yancheng* 224136, *China*

4 *Jiangsu Yancheng Wetland National Nature Reserve, Rare Birds, Yancheng* 224333, *China*

Abstract: Food source analysis is the foundation of the research of *Elaphurus davidianus* habitat demands in *Elaphurus davidianus* conservation, and it is necessary and essential to comprehend the interaction of *Elaphurus davidianus* and their abiotic environment, carrying capacity evaluation, and manage resource management. The study selected the first and third core areas of the protection zone as the research areas, conducting field surveys in May, July, October, and December 2019 respectively. Samples of *Elaphurus davidianus'* edible plants and feces were collected, and using the carbon and nitrogen stable isotope technique, six edible plants were quantified: mutualistic *Spartina alterniflora*, *Suaeda glauca*, *Imperata*

基金项目:江苏省碳达峰碳中和科技创新专项(BE2022306);国家“十三五”重点研发计划(2016YFC0502704)

收稿日期:2023-03-24; **网络出版日期**:2024-11-28

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: yongbowu0920@163.com

cylindrica, *Pennisetum alopecuroides*, *Cynodondactylon*, *Carex scabrifolia* and deer excrements, and the correlation between food sources and the excrements were analyzed. The Bayesian model was also used to determine the proportional contributions of these plants to the diet of *Elaphurus davidianus*, as well as the variation of the feeding preference of *Elaphurus davidianus* in different seasons. The study found that the *Elaphurus davidianus* foraging behavior was affected by the type, quantity, and nutritional value of edible plants. The highest contributions to the *Elaphurus davidianus* food supply were discovered to come from *Spartina alterniflora*, *Cynodondactylon*, *Spartina alterniflora*, and *Spartina alterniflora* in the months of May, July, October, and December, with the contribution rates of 39.0%, 42.8%, 47.9%, and 31.9% respectively. The significant variation in the contribution of *Cynodondactylon* and *Spartina alterniflora* to the *Elaphurus davidianus'* diet in May, July, October, and December suggests that the *Elaphurus davidianus'* foraging preferences differed in different seasons. *Elaphurus davidianus* on the reserve were found to consume a mix of C_3 and C_4 plants; although the proportion of C_4plants was greater than that of C_3 plants, whether the *Elaphurus davidianus* preferred the C_4 plants cannot be determined. *Spartina alterniflora* was a significant food supply for *Elaphurus davidianus* in the third core area under conditions of supplemental feeding, while *Pennisetum alopecuroides* had a lower contribution rate, indicating that *Elaphurus davidianus* population prefer plants with higher nutritional value as their food. The variations in $\delta^{13}C$ and $\delta^{15}N$ values of deer feces in different months indicated that *Elaphurus davidianus* adjust their food components seasonally to meet their nutritional needs. Understanding the dietary dynamics of *Elaphurus davidianus* is not only crucial for data support for the development of effective management and protection strategies, but a scientific basis for the management of *Elaphurus davidianus* reserves and the restoration of their habitats.

Key Words: *Elaphurus davidianus*; diet analysis; stable isotope analysis; *Spartina alterniflora*

食物是动物与环境之间关系的纽带[1],植物营养价值受多种因素影响[2—3],植物种类、数量及营养价值影响动物取食[4—5]。食性分析可以反映动物对植物资源的利用情况及对营养物质的需求,为动物种群管理提供有价值的信息[6—8]。了解草食性动物食性偏好及取食季节变化对野生动物保护及管理具有重要意义。目前研究草食性动物食物组成的传统方法主要有直接观察法、胃容物分析法、粪便显微分析法以及 DNA 条形码分析法等[9—13],碳氮稳定同位素依据捕食者与食物间差异指示食物来源及营养层次[14—15],与传统食性研究方法相比,稳定同位素技术采样方法简单,准确度高。

麋鹿(*Elaphurus davidianus*)是国家Ⅰ级重点保护野生动物[16]。江苏大丰麋鹿自然保护区(以下简称保护区)的麋鹿数量从 1986 年初引进的 39 头发展到 2023 年的 7840 头[17],麋鹿长期集群阻碍保护区内食源植物生长,植物可食用量降低,严重影响麋鹿种群健康发展,维持麋鹿种群足量食源成为目前保护工作的重点[18]。麋鹿粪便分析能反映其食性[19],研究麋鹿粪便与植物 $\delta^{13}C$ 和 $\delta^{15}N$ 值可确定麋鹿食物组成。但目前关于不同季节麋鹿食源植物 $\delta^{13}C$ 和 $\delta^{15}N$ 及其贡献率分析仍缺少相关研究,本文通过分析保护区内麋鹿粪便及食源植物的稳定性同位素进而阐述不同食源植物对麋鹿的食源贡献,探究麋鹿食性的季节性变化,为保护区麋鹿管理及生境恢复工作提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

研究区江苏大丰麋鹿国家级自然保护区地处江苏省盐城市大丰区东南部(120°49′—120°53′E,32°41′—33°02′N)(图 1)[20],是典型的滩涂湿地,占地 2677hm^2。保护区被划分为实验区、缓冲区和核心区,核心区又被划分为第一核心区(479hm^2)、第二核心区(578hm^2)、第三核心区(1620hm^2)[21]。

保护区位于亚热带与暖温带的过渡地带,冬季受季风性气候影响低温少雨,夏季受海洋性气候影响高温多雨。常年平均气温 14.1℃,无霜期 216d,日照 2267h,年平均降水量 1068mm[22]。保护区内土壤质地为粉砂质盐碱土,区内地势平坦,平均海拔约为 2m[23—24]。植被类型以耐盐草本植物为主,优势种为互花米草(*Spartina alterniflora*)。

