DOI: 10.20103/j.stxb.202209142625

李俊芳,钟震宇,郭子良,胡巧立,段建彬,程志斌,陈颀,郭青云,白加德,孟庆辉.迁地麋鹿对野鸭湖植被的保护性生物控制.生态学报,2023,43(18):7715-7730.

Li J F,Zhong Z Y,Guo Z L,Hu Q L,Duan J B,Cheng Z B,Chen Q,Guo Q Y,Bai J D,Meng Q H.Conversation grazing on Yeya Lake vegetation by ex-situ Père David's deer.Acta Ecologica Sinica,2023,43(18):7715-7730.

迁地麋鹿对野鸭湖植被的保护性生物控制

李俊芳[1],钟震宇[1],郭子良[2],胡巧立[3],段建彬[1],程志斌[1],陈 颀[1],郭青云[1],白加德[1,*],孟庆辉[1]

1 北京市科学技术研究院北京麋鹿生态实验中心,北京 100076

2 中国林业科学研究院湿地研究所,北京 100091

3 北京野鸭湖湿地公园管理处,北京 102101

摘要:利用食草动物来管理自然保护地的植被平衡具有很大的应用潜力,一方面可提升动物的生态价值,另一方面通过控制取食规模,改变植被的生物多样性,达到对自然保护地生态平衡管理的目的。基于此于 2021 年 6 月 5 日引入 4 头麋鹿(2 雄 2 雌),对野鸭湖自然保护区的"芦苇优势群落"采取保护性的生物控制研究,从项目的实施来看:1)单纯收割不能控制芦苇的生长扩张;对芦苇区系植物多样性的影响有限,未改变芦苇区系结构;2)麋鹿引入该区域后,通过取食、游泳、躺卧和踩踏等活动有效控制了芦苇和香蒲的过度扩张;1 年后芦苇和香蒲面积下降了 21.96%,为三棱水葱、水蓼等提供了生长空间,逐渐形成了仍以芦苇和香蒲为主且更多样的湿地环境;3)增加滩涂和开阔水面等景观,使多样性指数进一步提升,未改变周边区系湿地生态结构;4)麋鹿迁入可降低野鸭湖"脆弱物种"芦苇区系的丰富度,由引入前的(r=3.67)下降到引入后的(r=1.97);麋鹿迁入提升了野鸭湖植被区系物种多样性,芦苇区系的多样性指数由引进前的(r=0.90)上升到引进后的(r=2.11);麋鹿引入的第一年结果显示,整个引入区域的植被多样性指数由 r=0.51 上升到 r=0.91。麋鹿迁入造成野鸭湖芦苇区系植被均匀度显著下降,由引入前的(r=0.68)下降到引入后的(r=0.36)。麋鹿迁入造成野鸭湖芦苇区系优势度下降:由引入前的(r=0.22)下降到引入后的(r=0.07)。麋鹿迁入造成野鸭湖地上植物生物量下降:单位面积的地上生物量由引入前的(2334.78±841.36) g/m^{2}下降到引入后的(732.16±245.10) g/m^2;单位面积的地上可摄入干物质量由引入前的(201.87±73.11) g/m^{2}下降到引入后的(57.65±18.62) g/m^2。引入前共记录到野生植物 64 种 27 科 56 属,引入后该区域共记录到野生植物 76 种 29 科 64 属,相比引入前植物种类数量略微上升。引入区植物区系分化强度有所变化,未表现出差异。引入前植物多样性保护价值指数为 8.25;引入后为 9.06,有所提升。

关键词:保护性放牧;保护性生物控制;应用生态学;麋鹿迁地保护;野鸭湖湿地

Conversation grazing on Yeya Lake vegetation by ex-situ Père David's deer

LI Junfang[1], ZHONG Zhenyu[1], GUO Ziliang[2], HU Qiaoli[3], DUAN Jianbin[1], CHENG Zhibin[1], CHEN Qi[1], GUO Qingyun[1], BAI Jiade[1,*], MENG Qinghui[1]

1 *Beijing Milu Ecological Experimental Center, Beijing Academy of Science and Technology, Beijing* 100076, *China*

2 *Institute of Wetlands, Chinese Academy of Forestry, Beijing* 100091, *China*

3 *Beijing Yeya Lake National Wetland Park Administration, Beijing* 102101, *China*

Abstract: The use of herbivore to manage the vegetation balance in nature reserves has great application potential. It can enhance the ecological value of herbivore, change the biodiversity of vegetation, and achieve the goal of ecological balance

基金项目:中央财政林业科技推广示范资金项目(京[2019]TG06);北京市自然科学基金(5212003);北京市财政项目(11000022T00000044075)

收稿日期:2022-09-14; **网络出版日期**:2023-02-03

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: baijiade234@aliyun.com

management in nature reserves by controlling the feeding scale. Based on the above, this paper introduced four milu (2male and 2 female) on June 5, 2021, and adopted a protective ecological grazing method to eliminate the dominant species of reed in Yeya Lake Nature Reserve. According to the implementation of the project, results show that: 1) only harvesting cannot control the growth and expansion of reed. Its effect on plant diversity of phragmites australis was limited, and the structure of phragmites australis was not changed. 2) After the introduction of milu into this area, the overexpansion of cattail and reed was effectively controlled by feeding activities, swimming, lying down, and trampling; One year later, the area of cattails and bulrushes decreased by 21.96%, which provided space for the growth of scallion and hydrogonum, etc., and gradually formed a more diverse wetland environment dominated by reed and cattails. 3) The biodiversity index was further improved by increasing the landscape such as beach land and open water surface, without changing the ecological structure of surrounding floristic wetland. 4) The fauna richness of "vulnerable species" reed in Yeya Lake Wetland decreased from before 3.67 to after 1.97. The migration of milu increased the diversity of vegetation fauna, and the diversity index of reed fauna increased from 0.90 before introduction to 2.11 after introduction. In the first year of Père David's deer's introduction, the vegetation diversity index increased from 0.51 to 0.91. The migration of milu caused a significant decrease in the vegetation uniformity and degree of dominance of reed fauna in Yeya Lake Wetland, from 0.68,0.22 before introduction to 0.36,0.07 after introduction. The aboveground biomass of milu decreased from (2334.78±841.36) g/m^2 to (732.16±245.10) g/m^2. The intake of dry matter per unit area decreased from (201.87±73.11) g/m^2 to (57.65±18.62) g/m^2 after introduction. 64 species, 27 families and 56 genera of wild plants were recorded before introduction. After introduction, total of 76 species, 29 families and 64 genera of wild plants were recorded in this area, which slightly increased the number of plant species compared with that before introduction. The floristic differentiation intensity of the introduced area had no difference. The conservation value index of plant diversity was 8.25 before introduction. After the introduction of 9.06. In conclusion, one year after the introduction of milu. Under the premise of reasonable density control, the impacts were positive basically, which improved the biodiversity and wetland conservation value in the introduction area. Introduction of milu is a better scheme to enhance the diversity and improve the ecological environment of Yeya Lake Wetland. However, the monitoring period of this study is short, and the subsequent effects need to be further studied.

Key Words: conversation grazing; conservational biological control; applied ecology; Père David's deer ex-situ conversation; Yeya Lake Wetland

湿地生态系统是由水、沼泽地、湿地植物、食草动物以及人类等共同塑造的[1]。“优势”种的扩张,给其他生物及栖息地形成的“高压”,是造成“栖息地贫瘠”的主要因素[2],并导致湿地功能、生物多样性的下降,这种现象越来越受到更多学者和湿地管理部门的重视。如何使这些“贫瘠的栖息地”[3]再度恢复平衡和活力,成为湿地管理人员面临的重要难题[4],利用食草动物来管理自然保护地在国外已经很普遍[5]。保护性放牧[6—7]主要通过对食草动物的严格选择、合理管控放牧范围与密度,凭借其特殊的生物学取食特性,利用生态放牧消除法,恢复生态平衡,达到可持续发展的目的。

保护性生物控制[8],主要是根据生态区系资源情况制定保护计划,依托场地条件和“优势”物种的过度扩张,选取不同采食偏好、生理和行为的动植物品种及合适的密度,科学合理制定动物与栖息环境协同保护的有效措施。国外主要有利用如①牛属无犬齿的特性来管理草地,采食时将舌头伸出口外,缠绕在植株上将其拉成一簇簇[9],再用牙齿切割,管理草丛长度和草丛矢面方面可形成多样化的草地景观[10]。牛还擅长穿过灌木丛创造开阔的区域,在改善无脊椎动物栖息地时,它们被认为比绵羊和马更可取;然而,它们的种群规模[11]如果控制不善,可能会导致不同程度的践踏和裸地[10]。②绵羊来管理其他大型动物无法进入的区域非常有用,但需谨慎使用。因它们可食用头状花序,这对于某些保护计划可能不利;绵羊喜欢啃较短的草,它们会将植被连草根拔地而起[12];像牛一样,它们也会造成过度践踏和裸地问题[11]。③小马在未经改良、物种丰富草原的

