

圈养雌性大熊猫配种前期粪便质量变化及其与发情和繁殖的关系

陈敏[#] 朱兴永[#] 黄立静 寇洁 吴孔菊 杨奎兴 谢意 李佳
陈欣 王树群 段东琼 陈超 代莎 兰景超* 王也*

珍稀濒危野生动物保护四川省重点实验室, 成都大熊猫繁育研究基地 成都 610081

摘要: 雌性大熊猫 (*Ailuropoda melanoleuca*) 的繁殖管理是大熊猫迁地保护工作的关键。繁殖管理工作的首要难点是判断雌性大熊猫何时启动发情。然而, 目前判断发情状态的方法存在较多局限性: 不仅易受到观察者经验或其他主观因素限制, 而且操作过程复杂、实施成本较高。为解决这一难点, 本研究系统调查了 30 只圈养雌性大熊猫在配种前期一个月内 (自然交配或人工授精当日前一天起向前连续的 31 d) 粪便质量的变化特征, 分析了 38 个记录周期中粪便质量变化与大熊猫发情启动时间点的关系。结果显示: (1) 粪便质量下降拐点出现的时间点比激素启动时间点早约 8 d; (2) 在粪便质量下降拐点到配种当日前第 3 天之间, 粪便质量下降最快的时间点与激素启动时间点重叠; (3) 产仔大熊猫和未产仔大熊猫配种前期一个月内的粪便质量标准差存在显著差异。这些结果为评估圈养雌性大熊猫发情启动时间和繁殖结果提供了新的视角和方法。本研究结果将有助于扩大圈养大熊猫繁殖管理准备窗口, 帮助繁殖管理者精准配置资源以提高大熊猫繁殖成功率, 对其繁殖保护工作具有重要意义。

关键词: 圈养大熊猫; 雌性; 粪便质量变化; 配种前期; 激素启动; 繁殖管理

中图分类号: Q954 文献标识码: A 文章编号: 0250-3263 (2025) 04-542-10

Changes in Pre-Mating Fecal Weight and Their Relationship With Estrus and Reproduction of Captive Female Giant Pandas *Ailuropoda melanoleuca*

CHEN Min[#] ZHU Xing-Yong[#] HUANG Li-Jing KOU Jie WU Kong-Ju YANG Kui-Xing
XIE Yi LI Jia CHEN Xin WANG Shu-Qun DUAN Dong-Qiong CHEN Chao DAI Sha
LAN Jing-Chao* WANG Ye*

The Conservation of Endangered Wildlife Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu Research Base of Giant Panda Breeding,

基金项目 国家林业和草原局项目 (No. CGF2024002), 成都大熊猫繁育研究基金项目 (No. 2021CPB-B05, 2021CPB-B02, 2022CPB-A13, 2024CPB-B13);

* 通讯作者, E-mail: 327617708@qq.com, wangye@panda.org.cn;

第一作者介绍 陈敏, 女, 野保工程师; 研究方向: 野生动物保护; E-mail: 491943384@qq.com;

朱兴永, 男, 硕士; 研究方向: 生物信息学; E-mail: zhuxingyong@foxmail.com.

收稿日期: 2024-10-30, 修回日期: 2025-03-08 DOI: 10.13859/j.cjz.202524246 CSTR: 32109.14.cjz.24246