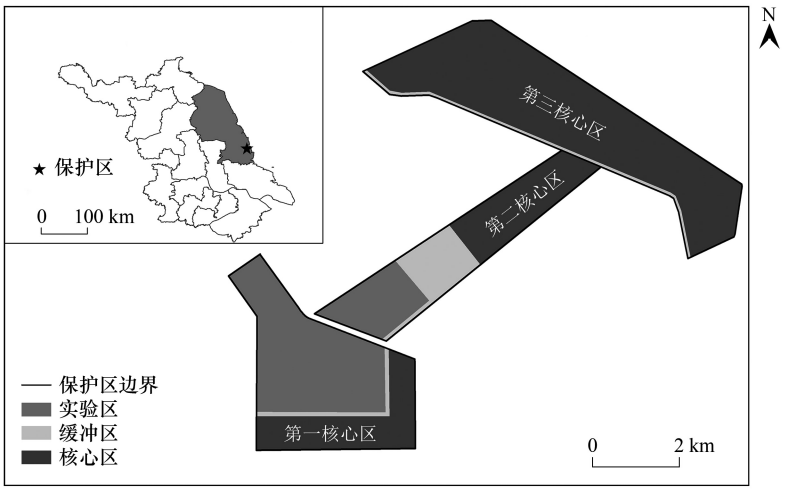

图 1 研究区区位与功能区划图

Fig.1 The location and function map of study area

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置

由于第二核心区食源植物覆盖率低,本文主要在第一核心区和第三核心区开展研究。分别于 2019 年 5 月、7 月、10 月和 12 月进行野外调查,确定麋鹿采食的草本植物种类。在第一核心区狼尾草(*Pennisetum alopecuroides*)群落按样线法设置采样点收集样本,第三核心区食源植物呈斑块化分布,为减少环境因素造成的误差,只在食源植物较多的地方进行样品采集。在碱蓬(*Suaeda glauca*)、白茅(*Imperata cylindrica*)、狼尾草、互花米草、狗牙根(*Cynodondactylon*)和糙叶薹草(*Carex scabrifolia* Steud)的植物群落中各设置 6 个草本植物采样点,在每个采样点分别设置 6 个大小为 1m×1m 的样方。将采集的样本放入自封袋密封后带回实验室分析待测。

1.2.2 样品采集与处理

(1)植物样品

选取充分展开的成熟叶片,混合成一个样本,每种植物样品收集 9 份。样品经蒸馏水洗净后在 60℃烘箱中烘 24—48h,烘干后研磨并过 1mm 筛,低温保存[25]。

(2)麋鹿粪便样品

早上 6:00—7:00 采集有光泽、表面污染物较少的新鲜麋鹿粪便。为保证采集的粪便样品属于不同的麋鹿个体,样品采集点之间的距离超过 3m,每次分别收集样品 30 个左右。麋鹿粪便于 60℃烘箱中烘 24—48h,烘干后用干净刀具削去外壳,除去表面污染物,充分研磨后过 1mm 筛低温保存[25]。

1.3 数据处理与分析

1.3.1 稳定同位素分析

分析仪器为同位素比率质谱仪 MAT-253(美国 Thermo Fisher 科学仪器公司)。碳、氮稳定同位素比值采用国际通用的 δ 值表示,$\delta^{13}C$ 或 $\delta^{15}N$ 公式为:

$$\delta^{13}C(\delta^{15}N) = [(R_{样品} - R_{标准}) - 1] \times 1000‰$$

式中,$R_{样品}$为待测样品同位素比值($^{13}C/^{12}C$ 或$^{15}N/^{14}N$);$R_{标准}$为标准参比样品同位素比值($^{13}C/^{12}C$)。

稳定碳、氮同位素分别以美洲拟箭石(PDB)和大气氮为参考标准。植物样品 C、N 含量用元素分析仪测定(%)。

1.3.2 贝叶斯混合模型

贝叶斯混合模型遵循质量守恒定律:

$$\delta_M = f_1(\delta_1+\gamma_1)+f_2(\delta_2+\gamma_2)+\cdots+f_n(\delta_n+\gamma_n)$$

式中,δ_M、δ_i:消费者、源稳定同位素值;f_i:第 i 个源对混合物贡献比例;r_i:第 i 个源稳定同位素值及其与消费者的分馏值

使用 R 语言 MixSIAR 包输入食源植物叶片和麋鹿粪便 δ13C 和 δ15N 值,设置运行时长为 normal,结果用 Gelman 和 Gewoke 检验模型是否收敛,不收敛则增加运行时长为 very long,输出数据用中位数与后检验概率密度表示。

1.3.3　数据分析

本论文用 Microsoft Excel 2016 对数据进行处理分析。采用贝叶斯混合模型分析不同食源植物对麋鹿食源的贡献率[26]。用 R 语言 MixSIAR 包,进行检验。使用 SPSS 软件进行相关性分析。

2　结果与分析

2.1　食源植物和粪便碳氮同位素分析

图 2 是混合数据图,按区域和月份进行划分。同位素源数据按不同月份的不同食源植物种类进行划分,并按平均值和标准差(SD)进行调整。同种食源植物不同月份的 δ13C 和 δ15N 值差别较小,在图 2 上表现为其距离较近。时空尺度上 C_3植物与 C_4植物 δ13C 值有明显差别,分别分布在图 2 的左右两侧,麋鹿粪便的 δ13C

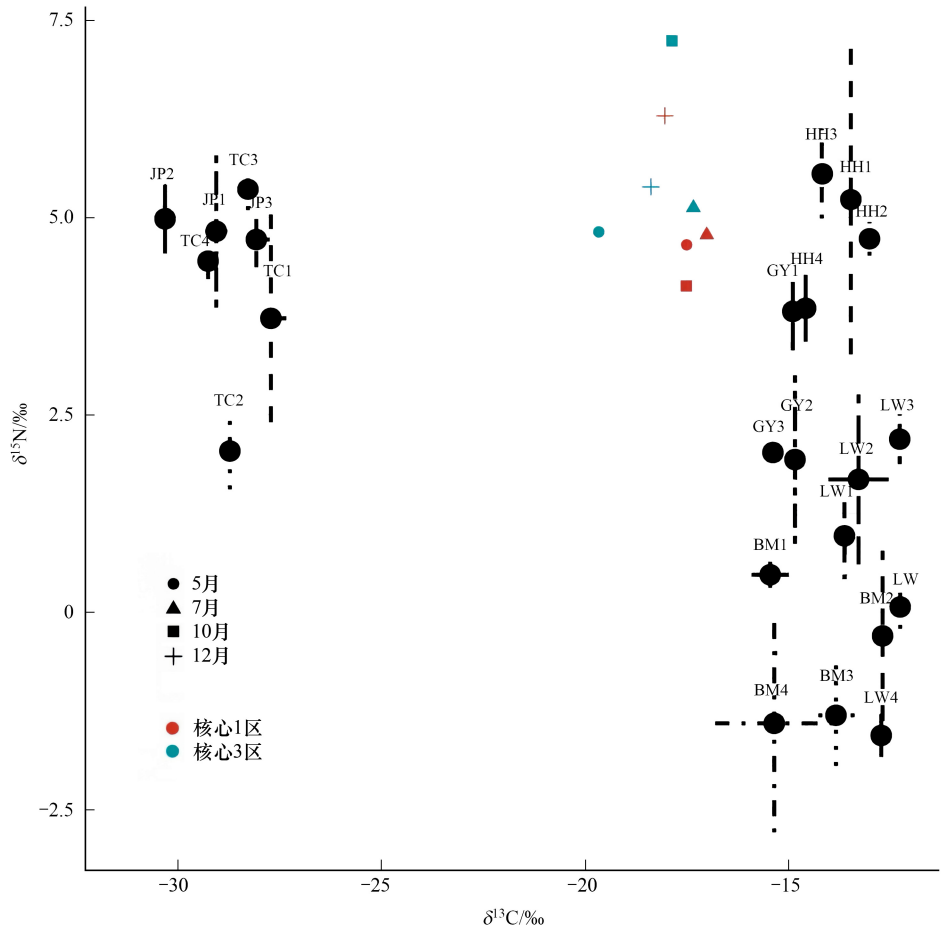

图 2　不同月份不同区域食源植物和麋鹿粪便的同位素值分布

Fig.2　Distribution of isotope values of edible plant and deer excrement in different regions in different months