管理上,具有主要优势[10]。除此之外,马鹿[12]和水牛[10]等动物也被有效地用于保护性放牧管理;通常使不同组合来创造理想的管理效果。保护性放牧不仅限于草原和荒地,它也是林地管理的重要组成部分;在这些条件下,猪、野猪[10]和鹿[12]等动物都是可用的备选动物。

野鸭湖国家湿地公园根据保护区内过度扩张的“芦苇”采取保护性生物控制措施,经过生态保护专家科学论证及实地考察,审慎选择喜食湿地芦苇的麋鹿[13],在控制麋鹿密度、采食区域等一系列措施下,首期示范推广保护区湿地面积 3.13 hm^2,于 2021 年 6 月 5 日,从北京麋鹿生态实验中心引入麋鹿 4 头(2 雄 2 雌)[14]开展芦苇消除实验;通过定位系统对麋鹿进行持续监测。麋鹿[9,15](*Elaphurus davidianus*)是因无上切齿在湿地芦苇植物的保护性生态消除中具有独特的作用,本项目在推进麋鹿保护与湿地生物多样性协同发展,同时为麋鹿保护[16]、湿地生态恢复、湿地遗传多样性保护为一体的联动保护决策机制中起到关键支撑。以往的湿地多样性修复与麋鹿迁地保护[17],是站在两者保护对立的角度出发,尚未见到将动物保护与湿地景观修复规划的协调统一,也尚未见到麋鹿对迁地生物多样性干扰的相关报道,本文麋鹿迁入对野鸭湖生物多样性影响的比较出发,分析保护性放牧对芦苇的消除效果,以期为未来“湿地景观的生物多样性提升”及“濒危麋鹿迁地保护”的一体化方案提供范例。

1　引入麋鹿区域

引入麋鹿区位于北京野鸭湖国家湿地公园的东南角,地处北京市延庆区康庄镇刘浩营村西(40°22′—40°30′ N,115°46′—115°59′ E),由官厅水库延庆辖区及环湖海拔 479 m 以下淹没区/滩涂、河流、库塘、沼泽等组成的自然—人工复合型湿地[18],属温带与中温带、半干旱与半湿润带的过渡带,气候独特,冬冷夏凉;年平均气温 8℃,年日照 2800 h,1 月份平均气温-12.1℃,7 月份平均气温 21.2℃,年降雨量约 636 mm,降雨量集中在 6—9 月份,见图 1。气候适合“脆弱优势物种-芦苇”野蛮生长,威胁到了湿地多样性、湿地功能的进一步提升及湿地生态价值的更好体现。

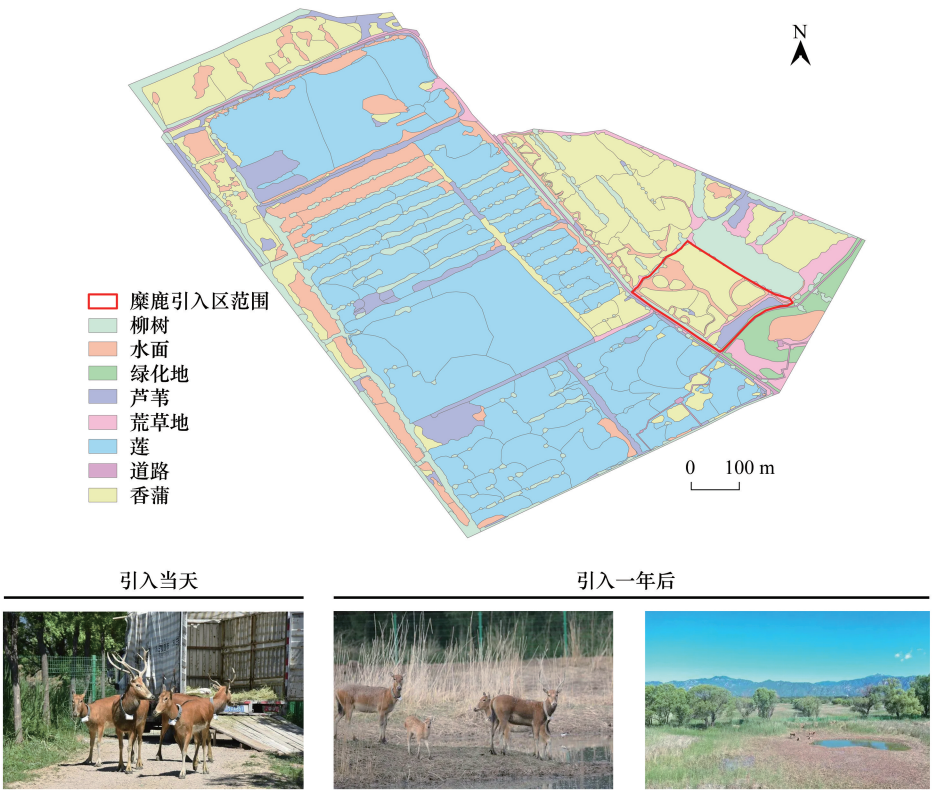

图 1　北京延庆野鸭湖麋鹿引入区域及麋鹿引入当天照片和引入一年后

Fig.1　Zone of introduction by Beijing Yanqing Yeya lake wetland

2 实验方法

2.1 迁地麋鹿情况介绍

本研究所选用的 4 头麋鹿来自北京麋鹿生态实验中心,其中 1#雄性,出生日期 2017 年 3 月 22 日;2#雄性,出生日期 2018 年 4 月 3 日;3#雌性,出生日期 2018 年 3 月 26 日;4#雌性,出生日期 2018 年 3 月 28 日。

2.2 麋鹿迁入前后对野鸭湖景观航拍监测

2020—2021 年,采用无人机航拍麋鹿拟引入及周边区域,定期观测获取引入区地面植被景观数据,分析景观类型、植被构成,以及多样性指数等。

2.3 麋鹿迁入前后对野鸭湖生物多样性监测

2020.6—2022.6,在麋鹿引入区开展植物多样性调查监测。试验根据 25 m×25 m(625 m^2)设置 1 个采样点,将整个引入区共划分为 51 个采样点,每个样点内取 5 个 1 m×1 m 样方(表 1)。记录样方内植物种类、数量、盖度、高度等,分析植物区系结构特征[19]。利用种数/属数、种数/科数、属数/科数的比值,对麋鹿引入前后植物区系分化的强度进行分析[20]。

表 1 取样样方数

Table 1 The number of samples

植被区系 The vegetation flora	莲区系 Lotus flora	杂草区系 Weed flora	香蒲区系 Typha fauna	芦苇区系 Reed fauna	沉水植物区系 Submerged flora
样方数 Samples	13	15	15	5	3

2.4 野鸭湖麋鹿粪样残留植物多样性监测

麋鹿引入后,通过咬痕法判断麋鹿取食,并跟踪麋鹿活动足迹、卧地,对其留下的痕迹进行观察和辨认[14—15]。记录区内被采食植物的种类和部位,确定该区域放养麋鹿的主要食物种类。同时采集粪便样品[15],开展麋鹿粪便的环境 DNA 测序以确定麋鹿的主要取食植物种类及部位(见图 2)。

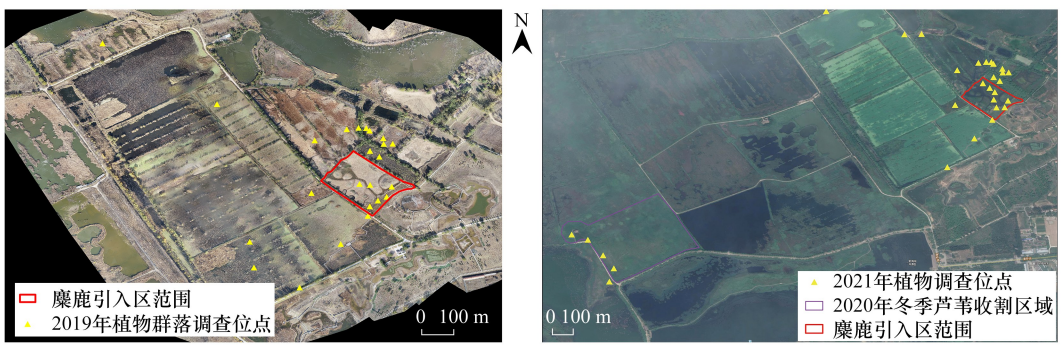

图 2 延庆野鸭湖麋鹿引入前(2020 年)后(2021.6—2022.5)测试样地

Fig.2 Test plots before (2020) and after (2021.6—2022.5) the introduction of Milu deer in Yeya Lake