Chengdu 610081, China

Abstract: [Objectives] The reproduction management of captive female Giant Pandas *Ailuropoda melanoleuca* is crucial for *ex-situ* conservation in Giant Pandas. The primary difficulty in reproduction management is to determine when female Giant Pandas are in estrus. However, the current methods for determining estrus have many limitations, such as susceptibility to observers' experience or other subjective factors, complicated operation, and high costs. This study investigated the changes in daily fecal weight of 30 captive female Giant Pandas during the 31-d pre-mating period (31 d before the day prior to natural mating or artificial insemination) and analyzed their relationship with the estrus initiation, as indicated by changes in estrogen and progesterone levels, aiming to provide a new perspective for assessing estrus initiation and improving reproduction management. **[Methods]** A total of 1 168 fecal samples from 30 captive female pandas (aged 5 - 20 years old) over 38 pre-mating periods were collected daily. The samples obtained at 15:00 and 09:00 the next morning were combined and weighed together as the daily fecal weight by a TCS-150 electronic platform scale (capacity: 150 kg, division: 10 g, accuracy: ± 10 g). Urinary estrogen and progesterone levels were monitored via enzyme-linked immunosorbent assay (ELISA) to determine the date of hormone initiation. Temporal patterns of changes in fecal weight were modeled through 5th-degree polynomial regression (Python 3.10.9 with numpy 1.23.5), with elbow points of the weight decrease identified via the KneeLocator method (Python 3.10.9 with kneed 0.8.3). We employed the Wilcoxon signed-rank test (Python 3.10.9 with scipy 1.10.0) to statistically analyze the changes in fecal weight, with a significance level set at $P < 0.05$. **[Results]** The results showed that (1) the elbow point of fecal weight decrease (17.5 ± 4.8 d before mating) appeared about 8 d earlier than the hormone initiation (9.2 ± 2.3 d before mating) ($T = 6.5, P = 2.0 \times 10^{-7}$). Fig. 2 presented the polynomial curve fitting of changes in fecal weight in the 38 pre-mating periods, and Fig. 2 and Table 1 indicated the elbow points and the time points of hormone initiation; (2) the time of the fastest fecal weight decrease (9.8 ± 5.6 d before mating) between the elbow point and the 3rd day prior to mating coincided with the hormone initiation time, with no significant statistical difference observed ($T = 313.5, P = 0.99$). Table 1 detailed the time points of the fastest fecal weight decrease and hormone initiation; and (3) there was a significant difference in the standard deviation of fecal weights that could be used to distinguish whether Giant Pandas gave birth or not after mating. Specifically, during the phase of stable fecal weight (31 - 18 d before mating) and the phase of fecal weight decrease (17 - 1 d before mating), the P -values were 2.3×10^{-3} and 1.5×10^{-5} , respectively. Fig. 3 illustrated the mean values and standard deviations of daily fecal weight during the 31-d pre-mating period for Giant Pandas that would give birth and those that would not, and Table 2 presented the statistical significance in fecal weight between the two groups. **[Conclusion]** These results provide new perspectives and methods for assessing the timing of estrus initiation and reproductive outcomes in captive female Giant Pandas, which will help to expand the preparation time for reproduction management and improve reproduction success of captive Giant Pandas through precise resource allocation.

Key words: Captive Giant Pandas; Female; Changes in fecal weight; Pre-mating period; Hormone initiation; Reproduction management

动物粪便质量的变化与其生命活动息息相关,能反映出其在饮食、消化和吸收等方面的生理状况(Dierenfeld et al. 1982, 唐平等 1997, 周材权等 1997, Sims et al. 2007, 汤纯香等 2007, 朱爱玲等 2023)。研究表明,粪便质量的变化与动物的发情有有一定关系,动物在发情期往往存在食欲减退的现象(Asarian et al. 2006, Keeley et al. 2012, Laksmi et al. 2020),大熊猫(*Ailuropoda melanoleuca*)也是如此(赵灿南等 1988, McGeehan et al. 2002, 杨波等 2022)。食欲减退导致食物摄入量减少,进而导致粪便量下降。因此,动物的发情状态会对其粪便质量产生一定影响。

圈养雌性大熊猫的繁殖管理对于制定大熊猫迁地保护策略至关重要。准确判断雌性大熊猫的发情启动是繁殖管理的关键步骤,是配种准备工作的重要基础(Swaisgood et al. 2003, 杨波等 2022)。通常采用的判断方法包括:(1)行为观察:雌性大熊猫在发情期前期食欲会减退,活动量会增加,出现咩叫、蹭阴、戏水、嗅气味等行为,其频率会随着发情的进行逐渐增加(Lindburg et al. 2001, McGeehan et al. 2002);(2)外阴检查:雌性大熊猫在发情时,外阴会出现颜色、水肿程度和开口大小的变化;(3)激素水平监测:通过采集雌性大熊猫的尿液或粪便样本,可以测定其体内的性激素水平,包括雌激素和孕激素(McGeehan et al. 2002, Kersey et al. 2010a, b, Cai et al. 2017, Wilson et al. 2019, Huang et al. 2023)。这些激素水平的变化,特别是雌激素和孕酮含量的相对值,常被用作判断雌性大熊猫发情期是否开始的生物学标志。但这些发情程度判断方法存在一些局限性。例如,行为和外阴观察法易受观察者的经验及其他主观因素的影响,而激素监测方法成本较高且操作较复杂。此外,大熊猫在发情后存在假孕现象,即虽未怀孕,但与配种后怀孕大熊猫的行为和激素表现相似(Swaisgood et al. 2003, Zhang et al. 2009, Kersey et al. 2010a, b, Willis et al. 2011, Roberts et al. 2018,