JP:碱蓬; TC:糙叶薹草; HH:互花米草; GY:狗牙根; BM:白茅; LW:狼尾草

值则落在两者之间。

2.2 第三核心区优势种叶片及麋鹿粪便稳定同位素分析

从图 3 可以看出,在第三核心区不同月份中碱蓬、白茅、互花米草、狼尾草、狗牙根和糙叶薹草 6 个食源植物叶片的 $\delta^{13}C$ 值较为稳定,基本无变化。碱蓬和糙叶薹草的 $\delta^{13}C$ 值约为-30‰,而其他植物的 $\delta^{13}C$ 值约为-15‰,碱蓬和糙叶薹草的 $\delta^{13}C$ 值明显比其它植物的 $\delta^{13}C$ 值小。这表明,碱蓬和糙叶薹草属于 C_3 植物,而其他植物属于 C_4 植物。在采集样品时间内,C_4 植物的 $\delta^{13}C$ 值在 7 月份达到最大值,但该月份 C_3 植物的 $\delta^{13}C$ 值反而较低。

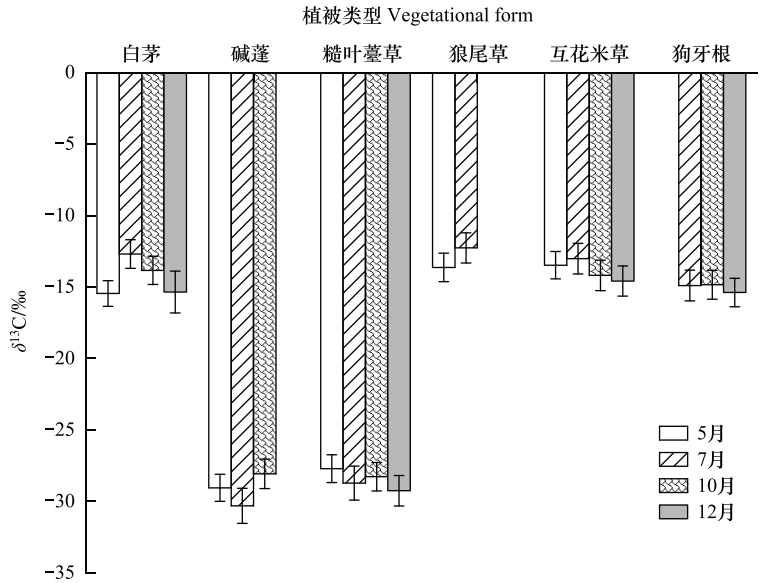

图 3 不同月份食源植物的同位素 $\delta^{13}C$ 值

Fig.3 Isotopic $\delta^{13}C$ values of edible plant species in different months

从图 4 可知,同种植物的 $\delta^{15}N$ 值在不同时期的变动幅度较大。在样品采集时间内,碱蓬的 $\delta^{15}N$ 值变化较小,平均值为 4.84‰;除 7 月份以外,糙叶薹草的 $\delta^{15}N$ 值均大于 3‰。不同 C_4 植物的 $\delta^{15}N$ 值差别较大:白茅和狼尾草的 $\delta^{15}N$ 值均小于 1‰,且白茅在 7 月、10 月和 12 月的 $\delta^{15}N$ 值都小于 0。互花米草的 $\delta^{15}N$ 值总体较高,除 12 月之外都大于 4‰,10 月份高达 5.56‰;狗牙根的 $\delta^{15}N$ 值在 7 月份达最大值,10 月和 12 月有所下降。

从图 5 可知,在四个月份中,鹿粪 $\delta^{13}C$ 值的范围为-19.67‰—-17.35‰,该范围位于 C_3 和 C_4 植物的 $\delta_{13}C$ 值之间,表明麋鹿不单采食 C_3 植物或 C_4 植物,而是混食这两种植物。四个月中 5 月份鹿粪的 $\delta^{13}C$ 值最低,为-19.67‰,最接近于 C_3 植物的 $\delta^{13}C$ 值;7 月份的 $\delta^{13}C$ 值最高,为-17.35‰,最接近于 C_4 植物的 $\delta^{13}C$ 值。5 月份到 7 月份鹿粪的 $\delta^{13}C$ 值呈上升趋势,由此推断该时间段内麋鹿食物组成中 C_4 植物的比例逐渐增加。

从图 5 可知,第三核心区在 5 月份鹿粪的 $\delta^{15}N$ 值达到最低值,为 4.81‰,并持续上升。说明 5 月份麋鹿摄入蛋白质含量最低,春季是植物的萌发阶段,此时植物比较幼嫩,适口性好,但营养成分不高。鹿粪的 $\delta^{15}N$ 值在 10 月份达最高值,为 7.24‰,12 月份则下降至 5.39‰,但仍高于 5 月份和 7 月份。

分别对不同月份鹿粪与食源植物的 $\delta^{13}C$ 和 $\delta^{15}N$ 进行分析(表 1),结果表明 7 月份鹿粪与白茅 $\delta^{15}N$ 值存在相关性($P<0.05$),其余时间则不存在相关性;采样时间内鹿粪与食源植物 $\delta^{13}C$ 值未呈现显著性相关关系。7 月份白茅生长旺盛,此时营养含量高,麋鹿取食获得生理活动所需的能量;由 $\delta^{13}C$ 相关性分析结果推测麋鹿取食多种食物,并不偏爱某种食物,除麋鹿自身对食物的选择性原因外,补饲在很大程度上也影响麋鹿对食物的选择。鹿粪与食源植物的 $\delta^{13}C$ 和 $\delta^{15}N$ 值无明显相关是麋鹿选择性取食与外部补饲共同作用的结果[27]。