2.5 数据分析

2021 年 8 月对野鸭湖的麋鹿粪便样本进行采集,通过 DNA 提取和高通量扩增测序,对粪样残留植物叶绿体基因片段 rbcL(CBOL, 2009)进行扩增和比对,并对结果进行 BLAST,在 GenBank 数据库中搜索匹配,依次对麋鹿粪便样本中的残留植物进行分类鉴别[15—16,21—23]。

数据分析运用 Simpson 与 Shannon-Wiener 多样性指数来进行。统计分析采用 SPSS 软件辅助 Excel 实现。多样性分析指标:丰富度[24];Shannon-Wiener 多样性指数[25];Simpson 优势度指数[26];Pielou 均匀度指数[27]。

3　实验结果

3.1　试验期间野鸭湖气候变化

实验搜集和记录 2021.6—2022.5 北京延庆野鸭湖麋鹿引入后的年度逐月均温、降水和蒸发量的数据。具体如下表 2 所示。

表 2　2021.6—2022.5 北京延庆野鸭湖年度均温、降水和蒸发量数据

Table 2　Annual mean temperature, precipitation and evaporation data of Yeya Lake, from 2021.6—2022.5

指标 Index	2021							2022				
	6 月 June	7 月 July	8 月 August	9 月 September	10 月 October	11 月 November	12 月 December	1 月 January	2 月 February	3 月 March	4 月 April	5 月 May
平均温度/℃ Average temperature	21.5	23.5	22.0	18.5	9.0	3.0	-2.0	-5.0	-4.9	5.0	13.0	18.0
降水量/mm Precipitation	252.7	226.7	37.8	30.1	39.4	27.4	4.5	4.4	5.4	5.5	6.2	2.3
蒸发量/mm Evaporation	86.8	144.7	118.2	48.2	21.3	7.5	1.4	1.6	2.1	3.7	4.5	7.8

数据来自延庆区气象局

3.2　麋鹿迁入前后航拍湿地景观植被格局变化

麋鹿引入前(2020 年 5 月—2021 年 6 月):对选定示范区景观进行调查,结果显示,区域内植被以芦苇和香蒲为主,占引入区域总面积的 90.43%。其中香蒲 1.75 hm^2,占总面积的 62.06%;芦苇 0.80 hm^2,占总面积的 28.37%;浅水水域,占总面积 7.09%,其他少量的柳树林斑块分布,占总面积 2.48%。景观多样性指数为 0.99。详见图 3。

麋鹿迁入 1 个月后(2021 年 7 月 3 日):区域植被景观以芦苇和香蒲为主,面积比例为 82.62%;出现了滩涂和裸地景观,面积占比为 5.32%。景观多样性指数为 1.28。

麋鹿迁入 2 个月后(2021 年 8 月 7 日):区域植被景观以芦苇和香蒲为主,面积比例为 73.67%;滩涂面积进一步扩大,占比为 14.23%。景观多样性指数为 1.43。

麋鹿迁入 3 个月后(2021 年 9 月 19 日):区域植被景观仍以芦苇和香蒲为主,面积比例为 70.57%;滩涂面积占比为 16.67%。景观多样性指数为 1.47。见表 3。

表 3　2021 年 6 月—9 月麋鹿引入区主要植被景观组成面积的变化

Table 3　Changes of vegetation landscape area in the introduction of deer from June to September 2021

面积 Acreage/km^2	引入前 Before introduction	6 月 June	7 月 July	8 月 August	9 月 September
芦苇区系 Reed fauna	2.566	8.046	7.912	7.853	7.866
香蒲区系 Typha fauna	17.454	17.557	15.436	12.978	12.155
水面区系 Open water floras	4.991	0.209	0.704	0.858	1.051
柳树区系 Willow fauna	1.533	0.811	0.800	0.764	0.712
紫穗槐区系 Amorpha fruticose fauna	0.000	0.450	0.432	0.423	0.414
荒草地区系 Grassland fauna	1.832	1.369	1.257	1.241	1.204
滩涂区系 Beach area fauna	0.016	0.062	1.544	4.078	4.793
裸地区系 Bare area fauna	0.008	0.059	0.307	0.369	0.423

3.3　麋鹿迁入前后延庆野鸭湖生物多样性变化

3.3.1　麋鹿迁入可降低野鸭湖“脆弱物种”芦苇区系的丰富度

麋鹿引入、取食和踩踏前后对湿地植物群落影响变化对比分析,引入后对芦苇区系及香蒲区系的植被丰富度有较大影响(表 4)。结果显示:芦苇区系的植被丰富度由引入前的(r=3.67)下降到引入后的(r=1.97),

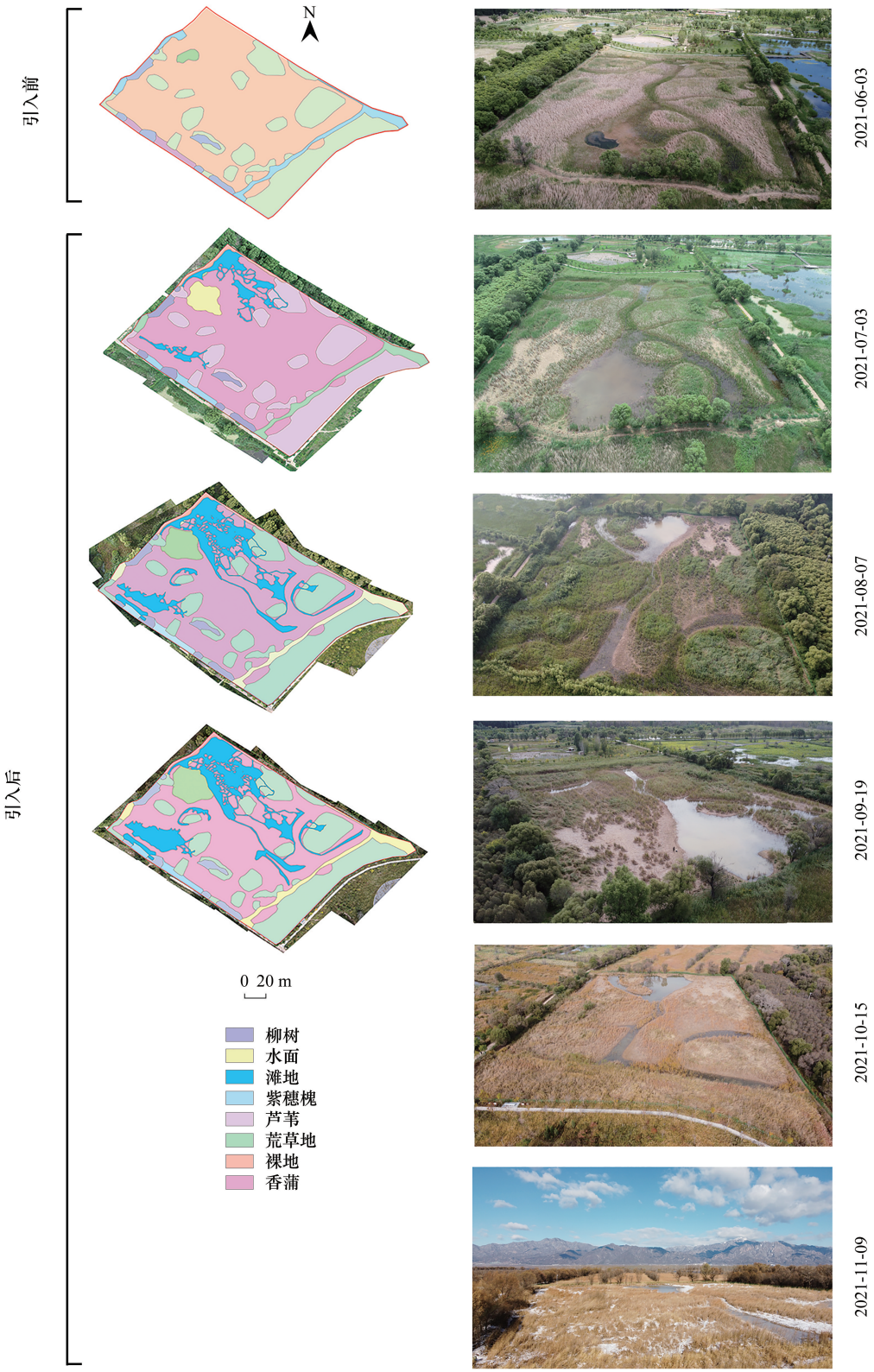

图 3 北京延庆野鸭湖麋鹿引入前后景观植被航拍变化

Fig.3 Changes of landscape vegetation before and after introduction of Milu deer in Yeya Lake