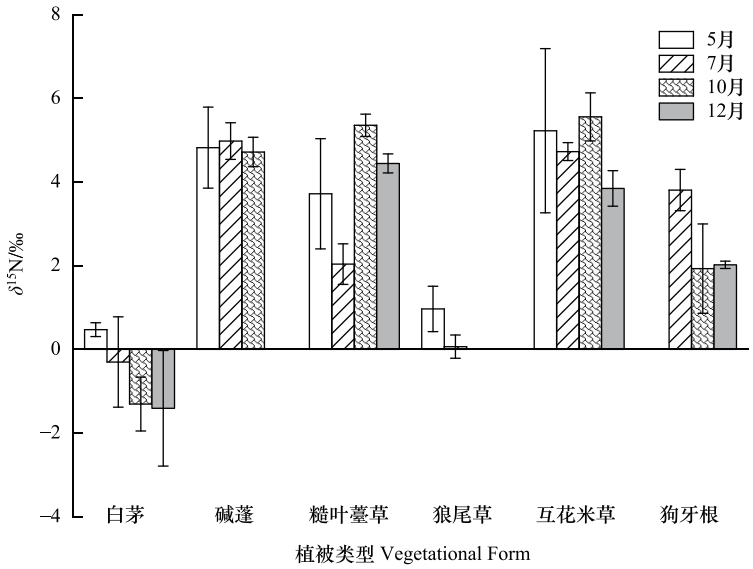

图 4　不同月份食源植物的同位素 δ15N 值

Fig.4　Isotopic δ15N values of edible plant species in different months

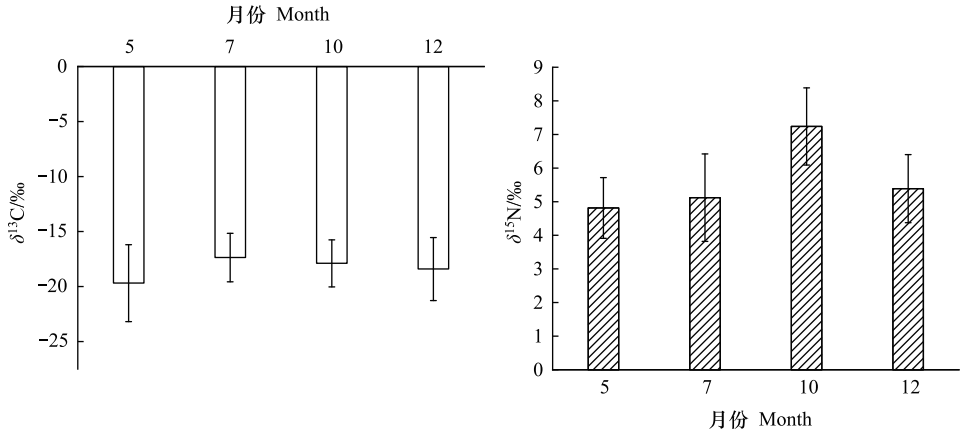

图 5　第三核心区不同月份麋鹿粪便 δ13C 和 δ15N 值

Fig.5　The δ13C and δ15N values of deer excrement in the third core area in different months

表 1　第三核心区不同月份麋鹿粪便与食源植物 δ13C 和 δ15N 相关性分析

Table 1　Correlation analysis of δ13C and δ15N between deer excrement and edible plant in the third core area in different months

月份 Month	白茅 *I. cylindrica*		糙叶薹草 *C. scabrifolia*		互花米 *S. alterniflora*		碱蓬 *S. glauca*		狼尾草 *P. alopecuroides*		狗牙根 *Cynodondactylon*	
	δ13C	δ15N	δ13C	δ15N	δ13C	δ15N	δ13C	δ15N	δ13C	δ15N	δ13C	δ15N
5	−0.305	−0.125	−0.016	−0.028	0.286	0.411	0.591	0.039	−0.024	0.391	—	—
7	−0.157	0.690*	0.210	−0.018	0.008	−0.039	0.196	−0.656	0.318	0.035	0.301	0.117
10	−0.194	−0.259	0.059	0.305	0.095	−0.175	0.212	0.297	—	—	−0.656	−0.263
12	−0.190	0.026	−0.744	0.866	−0.476	−0.698	—	—	—	—	−0.328	−0.979

*:在 0.05 水平差异显著

2.3　第一核心区狼尾草食源植物叶片及麋鹿粪便的稳定同位素分析

从图 6 可知,在以狼尾草为优势物种的第一核心区内,鹿粪的 δ13C 值在不同月份差异较小。一方面可能是因为狼尾草在生长过程中 δ13C 值变化较小,麋鹿的食物组成比较稳定,7 月份不仅狼尾草叶片 δ13C 值最高

(-13.28‰),鹿粪 $\delta^{13}C$ 值也达到最高值(-17.02‰)。另一方面,当 12 月份第一核心区内不再生长狼尾草时,粪便的 $\delta^{13}C$ 值达最低值(-18.05‰),为保证麋鹿安全度过食源植物匮乏的冬季,保护区实施人工青贮玉米秸秆投放法[28],且麋鹿常活动于禾草滩丹顶鹤补饲区取食人工补饲玉米[29],该结果导致 12 月份粪便 $\delta^{13}C$ 值与其他几个月差别较小。

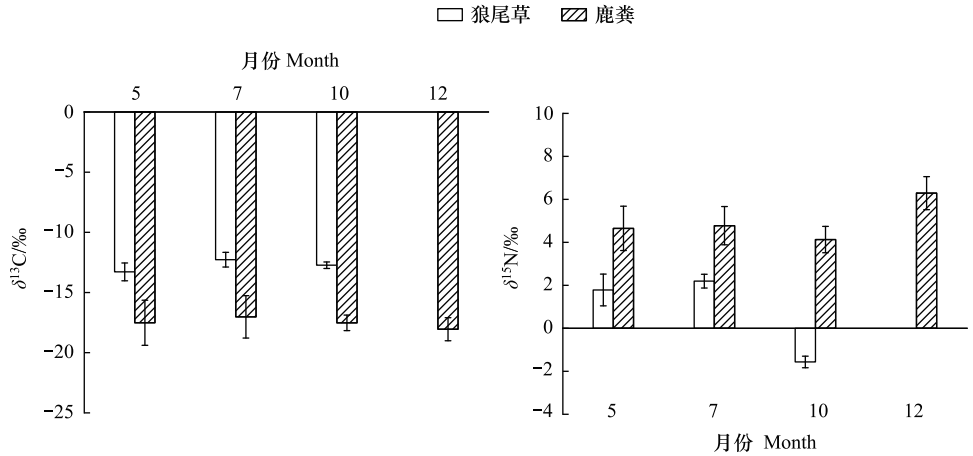

图 6 第一核心区不同月份食源植物与麋鹿粪便的 $\delta^{13}C$ 和 $\delta^{15}N$ 值

Fig.6 $\delta^{13}C$ and $\delta^{53}N$ values of edible plant and deer excrement in the first core area in different months

鹿粪的 $\delta^{15}N$ 值变化幅度较大,狼尾草叶片的 $\delta^{15}N$ 值变化也较大(图 6)。12 月份鹿粪 $\delta^{15}N$ 值达最高值,为 6.29‰,10 月份最低,为 4.13‰,说明第一核心区的麋鹿在 12 月所获得的蛋白质最多,而在 10 月份获得的蛋白质最少。该现象与狼尾草叶片的 $\delta^{15}N$ 值变化情况相吻合。叶片的 $\delta^{15}N$ 变幅较大,5 月份和 7 月份为正值,7 月份最高,为 4.78‰;10 月份为负值,总体平均值为 0.77‰。

分别对不同月份鹿粪与食源植物的 $\delta^{13}C$ 值和 $\delta^{15}N$ 值相关性进行分析(表 2),采样时间内鹿粪与食源植物的 $\delta^{13}C$ 值不呈现显著性相关,而 5 月份鹿粪的 $\delta^{15}N$ 值与食源植物的 $\delta^{15}N$ 值存在明显相关性($P<0.1$),其它月份则无相关性,这种现象与该月份食源贡献率结果相吻合;除 5 月份外其它时间麋鹿粪便 $\delta^{15}N$ 值与食源植物 $\delta^{15}N$ 值相关性不明显,该结果与第一核心区食源植物为狼尾草且补饲有关[27,30]。

表 2 第一核心区不同月份麋鹿粪便与食源植物 $\delta^{13}C$、$\delta^{15}N$ 相关性分析

Table 2 Correlation analysisof $\delta^{13}C$ and $\delta^{15}N$ between deer excrement and edible plant in the first core area in different months

月份 Month	狼尾草($\delta^{13}C$) *P. alopecuroides*($\delta^{13}C$)	狼尾草($\delta^{15}N$) *P. alopecuroides*($\delta^{15}N$)	月份 Month	狼尾草($\delta^{13}C$) *P. alopecuroides*($\delta^{13}C$)	狼尾草($\delta^{15}N$) *P. alopecuroides*($\delta^{15}N$)
5	0.060	-0.800**	10	-3.00	-0.372
7	0.170	-0.329	12	—	—

**:在 0.01 水平差异显著

2.4 第三核心区麋鹿稳定性同位素 MixSIAR 混合模型食性分析

用 R 中 MixSIAR 包对 $\delta^{13}C$ 和 $\delta^{15}N$ 进行计算,得到第三核心区不同食源植物对麋鹿食物组成的贡献率(图 7)。

由图 8 可知在所有食源植物中,5 月、7 月、10 月和 12 月对麋鹿食物贡献率最高的分别是互花米草(39.0%)、狗牙根(42.8%)、互花米草(47.9%)和互花米草(31.9%)。总体来说,四个月中互花米草对麋鹿食物的贡献率较高,分别为 39%、24.9%、47.9%、31.9%。狼尾草对麋鹿食物的贡献率较低,5 月和 7 月分别为 11.2%和 3%。结合同位素数据来看,互花米草的 $\delta^{13}C$ 和 $\delta^{15}N$ 值在四个月份都较高,5 月份和 7 月份的值在所有食源植物中最高,说明它的营养价值高,麋鹿喜爱采食。狼尾草在 5 月份和 7 月份的 $\delta^{13}C$ 值都较高,但它

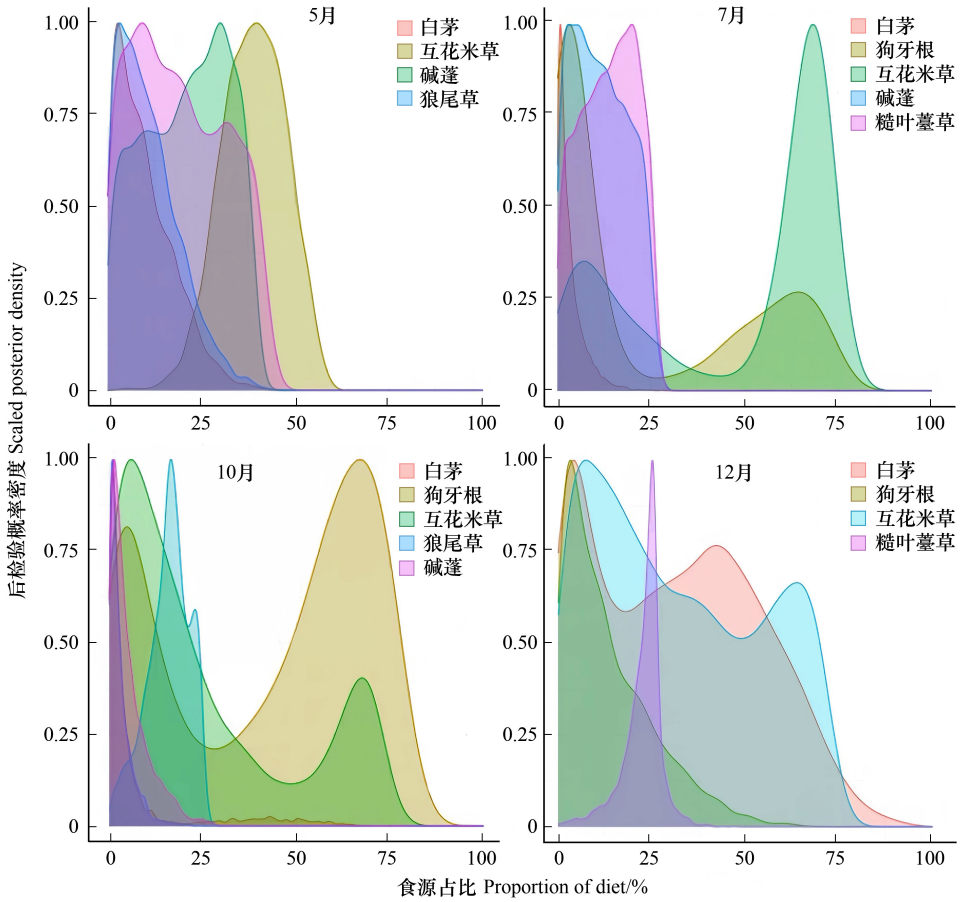

图 7　不同食源植物不同月份对食源贡献率的范围

Fig.7　Range of contribution rates of different edible plant to food sources in different months