差异极显著($F_{1,5}=3.803, n=5, P=0.0076$)；沉水植物区系植被丰富度由引入前的($r=1.68$)下降到引进后的($r=0.84$)，差异极显著($F_{1,3}=2.945, n=3, P=0.0053$)；香蒲区系的植被丰富度也由引入前的($r=1.10$)下降到

引入后的($r=0.92$),差异显著($F_{1,15}=2.251$,$n=15$,$P=0.0422$)。麋鹿引入前后莲区系($F_{1,13}=0.567$,$n=13$,$P=0.6328$)和杂草区系($F_{1,15}=1.262$,$n=15$,$P=0.4912$)植被丰富度变化无显著影响。

3.3.2　麋鹿迁入可提升野鸭湖植被区系物种多样性

麋鹿迁入前后对野鸭湖植被区系物种多样性指数变化对比分析,引入后对野鸭湖植被生物多样性有一定提升(表 5)。结果显示:芦苇区系的多样性指数由引进前的($r=0.90$)上升到引进后的($r=2.11$),差异极显著($F_{1,5}=3.001$,$n=5$,$P=0.0086$);杂草区系的多样性指数也由引入前的($r=0.76$)到引入后的($r=1.51$),差异极显著($F_{1,15}=2.877$,$n=15$,$P=0.0079$);而沉水植物区系多样指数由引入前的($r=0.33$)上升到引入后的($r=0.43$),差异显著($F_{1,3}=2.035$,$n=3$,$P=0.0416$);麋鹿引入前后对香蒲区系物种多样性指数($F_{1,15}=1.748$,$n=15$,$P=0.0813$)和莲区系物种多样性指数($F_{1,13}=1.608$,$n=13$,$P=0.0920$)无显著影响。麋鹿引入的第一年结果显示,整个引入区域的植被多样性指数由 $r=0.51$ 上升到 $r=0.91$。

3.3.3　麋鹿迁入造成野鸭湖香蒲、芦苇区系植被均匀度下降

麋鹿迁入前后对野鸭湖植被均匀度指数变化对比分析,引入后造成芦苇和香蒲区系植被均匀度下降(表 6)。结果显示:香蒲区系植被均匀度由引入前的($r=0.54$)下降到引入后的($r=0.38$),差异显著($F_{1,15}=2.041$,$n=15$,$P=0.0350$);芦苇区系植被均匀度由引入前的($r=0.68$)下降到引入后的($r=0.36$),差异极显著($F_{1,5}=2.727$,$n=5$,$P=0.0092$)。而杂草区系的均匀度指数则由引入前的($r=0.53$)上升到引入后的($r=0.69$),差异不显著($F_{1,15}=1.671$,$n=15$,$P=0.1201$);沉水植物区系均匀度指数由引入前的($r=0.41$)上升到引入后的($r=0.46$),差异显著($F_{1,3}=1.794$,$n=3$,$P=0.2000$);莲区系的均匀度指数也由引入前的($r=0.90$)上升到到引入后的($r=0.92$),差异不显著($F_{1,13}=1.893$,$n=13$,$P=0.2100$)。

3.3.4　麋鹿迁入造成野鸭湖芦苇区系优势度下降

麋鹿迁入前后对野鸭湖植被优势度指数变化对比分析,引入后造成芦苇区系植被优势度下降(表 7)。芦苇区系植被优势度由引入前的($r=0.22$)下降到引入后的($r=0.07$),差异极显著($F_{1,5}=3.254$,$n=5$,$P=0.0051$);香蒲区系植被优势度由引入前的($r=0.38$)下降到引入后的($r=0.35$),差异不显著($F_{1,15}=1.465$,$n=15$,$P=0.0249$);杂草区系的优势度指数也由引入前的($r=0.20$)到引入后的($r=0.20$),差异不显著($F_{1,15}=1.516$,$n=15$,$P=0.0629$);沉水植物区系优势度指数由引入前的($r=0.34$)下降到引入后的($r=0.30$),差异不显著($F_{1,3}=1.710$,$n=3$,$P=0.1211$);莲区系的优势度指数则由引入前的($r=0.41$)上升到到引入后的($r=0.42$),差异不显著($F_{1,13}=0.652$,$n=13$,$P=0.5220$)。

3.3.5　麋鹿迁入造成野鸭湖地上植物生物量下降

麋鹿迁入前后对野鸭湖地上生物量变化对比分析,引入后造成野鸭湖地上生物量显著下降(表 8)。结果显示:单位面积的地上生物量由引入前的(2334.78 ± 841.36) g/m^{2}下降到引入后的(732.16 ± 245.10) g/m^2,差异极显著($F_{1,51}=4.644$,$n=51$,$P=0.0006$);单位面积的地上可摄入干物质量由引入前的(201.87 ± 73.11) g/m^{2}下降到引入后的(57.65 ± 18.62) g/m^2,差异极显著($F_{1,51}=3.921$,$n=51$,$P=0.0005$)。

3.4　迁入后麋鹿状况监测

3.4.1　麋鹿迁地后活动情况项圈监测

利用定位系统,连续监测的引入麋鹿的活动轨迹(见图 4),4 头麋鹿生存状况良好,2021 年底,1 头母鹿流产,2022 年春新出生幼龄麋鹿 1 头,存活至今。

3.4.2　新迁地麋鹿粪样食物丰度监测

结果显示:野鸭湖麋鹿主要取食植物有 29 种。其中,芦苇、香蒲、大刺儿菜、牛鞭草、苜蓿、山莴苣等植物的取食痕迹较多,取食量较大。不同植物的取食部位不同,如香蒲多啃咬基部茎;芦苇和鬼针草等大部分植物喜欢啃食新生顶芽或较嫩的顶部;苜蓿和胡枝子等则整株取食。

芦苇(*Phragmites australis*,平均相对丰度 53.7%,下同)在野鸭湖麋鹿粪便中的相对含量均接近或超过 40%,扁杆荆三棱(*Bolboschoenusplanicalmis*,17.3%)和小香蒲(*Typhaminima*,15.0%)也都超过10%;禾本科

表 4 北京延庆野鸭湖麋鹿引入前(2020.6—2021.5)后(2021.6—2022.5)区系植被丰富度变化

Table 4 Changes in vegetation richness before (2020.6—2021.5) and after (2021.6—2022.5) introduction of Milu deer in Yanqing, Beijing

引入前 Before introduction	2020							2021				
	6 月 June	7 月 July	8 月 August	9 月 September	10 月 October	11 月 November	12 月 December	1 月 January	2 月 February	3 月 March	4 月 April	5 月 May
莲区系 Lotus flora	1.28±0.10	1.69±0.26	1.74±0.18	1.59±0.18	1.36±0.11	0.75±0.08	0.52±0.05	0.12±0.05	0.17±0.02	0.26±0.08	0.54±0.04	0.83±0.08
杂草区系 Grassland flora	4.61±0.38	5.01±0.49	5.87±0.45	5.11±0.52	3.54±0.33	1.69±0.12	0.83±0.09	0.36±0.05	0.18±0.03	0.22±0.02	0.26±0.03	2.84±0.07
香蒲区系 Typha fauna	1.90±0.12	2.03±0.22	2.11±0.22	1.63±0.18	1.42±0.12	0.93±0.09	0.56±0.05	0.26±0.03	0.14±0.04	0.32±0.03	0.81±0.04	1.31±0.12
芦苇区系 Reed fauna	6.00±0.25	6.60±0.06	6.81±0.61	6.19±0.21	5.23±0.48	3.15±0.03	1.49±0.15	0.67±0.06	0.25±0.06	0.72±0.05	2.48±0.03	4.95±0.02
沉水植物区系 Submerged flora	2.80±0.33	3.08±0.33	3.13±0.33	2.73±0.30	2.26±0.33	1.46±0.14	0.67±0.05	0.24±0.03	0.17±0.02	0.34±0.05	1.65±0.01	2.11±0.22
引入后 After introducing	2021							2022				
	6 月 June	7 月 July	8 月 August	9 月 September	10 月 October	11 月 November	12 月 December	1 月 January	2 月 February	3 月 March	4 月 April	5 月 May
莲区系 Lotus flora	1.12±0.15	1.72±0.20	1.86±0.18	1.66±0.22	1.27±0.13	0.84±0.05	0.61±0.05	0.17±0.02	0.06±0.01	0.31±0.02	0.59±0.06	0.81±0.05
杂草区系 Grassland flora	4.51±0.04	4.71±0.34	5.22±0.52	4.92±0.35	3.36±0.33	1.42±0.15	0.63±0.06	0.42±0.04	0.36±0.02	0.58±0.05	0.76±0.05	3.31±0.03
香蒲区系 Typha fauna	1.34±0.11	1.41±0.12	1.49±0.04	1.45±0.20	1.36±0.13	0.79±0.08	0.46±0.04	0.25±0.02	0.13±0.01	0.36±0.03	0.77±0.06	1.28±0.02
芦苇区系 Reed fauna	2.67±0.03	3.33±0.33	3.19±0.32	2.64±0.30	2.81±0.26	1.81±0.12	0.85±0.05	0.45±0.04	0.12±0.01	0.42±0.04	1.84±0.12	3.62±0.03
沉水植物区系 Submerged flora	1.44±0.16	1.53±0.12	1.55±0.25	1.31±0.13	1.05±0.11	0.76±0.05	0.33±0.03	0.12±0.01	0.05±0.01	0.22±0.02	0.84±0.01	1.14±0.12