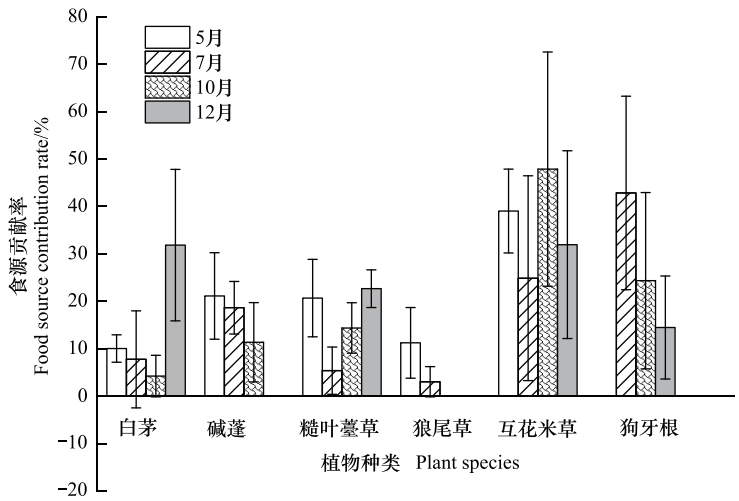

图 8　不同月份食源植物对于食源贡献率的中位数分布

Fig.8　Median distribution of edible plant contribution to food source in different months

的 $\delta^{15}N$ 值都极低,这可能是麋鹿较少采食的原因。但对同样 $\delta^{15}N$ 值较低的白茅来说,12 月份其 $\delta^{15}N$ 值在所有食源植物中最低,却对麋鹿食物的贡献率最高。而在 5 月份,在碱蓬、糙叶薹草与互花米草的 $\delta^{15}N$ 值差别较小的情况下,互花米草对麋鹿食源的贡献率要远高于碱蓬和糙叶薹草。7 月份狗牙根对麋鹿食源的贡献率

(42.8%)远高于其他的食源植物,但它的 $\delta^{13}C$ 和 $\delta^{15}N$ 值都不是最高的,互花米草对麋鹿食源的贡献率仅约为狗牙根的三分之一,这可能是因为 7 月份狗牙根刚生长出来,植物较为幼嫩,适口性较好,麋鹿喜爱采食。C_3 和 C_4 植物相比,C_4 植物对麋鹿食源的贡献率更高,该结果与麋鹿粪便的 $\delta^{13}C$ 值更接近 C_4 植物的 $\delta^{13}C$ 值相吻合(图 3、图 5)。C_3 植物碱蓬对食源的贡献率从 5 月份(20.9%)到 10 月份(15.8%)呈现逐渐递减的趋势。糙叶薹草的贡献率在 7 月达最低值(5.4%),后续逐渐升高至 12 月份的 22.6%,但总体占比较低。相对应麋鹿粪便的 $\delta^{13}C$ 值从 5 月份到 12 月份先升高后降低,但 12 月份的 $\delta^{13}C$ 值要高于 5 月份。

3 讨论

3.1 麋鹿食性的季节变化

蹄类动物的食性分析对了解野生动物及其与环境之间的相互作用至关重要,是评估栖息地质量、野生动物摄食策略等种群生态问题的基础[31]。与 Wang 等研究发现秋冬季麋鹿取食偏向 C_4 植物类似[32],本研究结果表明 7 月份第三核心区狗牙根的占比远高于其他植物,其次是碱蓬和互花米草,白茅、糙叶薹草和狼尾草占比较少,其它月份麋鹿主要取食互花米草。而王轶等研究发现麋鹿在春夏季节偏向取食 C_3 植物[33],该结果与本文研究结果存在差异,这种差异可能是由于保护区内互花米草入侵成为优势种,并成为麋鹿主要食源植物,导致麋鹿饮食选择相对狭窄[6]。麋鹿取食偏好与植物生物量、丰富度、适口性、可消化程度和分布范围等因素有关,这些因素存在季节性差异,并影响麋鹿的取食行为[6,34—35]。狼尾草为第一核心区麋鹿主要食源植物,狼尾草自春季开始萌发,5、6 月份进入生长旺盛期[30],成为麋鹿主要食源,与本文 5 月份粪便与食源植物同位素存在相关性相符合。草本植物中木质素含量越高茎秆越硬适口性越差[32],狼尾草自 7 月份开始纤维含量增加导致其适口性变差,麋鹿仅取食部分刚萌发的狼尾草。白茅虽然适应性强但其生物量含量较低,麋鹿不喜采食。互花米草除具有较高的营养价值外,由于麋鹿长期啃食,不断长出嫩叶,且互花米草可以无性繁殖,生长速度快,可持续为麋鹿提供营养价值高、适口性好的食源[36]。这表明,食物质量和生物量是影响麋鹿取食行为的主要因素[37—38]。

3.2 食物营养成分对麋鹿食性的影响

在营养生态学领域中,动物的新陈代谢和食物选择与协同和拮抗策略有关[32],麋鹿优先选择富含蛋白质的食物,从食物中获得的能量被吸收并用于分配以支撑各项生理活动[39—40]。粗蛋白能够满足动物对营养物质的需求,其含量是衡量牧草质量的重要指标[41—42]。滑荣、纪一帆等研究发现,互花米草全年粗蛋白含量较高,能够为麋鹿摄取蛋白质提供充足的营养[29,36],胡贺娇发现西藏马鹿采食植物蛋白质含量与粪便氮含量正相关[43]。本研究结果表明鹿粪 $\delta^{15}N$ 值与食源植物的 $\delta^{15}N$ 值存在相关性,尤以第一核心区明显,因此,对麋鹿粪便的 $\delta^{15}N$ 值进行研究其结果能够反映麋鹿饮食中的蛋白质水平。崔璐瑶等研究发现不同季节植物营养价值存在差异[2],本研究 10 月份麋鹿粪便的 $\delta^{15}N$ 值达到最大值,说明该时期麋鹿摄入蛋白质含量最多,饮食质量最高,这可能是因为秋季植物生长基本结束,营养价值高[28],但由于保护区存在人工补饲,结果有待进一步研究证实。

3.3 麋鹿对 C_3 和 C_4 植物偏好对食性的影响分析

本研究发现,麋鹿粪便的 $\delta^{13}C$ 值偏向 C_4 植物的 $\delta^{13}C$ 值(图 2)。张雪敬通过分析非补饲情况下大丰野生麋鹿食物组成发现麋鹿较多取食 C_4 植物,与本文研究结果相吻合[6]。但 Wang 等对石首麋鹿保护区麋鹿食源分析发现,C_3 植物是该保护区麋鹿主要取食的植物类型[32]。由此推测麋鹿取食不同光合类型的植物可能与地理位置和气候等因素的有关。同位素结果显示麋鹿混食 C_3 和 C_4 两种植物,据 MixSIAR 模型的分析结果来看,C_4 植物狼尾草对食源的贡献率低于碱蓬和糙叶薹草,可能是因为它的分布面积较小,C_4 植物狗牙根和互花米草对麋鹿食源贡献率则比 C_3 植物要高,但在春季 C_3 植物的贡献相对来说比较大,这可能是由于资源的季节性变化而导致物种丰富度也相应发生了变化[44]。如果仅根据本研究中的 6 种植物和麋鹿粪便同位素的数据进行分析,麋鹿对于 C_3 和 C_4 食源植物偏好并不明显,可结合直接观察法、粪便显微技术等同时进行研究,使分

析结果更可靠,所以本研究尚不能确定麋鹿对 C_4 植物的偏好,有待进一步研究判定。

3.4　麋鹿对互花米草的偏好分析

本研究中第三核心区互花米草对食源的贡献率显著高于其他植物,这表明互花米草可能是保护区麋鹿喜爱采食的植物[33]。但麋鹿对互花米草的偏好也可能是由于环境胁迫所导致。贾媛媛等研究发现,圈养麋鹿喜食营养价值较高的狼尾草,而非互花米草[30],这说明野生放养麋鹿采食互花米草是受特定环境所迫,也反映了放归后麋鹿对野生环境的适应能力。动物在没有食物压力的情况下优先选择喜食植物,与植物的丰富度无关[29,45—46]。当食物资源有限时,植物丰富度就成为食草动物采食的主要影响因子。互花米草在夏季高度可达 2m 以上,是大丰野生放养区麋鹿生境中的显著优势植物[36],并逐渐成为麋鹿的主要食物来源,在一定程度上限制了麋鹿对食物的选择[47]。第三核心区主要食源植物为互花米草、碱蓬和白茅,但麋鹿优先采食互花米草,补饲可能会在一定程度上影响麋鹿对食物的选择。但在补饲的情况下,麋鹿仍较多取食互花米草,这可能是因为互花米草覆盖面广,或提供其它利用价值[29,33]。丁玉华研究发现,互花米草较高,可为麋鹿提供栖身场所,冬季还可抵御寒风和保温,是麋鹿的最佳栖息地[48],这使得麋鹿更加倾向于栖息在互花米草群落中,互花米草被采食频率及其对麋鹿食源的贡献率增加。此外,也可能麋鹿野化适应过程中,食性偏移,喜食互花米草[49]。本研究以保护区食源植物作为麋鹿食源重要研究对象,然而在实际过程中,某些非食源植物也可能是麋鹿的潜在重要食源,扩大麋鹿可能取食植物的研究范围有利于更加全面了解麋鹿的食性。

4　结论

本研究结果表明,第一核心区麋鹿取食少量狼尾草;第三核心区麋鹿主要取食互花米草。植物的质量、生物量等原因是影响麋鹿取食选择的主要因素。大丰保护区内麋鹿混采 C_3 植物和 C_4 植物,尽管本研究发现 C_4 植物占比高于 C_3 植物,但并不能确认麋鹿更偏向于取食 C_4 植物,麋鹿食性的变化还需结合其他方法进一步研究。

参考文献(References):

[1] 王志勇, 孟德怀, 骆颖, 滕丽微, 高惠, 王继飞, 刘振生. 贺兰山马鹿春季食性分析. 野生动物学报, 2019, 40(4): 825-831.

[2] 崔璐瑶, 邱开阳, 李静尧,谢应忠, 赵朋波, 刘王锁, 黄业芸, 杨壹, 鲍平安, 王思瑶. 贺兰山岩羊可食植物营养成分沿海拔梯度变化及季节动态. 生态学杂志, 2023, 42(5): 1167-1174.

[3] 刘贤赵, 张勇, 宿庆, 田艳林, 王庆, 全斌. 陆生植物氮同位素组成与气候环境变化研究进展. 地球科学进展, 2014, 29(2): 216-226.

[4] Luo W T, Wang X G, Sardans J, Wang Z W, Dijkstra F A, Lü X T, Peñuelas J, Han X G. Higher capability of C3 than C4 plants to use nitrogen inferred from nitrogen stable isotopes along an aridity gradient. Plant and Soil, 2018, 428(1): 93-103.

[5] Murphy B P, Bowman D M J S. The carbon and nitrogen isotope composition of Australian grasses in relation to climate. Functional Ecology, 2009, 23(6): 1040-1049.

[6] 张雪敬. 大丰野生放养麋鹿食性研究及其主食植物营养分析[D]. 南京:南京师范大学, 2020.

[7] 宫爽, 张萍, 栾雪, 包衡, 姜广顺. 粪便显微分析和 DNA 宏条形码技术在野猪食性分析中的应用和比较. 野生动物学报, 2022, 43(3): 645-653.

[8] 陆琪, 胡强, 施小刚, 金森龙, 李晟, 姚蒙. 基于分子宏条形码分析四川卧龙国家级自然保护区雪豹的食性. 生物多样性, 2019, 27(9): 960-969.

[9] 侯楚, 尚国珍, 吴学琴, 曹伊凡, 陈家辉, 边疆晖. 高原鼠兔胃与结肠内容物食性分析方法的比较. 兽类学报, 2019, 39(6): 662-669.

[10] 郭艳萍, 张浩, 赵新钢, 罗海玲, 张英俊. DNA 宏条形码技术在食草动物食性研究中的应用. 生物技术通报, 2021, 37(3): 252-260.

[11] 张全建, 杨彪, 付强, 王磊, 龚旭, 张远彬. 邛崃山系水鹿的冬季食性. 生物多样性, 2020, 28(10): 1192-1201.

[12] 朱明月, 杨森, 张玮琪, 张明海. 黑龙江穆棱东北红豆杉自然保护区马鹿与 狍冬季食性组成的比较. 东北林业大学学报, 2019, 47(5): 100-104.

[13] Bao H, Dou H L, Ma Y L, Liu H, Jiang G S. Moose winter diet components from feces and field feeding signs: consistency and variability related to forage availability and nutritional requirements. Ecological Research, 2017, 32(5): 685-692.

[14] 严丽君, 王普, 施启龙, 刘佳, 施云娥, 池利昆. 动物食性分析在生态学中的应用研究进展——基于 DNA 宏条形码技术. 生态学报, 2023, 43(8): 3007-3019.

[15] 高世科, 于雯雯, 张硕. 基于稳定同位素方法的吕泗渔场近岸海域夏季主要生物营养级. 应用生态学报, 2020, 31(1): 301-308.S

[16] 白加德, 张渊媛, 钟震宇, 程志斌, 曹明, 孟玉萍. 中国麋鹿种群重建 35 年: 历程、成就与挑战. 生物多样性, 2021, 29(2): 160-166.