http://www.ecologica.cn

表 5　北京延庆野鸭湖麋鹿引入前(2020.6—2021.5)后(2021.6—2022.5)区系植被多样性变化

Table 5　Changes in biodiversity before (2020.6—2021.5) and after (2021.6—2022.5) introduction of Milu deer in Yanqing, Beijing

引入前 Before introduction	2020							2021				
	6 月 June	7 月 July	8 月 August	9 月 September	10 月 October	11 月 November	12 月 December	1 月 January	2 月 February	3 月 March	4 月 April	5 月 May
莲区系 Lotus flora	0.34±0.02	0.36±0.03	0.37±0.05	0.31±0.05	0.28±0.08	0.22±0.05	0.17±0.06	0.12±0.05	0.05±0.01	0.14±0.02	0.26±0.03	0.31±0.02
杂草区系 Grassland flora	1.18±0.12	1.25±0.11	1.21±0.01	1.27±0.04	1.12±0.14	0.71±0.18	0.26±0.05	0.21±0.02	0.13±0.02	0.24±0.02	0.59±0.04	0.92±0.05
香蒲区系 Typha fauna	0.46±0.04	0.45±0.02	0.51±0.04	0.41±0.06	0.33±0.06	0.27±0.04	0.21±0.03	0.15±0.02	0.08±0.06	0.11±0.01	0.32±0.03	0.36±0.05
芦苇区系 Reed fauna	1.32±0.015	1.46±0.02	1.49±0.01	1.33±0.04	1.14±0.09	0.87±0.19	0.51±0.04	0.22±0.02	0.17±0.01	0.31±0.01	0.88±0.05	1.14±0.12
沉水植物区系 Submerged flora	0.62±0.06	0.65±0.05	0.66±0.06	0.52±0.05	0.47±0.08	0.25±0.08	0.18±0.02	0.12±0.01	0.03±0.01	0.09±0.02	0.15±0.01	0.26±0.05
引入后 After introducing	2021							2022				
	6 月 June	7 月 July	8 月 August	9 月 September	10 月 October	11 月 November	12 月 December	1 月 January	2 月 February	3 月 March	4 月 April	5 月 May
莲区系 Lotus flora	0.32±0.03	0.35±0.05	0.33±0.05	0.26±0.03	0.28±0.03	0.21±0.05	0.19±0.05	0.11±0.02	0.06±0.02	0.12±0.01	0.22±0.02	0.28±0.05
杂草区系 Grassland flora	2.22±0.02	2.34±0.05	2.18±0.04	2.35±0.05	2.11±0.21	1.88±0.05	1.53±0.05	0.21±0.02	0.12±0.03	0.44±0.02	1.22±0.05	1.73±0.02
香蒲区系 Typha fauna	0.44±0.06	0.43±0.05	0.42±0.04	0.45±0.04	0.35±0.08	0.26±0.05	0.26±0.06	0.14±0.01	0.06±0.01	0.18±0.02	0.26±0.03	0.31±0.04
芦苇区系 Reed fauna	3.63±0.06	3.77±0.05	3.51±0.08	3.34±0.05	3.14±0.58	1.99±0.08	1.26±0.05	0.44±0.02	0.14±0.01	0.63±0.05	1.44±0.02	2.56±0.04
沉水植物区系 Submerged flora	0.91±0.05	0.77±0.04	0.71±0.05	0.62±0.06	0.54±0.06	0.34±0.05	0.29±0.04	0.14±0.01	0.05±0.01	0.14±0.05	0.18±0.01	0.53±0.08

http://www.ecologica.cn

表 6 延庆野鸭湖麋鹿引入前(2020.6—2021.5)后(2021.6—2022.5)区系植被均匀度变化情况

Table 6 Changes in vegetation evenness before (2020.6—2021.5) and after (2021.6—2022.5) introduction of Milu deer in Yanqing, Beijing

引入前 Before introduction	2020							2021				
	6 月 June	7 月 July	8 月 August	9 月 September	10 月 October	11 月 November	12 月 December	1 月 January	2 月 February	3 月 March	4 月 April	5 月 May
莲区系 Lotus flora	0.92±0.11	0.95±0.10	0.98±0.09	0.93±0.12	0.56±0.05	0.41±0.04	0.31±0.02	0.19±0.01	0.09±0.00	0.14±0.01	0.33±0.02	0.59±0.04
杂草区系 Grassland flora	0.78±0.05	0.85±0.04	0.82±0.04	0.86±0.04	0.84±0.05	0.56±0.04	0.24±0.01	0.15±0.01	0.06±0.02	0.25±0.01	0.46±0.04	0.56±0.05
香蒲区系 Typha fauna	0.57±0.09	0.59±0.01	0.61±0.09	0.57±0.02	0.52±0.05	0.31±0.04	0.26±0.06	0.14±0.02	0.53±0.04	0.91±0.04	0.84±0.11	0.82±0.05
芦苇区系 Reed fauna	0.75±0.12	0.77±0.06	0.76±0.02	0.78±0.04	0.52±0.12	0.32±0.03	0.56±0.05	0.64±0.12	0.75±0.06	0.75±0.07	0.76±0.04	0.77±0.06
沉水植物区系 Submerged flora	0.56±0.01	0.59±0.09	0.58±0.03	0.61±0.11	0.45±0.04	0.32±0.05	0.21±0.01	0.16±0.04	0.12±0.04	0.26±0.01	0.45±0.03	0.56±0.02
引入后 After introducing	2021							2022				
	6 月 June	7 月 July	8 月 August	9 月 September	10 月 October	11 月 November	12 月 December	1 月 January	2 月 February	3 月 March	4 月 April	5 月 May
莲区系 Lotus flora	0.92±0.11	0.94±0.02	0.95±0.06	0.97±0.12	0.62±0.03	0.42±0.03	0.31±0.01	0.26±0.10	0.10±0.02	0.23±0.05	0.37±0.05	0.69±0.14
杂草区系 Grassland flora	0.81±0.13	0.93±0.10	0.90±0.12	0.92±0.26	0.92±0.09	0.86±0.02	0.62±0.04	0.54±0.05	0.36±0.09	0.44±0.06	0.52±0.06	0.71±0.21
香蒲区系 Typha fauna	0.41±0.06	0.51±0.05	0.39±0.04	0.42±0.11	0.38±0.02	0.52±0.03	0.32±0.10	0.21±0.01	0.11±0.05	0.32±0.03	0.46±0.03	0.56±0.13
芦苇区系 Reed fauna	0.46±0.12	0.53±0.00	0.50±0.12	0.46±0.02	0.37±0.04	0.46±0.01	0.28±0.04	0.19±0.02	0.09±0.02	0.25±0.16	0.31±0.05	0.46±0.06
沉水植物区系 Submerged flora	0.61±0.13	0.72±0.05	0.65±0.14	0.64±0.16	0.51±0.10	0.41±0.00	0.29±0.01	0.18±0.00	0.05±0.00	0.21±0.07	0.55±0.08	0.69±0.04

http://www.ecologica.cn

表 7　延庆野鸭湖麋鹿引入前(2020.6—2021.5)后(2021.6—2022.5)区系植被优势度变化情况

Table 7　Changes in Vegetation dominance degree before (2020.6—2021.5) and after (2021.6—2022.5) introduction of Milu deer

引入前 Before introduction	2020							2021				
	6 月 June	7 月 July	8 月 August	9 月 September	10 月 October	11 月 November	12 月 December	1 月 January	2 月 February	3 月 March	4 月 April	5 月 May
莲区系 Lotus flora	0.65±0.06	0.76±0.04	0.78±0.15	0.65±0.12	0.51±0.05	0.41±0.07	0.28±0.04	0.11±0.01	0.06±0.00	0.14±0.02	0.21±0.03	0.45±0.03
杂草区系 Grassland flora	0.32±0.01	0.36±0.11	0.35±0.04	0.29±0.02	0.25±0.02	0.14±0.01	0.09±0.00	0.07±0.00	0.03±0.00	0.12±0.02	0.21±0.02	0.27±0.02
香蒲区系 Typha fauna	0.74±0.04	0.74±0.05	0.75±0.12	0.51±0.12	0.34±0.03	0.25±0.02	0.18±0.01	0.14±0.01	0.04±0.00	0.15±0.01	0.24±0.02	0.51±0.03
芦苇区系 Reed fauna	0.31±0.02	0.32±0.02	0.32±0.03	0.37±0.03	0.28±0.03	0.24±0.03	0.22±0.02	0.14±0.01	0.05±0.00	0.12±0.01	0.18±0.01	0.26±0.01
沉水植物区系 Submerged flora	0.65±0.12	0.63±0.04	0.65±0.06	0.51±0.04	0.42±0.04	0.24±0.01	0.16±0.01	0.12±0.01	0.02±0.00	0.11±0.01	0.29±0.02	0.41±0.02
引入后 After introducing	2021							2022				
	6 月 June	7 月 July	8 月 August	9 月 September	10 月 October	11 月 November	12 月 December	1 月 January	2 月 February	3 月 March	4 月 April	5 月 May
莲区系 Lotus flora	0.62±0.04	0.74±0.11	0.75±0.09	0.65±0.01	0.59±0.02	0.42±0.02	0.25±0.01	0.10±0.00	0.05±0.00	0.09±0.00	0.25±0.01	0.52±0.02
杂草区系 Grassland flora	0.26±0.01	0.36±0.09	0.33±0.04	0.34±0.06	0.24±0.01	0.18±0.01	0.11±0.01	0.14±0.01	0.06±0.00	0.16±0.01	0.22±0.01	0.24±0.01
香蒲区系 Typha fauna	0.61±0.05	0.65±0.02	0.62±0.05	0.51±0.03	0.49±0.04	0.30±0.01	0.16±0.01	0.11±0.00	0.03±0.00	0.11±0.00	0.29±0.02	0.41±0.05
芦苇区系 Reed fauna	0.09±0.01	0.16±0.03	0.08±0.00	0.06±0.00	0.07±0.00	0.08±0.00	0.09±0.00	0.05±0.00	0.04±0.00	0.06±0.00	0.07±0.00	0.08±0.00
沉水植物区系 Submerged flora	0.48±0.04	0.54±0.00	0.52±0.10	0.51±0.06	0.42±0.01	0.27±0.01	0.19±0.01	0.11±0.00	0.02±0.00	0.05±0.00	0.24±0.01	0.33±0.01

http://www.ecologica.cn

表 8　延庆野鸭湖麋鹿引入前(2020.6—2021.5)后(2021.6—2022.5)区系植被生产力变化情况

Table 8　Changes in Vegetation biomass before (2020.6—2021.5) and after (2021.6—2022.5) introduction of Milu deer

引入前 Before introduction	2020							2021				
	6 月 June	7 月 July	8 月 August	9 月 September	10 月 October	11 月 November	12 月 December	1 月 January	2 月 February	3 月 March	4 月 April	5 月 May
地上生物量/(g/m²) Above-ground biomass	3919.84± 652.34	4215.77± 364.21	4571.25± 625.33	4102.59± 521.36	3874.96± 573.21	2159.42± 183.56	821.66± 57.63	351.57± 35.12	86.18± 19.23	294.27± 21.45	1573.64± 123.44	2046.15± 214.63
干物质/(g/m²) Dry matter	342.99± 114.53	378.15± 119.16	413.47± 77.49	373.33± 44.62	329.57± 44.12	174.54± 12.66	70.77± 4.33	31.42± 2.69	7.47± 1.64	26.42± 2.33	143.87± 10.55	130.44± 19.66
引入后 After introducing	2021							2022				
	6 月 June	7 月 July	8 月 August	9 月 September	10 月 October	11 月 November	12 月 December	1 月 January	2 月 February	3 月 March	4 月 April	5 月 May
地上生物量/(g/m²) Above-ground biomass	1274.88± 182.76	1306.49± 302.16	1571.68± 254.25	1203.74± 114.42	1104.55± 161.36	684.26± 61.27	254.49± 22.64	105.69± 11.28	26.44± 6.05	91.33± 7.59	511.12± 40.11	651.24± 68.88
干物质(g/m²) Dry matter	111.55± 14.46	95.54± 28.44	123.73± 22.14	101.75± 10.55	69.06± 12.43	46.34± 5.57	18.61± 3.49	9.57± 1.06	2.23± 0.73	7.19± 0.62	43.20± 3.28	62.99± 5.49

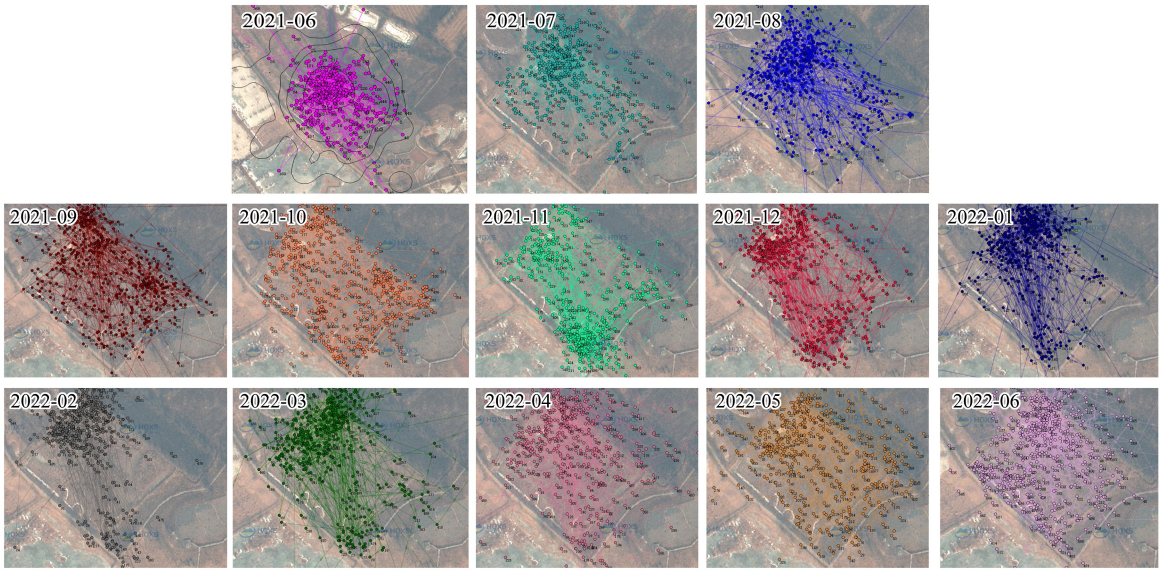

图 4　2021.6—2022.6 延庆野鸭湖麋鹿引入活动情况

Fig.4　Introduction of milu deer in Yeya Lake, Yanqing, 2021.6—2022.6

(54.3%)、莎草科(18.6%)和香蒲科(16.6%)。

3.5　麋鹿迁入后引入区植物区系分化强度分析

种数/属数、种数/科数、属数/科数的比值是对植物区系分化强度的反映[20]。其值低则寡种属多,区系植被较稳定和残遗性强;其值高,则多种属比例,反映区系的物种分化强烈。表 9 可以看出,引入麋鹿可造成试验区域植物区系分化强度有所变化,因本文数据基于麋鹿引入 1 年后的基础数据,经统计学分析,并未表现出差异,本研究还将持续追踪野鸭湖麋鹿引入区域的植被分化情况,以期未来得出更加可靠与合理的结论。

表 9　麋鹿引入前后,引入区植被区系分化强度(种/属、属/科、种/科)

Table 9　Before and after the introduction of Milu deer, the intensity of vegetation floristic differentiation in the introduction area