[17] 丁玉华. 麋鹿回归大丰 35 周年. 特种经济动植物, 2021, 24(9): 1-2.
[18] 王立波, 姜慧, 安玉亭, 杨禹治, 原宝东. 中国麋鹿种群现状分析及保护对策探讨. 野生动物学报, 2020, 41(3): 806-813.
[19] 徐嘉, 暴旭, 刘振生, 高惠, 赵唱, 孙玉姣, 王继飞, 滕丽微. 贺兰山同域分布高山麝和阿拉善马鹿秋季食性的比较研究. 生态学报, 2018, 38(10): 3705-3711.
[20] Zhu, Y, Wu, Y B, An, Y T. Effects of David Deer Grazing on Soil Bacterial and Fungal Communities in an Eastern Coastal Wetland of China. Diversity 2022, 14, 976.
[21] 薛媛媛, 闫丹丹, 戚丽萍, 李静泰, 栾兆擎. 江苏大丰麋鹿国家级自然保护区互花米草对水盐梯度的生态响应. 环境科学学报, 2022, 42(1): 28-35.
[22] 安玉亭, 刘彬, 王立波, 解生彬, 薛丹丹, 吴永波. 不同麋鹿干扰强度对栖息地土壤理化特性的影响. 生态学报, 2020, 40(11): 3571-3578.
[23] 朱怡, 吴永波, 安玉亭. 基于高通量测序的禁牧对土壤微生物群落结构的影响. 生态学报, 2022, 42(17): 7137-7146.
[24] 贾媛媛. 大丰麋鹿种群适合度及其生境现状调查分析[D]. 南京: 南京农业大学, 2017.
[25] 王亚婷, 王玺, 赵天启, 贾丽欣, 杨阳, 乔荠璐, 张峰, 赵萌莉. 不同放牧强度上内蒙古短花针茅草原植物功能群水分和氮素利用效率相关分析. 生态环境学报, 2017, 26(6): 964-970.
[26] Stock B C, Jackson A L, Ward E J, Parnell A C, Phillips D L, Semmens B X. Analyzing mixing systems using a new generation of Bayesian tracer mixing models. PeerJ, 2018, 6: e5096.
[27] 侯立冰, 丁晶晶, 丁玉华, 任义军, 刘彬. 江苏大丰麋鹿种群及管理模式探讨. 野生动物, 2012, 33(5): 254-257, 270.
[28] 丁玉华. 达氏麋鹿. 南京:南京师范大学出版社,2017.
[29] 滑荣, 崔多英, 刘佳, 李淑红, 赵永强, 张亚楠江苏盐城湿地麋鹿冬季食性研究. 动物学杂志, 2020, 55(1): 1-8.
[30] 贾媛媛, 安玉亭, 孙大明, 沈华, 陆立林, 原宝东. 麋鹿采食与非采食区群落重要值和狼尾草种群的差异. 野生动物学报, 2018, 39(1): 49-53.
[31] 张金铭, 符龙飞, 洪欣, 王丽, 王智, 周守标. 石首麋鹿国家级自然保护区草本植物区系及物种多样性. 生态学杂志, 2019, 38(2): 513-520.
[32] Wang H L, Zhao Y, Wang F J, Sun X J, Zhu J Q, Zhang Y M, Wei S D, Chen H. Diet composition and selection of Père David′s Deer in Hubei Shishou Milu National Nature Reserve, China. Ecology and Evolution, 2023, 13(1): e9702.
[33] 王轶, 王文. 北京南海子麋鹿苑麋鹿食性分析. 野生动物, 2011, 32(2): 65-68.
[34] Przybyło M, Kazek S, Kloska A, Pyś J B, Górka P. Preference of intake of different tree leaves preserved with drying and ensiling by nyala antelope (*Tragelaphus angasii*). Zoo Biology, 2020, 39(6): 436-442.
[35] Chang H L, Chen P Y, Ma M. Feeding preference of *Altica deserticola* for leaves of *Glycyrrhiza glabra* and G. uralensis and its mechanism. Scientific Reports, 2020, 10(1): 1534.
[36] 纪一帆, 吴宝镭, 丁玉华, 钦佩. 大丰野放麋鹿生境中芦苇和互花米草的营养对比分析. 生态学杂志, 2011, 30(10): 2240-2244.
[37] 颜文博, 张洪海, 杨红军, 窦华山, 沈秀清. 内蒙古达赉湖自然保护区狼食性的季节性变化. 动物学杂志, 2006, (5): 46-51.
[38] 吕忠海, 张玮琪, 刘浩, 张明海, 李依然. 西藏马鹿与同域野生有蹄类、家畜草青期食性比较. 应用生态学报, 2020, 31(2): 651-658.
[39] Felton A M, Felton A, Raubenheimer D, Simpson S J, Krizsan S J, Hedwall P O, Stolter C. The nutritional balancing act of a large herbivore: an experiment with captive moose (*Alces alces* L). PLoS One, 2016, 11(3): e0150870.
[40] Workman C, Schmitt D. Positional behavior of Delacourr′s langurs (*Trachypithecus delacouri*) in northern Vietnam. International Journal of Primatology, 2012, 33(1): 19-37.
[41] 查晶晶, 吴永波, 周子尧, 朱晓成, 朱嘉馨, 安玉亭. 大丰麋鹿保护区狼尾草粗蛋白含量的高光谱遥感估算. 草业科学, 2021, 38(10): 1910-1917.
[42] 齐琦. 食物营养空间异质性对狍季节性栖息地选择的影响[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2023.
[43] 胡贺娇. 西藏马鹿(*Cervus wallichii*)分子生态学与营养生态学研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2016.
[44] 张国斌, 薛建辉, 吴永波. 半圈养状态下麋鹿对生境的影响. 中国农学通报, 2007, (7): 180-184.
[45] Berry S L, Shipley L A, Long R A, Loggers C. Differences in dietary niche and foraging behavior of sympatric mule and white-tailed Deer. Ecosphere, 2019, 10(7): e02815.
[46] Brox B W, Edwards K, Buist N A, Macaskill A C. Investigating food preference in zoo-housed meerkats. Zoo Biology, 2021, 40(6): 517-526.
[47] Li Y, Wang H Y, Jiang Z G, Song Y C, Yang D D, Li L. Seasonal differences of the Milu′s home range at the early rewilding stage in Dongting Lake area, China. Global Ecology and Conservation, 2022, 35: e02057.
[48] 丁玉华. 大丰野生麋鹿采食互花米草的发现与研究. 野生动物, 2009, 30(3): 118-120, 139.
[49] 赵小雷, 凌云, 张光富, 解生彬, 华卫建, 丁玉华. 大丰麋鹿保护区不同生境梯度下滩涂湿地植被的群落特征. 生态学杂志, 2010, 29(2): 244-249.