分化指标 Differentiation index	3 月 March	4 月 April	5 月 May	6 月 June	7 月 July	8 月 August	9 月 September	10 月 October	11 月 November
引入前种/属 Species/genus before introduction	1.08	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14	1.15	1.13	1.00
引入后种/属 Species/genus after introduction	1.08	1.16	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.00
引入前属/科 genus/family before introduction	1.71	1.91	2.24	2.15	2.15	2.15	2.12	1.84	1.80
引入后属/科 genus/family after introduction	1.63	2.04	2.32	2.28	2.24	2.24	2.21	1.93	1.80
引入前种/科 species/family before introduction	1.86	2.17	2.56	2.46	2.46	2.46	2.42	2.08	1.80
引入后种/科 species/family after introduction	1.75	2.38	2.71	2.66	2.62	2.62	2.59	2.26	1.80

3.6　麋鹿迁入后引入区湿地多样性保护价值评估

从野生植物的濒危性、特有性和保护等级等方面开展引入区 2019 和 2021 年野生植物多样性保护价值评价,按照表 10 进行分级赋值,评价方法参考 LY/T2649—2016。结果表明,麋鹿引入前区域的植物多样性保护价值指数为 8.25;麋鹿引入后区域的植物多样性保护价值指数为 9.06,有所提升。

表 10 野生植物的保护重要性评价指标分级赋值标准

Table 10 Classification assignment criteria of conservation importance evaluation index of wild plants

评估指标 Evaluation index	分级赋值 Classification assignment criteria			
	8	4	2	1
濒危性 Endangered	极危	濒危	易危	近危和无危
特有性 Endemism	植物地区特有	植物亚区特有	中国特有	非中国特有
保护等级 Degree of protection	国家一级保护或特殊保护	国家二级保护	地方重点保护	其他

野生植物的濒危性根据《中国生物多样性红色名录—高等植物卷》中不同等级予以分级并赋值,如等;未评估和数据缺乏等按照无危 LC 赋分;植物地区和植被亚区的划分依据中国植物区系分区。特殊保护野生植物是指国家开展的特殊保护工程中包括的野生植物,比如极小种群野生植物拯救保护工程;评价内容仅包括本土物种

4 讨论

4.1 麋鹿引入对植被面积变化的影响

麋鹿引入后,主要通过取食和踩踏活动[14—15]导致了区域芦苇的大量减少,麋鹿活动有效控制了芦苇和香蒲的过度扩张。麋鹿引入 1 年后导致香蒲(下降 30.86%)和芦苇(下降 2.50%)总面积下降了 21.96%,但其减少仍然在一个可控范围内,使麋鹿引入区形成了仍以芦苇和香蒲为主且更为多样的湿地环境。引入区在麋鹿的调控下逐渐改变了滩涂和水域等湿地景观,部分区域植被低矮或者无植被。在水分条件较差的边缘区域由于麋鹿频繁活动,出现了裸地生态系统[28],但面积较小。在麋鹿引入后前两个月麋鹿频繁活动和影响的区域在逐渐扩大[15],并在随后保持相对稳定的状态[29]。

总之,麋鹿引入[14]的影响局限在引入区范围内,且其影响是正向的,并未导致芦苇和香蒲生态区系性质的改变。麋鹿引入发挥了对示范区内湿地植被面积调控的作用[30],为区内其他植被提供了生存空间。

4.2 麋鹿引入对植被多样性的影响

麋鹿引入前评估区共记录到野生植物 64 种,隶属于 27 科 56 属。植物种类组成以原生湿地植物为主[18],没有外来入侵植物和有毒有害植物[31],在路边分布有国家 Ⅱ 级保护植物野生大豆,但是种群数量较小,莲群落以单优势种组成为主,在积水较深的区域形成大面积群落;另外还有芦苇、香蒲、野艾蒿、扁杆荆三棱、山杏、紫苜蓿、大刺儿菜、三棱水葱、牛鞭草、黄花蒿、苦苣菜、车前、狼尾草、千屈菜、乳苣、稗、旋覆花、荻、胡枝子、野大豆、狗尾草、毛连菜、翅果菊、苍耳、草木樨、圆叶牵牛、柳树苗、鬼针草等。

麋鹿引入后该区域共记录到野生植物 76 种,隶属于 29 科 64 属,相比引入前植物种类数量略微上升,可能与调查时间、麋鹿干扰等多种因素有关。麋鹿引入后芦苇和香蒲湿地植被内形成开阔滩涂,为一些植物生长提供了空间[32],同时也便于其他动物的栖息生活[33]。新记录到的植物主要包括钻叶紫菀、泥胡菜、水蓼、长芒稗、小茨藻、三棱水葱、黄花狸藻、薄荷等湿生和水生植物。

4 只麋鹿取食过程的踩踏活动促进芦苇和香蒲区系植物多样性的提高,其 Shannon-Wiener 多样性指数分别由 1.11±0.18 和 0.80±0.31 明显上升为 1.45±0.20 和 1.38±0.22;植物多样性的升高同时导致了其 Simpson 优势度指数的显著降低,以及 Pielou 均匀度指数的显著升高。麋鹿引入明显改变了区内植物群落结构组成[34],麋鹿取食行为显著改变了芦苇群落的地上生物量,麋鹿取食芦苇群落的地上生物量,由对照组的 4001.28±329.68 g/m^2 显著下降为 733.01±41.65 g/m^2。此外,麋鹿取食和活动[15]对香蒲群落的影响有很大的差异,麋鹿活动导致了大量香蒲倒伏,这些区域几乎没有植物生长,地上生物量在 0—15 g/m^2 左右。

综上所述,引入区的湿地植被景观多样性指数进一步提升,早期提升比较明显。麋鹿引入带来的粪便[16],为无脊椎动物提供宝贵资源;同时裸地和滩涂的出现,改变了局部土壤温度,增加了区内昆虫、土壤动物、鸟类等生物多样性,并提升了湿地的保护价值。

4.3 保护性放牧的局限

保护性放牧在正确的时间、以正确的密度使用正确的物种,利用保护性生态消除的方法,通过引入草食动

物的践踏和干扰,消除过度扩张的脆弱植被,营造平衡新气候与裸露土地吸热改善土壤动物的栖息环境[3,4];同时增加的粪便[16]成了某些无脊椎动物的宝贵资源[3],对生态位与生物多样性的增加,及蝴蝶、蜜蜂、蝙蝠和鸟类等造成连锁反应[5];注意栖息地的类型、管理的目的以及选择合适的放牧时间,如在生产力较高、排水良好的土壤,在夏季放牧可能更可取[6];为栖息地类型选择正确的放养密度水平[7]。应用保护放牧现在是一种广泛使用的管理方法,许多保护机构经常使用放牧者来改善和管理生物多样性场所[8]。近年来在保护性放牧方面的研究取得了进展,使这种管理方式得到了进一步的磨练,提高了其有效性,并为生物多样性带来了更大的胜利。

使用食草动物来自然保护地在国外很普遍[7]。景观保护与“基底”物种保护,两者并不冲突,可齐头并进。栖息地内食草动物的生态平衡受到天敌的控制,使植物物种能够随着草食动物在景观中的移动而繁衍生息。随着人类对自然界影响的增加,湿地景观内的草食动物和天敌逐渐被驱逐和替代。这些变化导致个别优势物种的过度扩张和草地贫瘠的问题,以及林地生物多样性的减少[35],最终导致栖息地功能和物种多样性的下降[5]。

应用保护放牧现在是一种广泛使用的管理方法,许多保护机构经常使用放牧者来改善和管理生物多样性。例如,柴郡野生动物信托基金依托英国最大的本土品种长角牛群和 300 多只绵羊,管理着整个赫布里底群岛西北部的野生动物遗址,包括 22 个自然保护区在内的 500 多公顷草地,为草坪所有者节省大量的维护成本。牛的低强度放牧使单一草场转向草本植物马郁兰、百里香、野豌豆和稀有兰花等植物共存,并为蝴蝶和甲虫等动植物创造了丰富的栖息环境。虽然保护性放牧方面取得了一些进展,但这种管理方式仍有其局限性,今后仍需加大研究力度,以便更好的造福生态环境。

5　小结

从项目的实施可以看出:通过引入 4 只麋鹿,对野鸭湖保护区的湿地植被产生了一定影响,有效控制了芦苇和香蒲植被过度扩张,逐渐形成了部分滩涂和水域等湿地景观,提升了生态系统多样性及其保护价值。麋鹿引入为水鸟提供了更适宜的生境,增加了鸟类数量,提升了麋鹿活动区内鸟类多样性及其保护价值;麋鹿引入野鸭湖湿地的各类风险可控。因此,引入麋鹿是野鸭湖湿地生物多样性保护和生态环境改善的较好方案。但本研究监测周期较短,后续影响有待进一步研究。

参考文献(References):

[1] 赵丽侠. 盐沼湿地空间自组织格局形成机理及其生态系统功能[D]. 上海: 华东师范大学, 2020.

[2] Sukumar R. A brief review of the status, distribution and biology of wild Asian elephants *Elephas maximus*. International Zoo Yearbook, 2006, 40(1): 1-8.

[3] Wang Z H, Li Z L, Tang Y J, Yao C X, Liu Y, Jiang G L, Wang F, Liang L, Zhao W L, Zhu G F, Chen M Y. China′s Dams isolate Asian elephants. Science, 2020, 367(6476): 373-374.

[4] 赵新全.草地放牧承载力及食草动物平衡管理原理、技术及途径.2020. https://www.forestry.gov.cn/cys/4/20200912/120945405673162.html

[5] Kristensen J A, Svenning J C, Georgiou K, Malhi Y. Can large herbivores enhance ecosystem carbon persistence? Trends in Ecology & Evolution, 2022, 37(2): 117-128.

[6] Small, R. W. Conservation grazing: delivering habitat management for conservation with livestock. Journal of the Royal Agricultural Society of England, 2010,171(17):38-44.

[7] Simon J.R.Woodward, Graeme C.Wake, Anthony B.Pleasants, David G.McCall. A simple model for optimizing rotational grazing. Agricultural Systems, 1993,41(2):123-155.

[8] Teja Tscharntke, Riccardo Bommarco, Yann Clough, Thomas O. Crist, David Kleijn, Tatyana A. Rand, Jason M. Tylianakis, Saskya van Nouhuys, Stefan Vidal. Conservation biological control and enemy diversity on a landscape scale. Biological Control, 2008, 45(2):238-253.

[9] 孟庆辉, 陈永杏, 白加德, 刘艳菊, 陶秀萍, 刘翀, 董红敏, 郭青云, 钟震宇, 朱佳伟, 孟玉萍, 陈开胜, 成振华. 放牧条件下白牦牛采食的季节性微调整及其效应. 农业工程学报, 2016, 32(18): 219-224.

[10] Animut G, Goetsch A L. Co-grazing of sheep and goats: benefits and constraints. Small Ruminant Research, 2008, 77(2/3): 127-145.

[11] 孟庆辉, 陈永杏, 董红敏, 白加德, 刘艳菊, 郭青云, 成振华. 牦牛分布特点及其种群数量. 家畜生态学报, 2017, 38(3): 80-85.

[12] Dostálek J, Frantík T. Dry grassland plant diversity conservation using low-intensity sheep and goat grazing management: case study in Prague

(Czech Republic). Biodiversity and Conservation, 2008, 17(6): 1439-1454.
[13] 张付贤, 孟庆辉, 蒋志刚, 孟秀祥, 程志斌, 宋苑, 白加德, 丁玉华, 温华军. 麋鹿沧桑命运与未来保护展望. 生态学报, 2022, 42(1): 1-10.
[14] 孟庆辉, 柏超, 宋苑, 单云芳, 李俊芳, 张树苗, 白加德, 钟震宇, 张成林, 孟秀祥. 重引入对麋鹿种群分娩定时及同步化的影响. 兽类学报, 2022, 42(4): 379-386.
[15] 孟庆辉, 宋苑, 单云芳, 李俊芳, 白加德, 孟秀祥, 柏超, 张成林. 雄性麋鹿胆量和侵犯耦合与等级序位变化的关系. 兽类学报, 2022, 42(2): 159-167.
[16] 张树苗, 李夷平, 陈颀, 孟庆辉, 程志斌, 陈星, 白加德. 北京南海子麋鹿苑春季麋鹿粪样皮质醇激素变化及其指示作用. 野生动物学报, 2021, 42(2): 522-527.
[17] 张树苗, 白加德, 刘艳菊, 李夷平, 陈颀, 孟庆辉, 张鹏骞, 胡德夫. 健康麋鹿生长激素测定与分析. 动物医学进展, 2017, 38(8): 63-67.
[18] 熊静. 土壤退化对湿地植被布局的影响建模研究——以野鸭湖公园为例. 环境科学与管理, 2019, 44(8): 165-170.
[19] 向荣伟, 达珍, 吴佳忆, 卜向丽, 王静, 鲁庆斌, 郝映红, 盛岩, 孟秀祥. 北京周边山区狍(Capreolus pygargus)的夏季偏好生境特征. 生态学杂志, 2021, 40(10): 3252-3258.
[20] 沈泽昊, 刘增力, 方精云. 贡嘎山海螺沟冷杉群落物种多样性与群落结构随海拔的变化. 生物多样性, 2004, 12(2): 237-244.
[21] Costea P I, Zeller G, Sunagawa S, Pelletier E, Alberti A, Levenez F, Tramontano M, Driessen M, Hercog R, Jung F E, Kultima J R, Hayward M R, Coelho L P, Allen-Vercoe E, Bertrand L, Blaut M, Brown J R M, Carton T, Cools-Portier S, Daigneault M, Derrien M, Druesne A, de Vos W M, Finlay B B, Flint H J, Guarner F, Hattori M, Heilig H, Luna R A, van Hylckama Vlieg J, Junick J, Klymiuk I, Langella P, Le Chatelier E, Mai V, Manichanh C, Martin J C, Mery C, Morita H, O'Toole P W, Orvain C, Patil K R, Penders J, Persson S, Pons N, Popova M, Salonen A, Saulnier D, Scott K P, Singh B, Slezak K, Veiga P, Versalovic J, Zhao L P, Zoetendal E G, Ehrlich S D, Dore J, Bork P. Towards standards for human fecal sample processing in metagenomic studies. Nature Biotechnology, 2017, 35(11): 1069-1076.
[22] 卜向丽, 王静, 吴佳忆, 孙太福, 向荣伟, 鲁庆斌, 郝映红, 崔绍朋, 盛岩, 孟秀祥. 太行山东北部哺乳动物区系及多样性. 生物多样性, 2021, 29(3): 331-339.
[23] 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.
[24] 肖晨瑶, 赵玉娇, 蔡永华, 程建国, 黎勇, 周密, 孟秀祥. 迁地保育林麝的侵犯性、等级序位及相互关系. 动物学杂志, 2020, 55(2): 134-140.
[25] 韩红金, 乔佳伦, 蔡永华, 程建国, 付文龙, 孟秀祥. 迁地保育林麝行为多样性及影响因素研究. 特产研究, 2018, 40(1): 1-4, 31.
[26] 蔡永华, 孙军平, 杨营, 王静, 付文龙, 朱萍, 郑程莉, 李宁, 石磊, 孟秀祥. 迁地保育林麝体况及影响因素. 生态学报, 2017, 37(5): 1617-1622.
[27] 祁军, 王静, 潘世成, 刘瑞, 孟秀祥. 兴隆山自然保护区优势植物的物候格局对气候变化的响应. 地球环境学报, 2016, 7(3): 269-277.
[28] 郭妍妍, 李红亮, 王朋, 冯金朝, 薛达元, 孟秀祥. 濒危驯鹿(Rangifer tarandus)秋季偏好生境的生态特征. 应用与环境生物学报, 2014, 20(5): 892-898.
[29] 葛小芳, 孟凡露, 王朋, 盛岩, 王卫平, 冯金朝, 薛达元, 孟秀祥. 大兴安岭驯鹿(Rangifer tarandus)的春季生境选择. 生态学报, 2015, 35(15): 5000-5008.
[30] 王朋, 孟凡露, 曾治, 王卫平, 盛岩, 冯金朝, 周宜君, 薛达元, 孟秀祥. 大兴安岭林区驯鹿夏季喜栖生境的生态特征. 应用生态学报, 2014, 25(9): 2529-2535.
[31] 刘洋, 康发功, 马泠桃, 冯金朝, 薛达元, 孟秀祥. 濒危野生马麝(Moschus sifanicus)的迁地保育及分群驯养. 家畜生态学报, 2014, 35(5): 83-86.
[32] 孟庆辉, 刘春兰, 潘世成, 施泽梅, 张学炎, 孟秀祥. 濒危马麝的有效取香率分析. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2011, 39(12): 53-59.
[33] 杨萃, 潘世秀, 安谈红, 马光, 冯金朝, 孟秀祥. 甘肃兴隆山自然保护区马麝冬季生境喜好初步研究. 四川动物, 2011, 30(3): 481-487.
[34] 杨萃, 马光, 孟秀祥, 徐宏发. 凉山山系林麝夏季利用生境特征. 生态学杂志, 2011, 30(1): 18-23.
[35] 潘世秀, 孟秀祥, 冯金朝, 周宜君. 小型林间独栖反刍动物(SSFR)栖息地选择研究进展. 中央民族大学学报: 自然科学版, 2007, 16(2): 166-171, 188.