Wilson et al. 2019, 2022),这给大熊猫繁殖管理带来了困难。配种后激素水平和超声监测一定程度上可以对此进行区分,但怀孕大熊猫往往在分娩前一个月内才会表现明显差异(Zhang et al. 2009, Wilson et al. 2019)。因此,研究更客观、经济和易于操作的大熊猫发情启动辅助判断方法,作为对常用方法的补充,对于提高其繁殖成功率和优化迁地保护策略具有重要的科学和实践价值。

本研究系统分析了 30 只圈养雌性大熊猫共计 38 次配种前期粪便质量的变化特征,发现其变化与大熊猫发情启动和配种后产仔可能性存在关联,为圈养雌性大熊猫发情启动的评估以及配种后产仔可能性的预估提供了新的视角和方法,有望在大熊猫繁殖保护工作中起到积极作用。

1 材料与方法

本研究涉及的 30 只圈养雌性大熊猫,年龄范围为 5 至 20 岁,均来源于成都大熊猫繁育研究基地。该基地为大熊猫提供了模拟自然生态环境的圈养条件,包括适宜的活动环境和空间。每只大熊猫的室内圈舍由单间不低于 8 m² 的两间兽舍相连组成,室外活动场的面积在 500 m² 以上,以确保它们有足够的空间进行休息和活动(张志和等 2006)。所有参与自然交配或人工授精的大熊猫健康状况良好。大熊猫主要食物投喂方式为:竹子或竹笋少量多次投喂,满足其日常需求;窝窝头每日分 11:00 时和 14:30 时两次投喂;苹果为 300 g/d,在 14:30 时投喂。

1.1 粪便与尿液样本的采集与处理

大熊猫粪便样本和尿液样本的采集遵循非损伤性原则。

每只大熊猫 24 h 排出的粪便分两次(当日 15:00 时与次日 9:00 时)收集。当日 15:00 时收集粪便后装入塑料袋中封闭保存,次日 9:00 时再次收集,然后用 TCS-150 型电子台秤(上海浦春计量仪器有限公司,量程 150 kg,分度值 10 g,误差 ± 10 g)一起称重,作为当日该

大熊猫的粪便质量。

在非发情季节, 当观察到雌性大熊猫出现食欲减退、粪便量减少、活动量增加以及标记和蹭阴等生理行为时, 表示可能即将发情, 即收集尿液样本进行激素检测。采用一次性注射器从水泥地面上吸取大熊猫的新鲜尿液, 将 1~2 ml 转移至无菌塑料试管中并标记好相应个体及采样时间, 存放于 -20 °C 的冰箱冷冻保存, 以备后续激素检测。使用酶联免疫吸附试验 (enzyme-linked immunosorbent assay, ELISA) 测定尿液样本中的雌激素和孕酮水平。在发情季节, 对于计划进行配种的雌性大熊猫, 每周进行一次尿液样本的雌激素和孕酮检测; 一旦观察到发情行为, 检测频率增至每周两次; 激素启动后 (激素水平开始逐渐向发情高峰发展), 每日进行一次检测; 而在发情高峰期, 则每 4 h 进行一次检测。

1.2 数据整理

本研究采用回顾性研究方法, 所分析的数据集涵盖了 2019 年 1 月至 2021 年 5 月的时间段, 共收集了 38 次配种前期的粪便质量记录, 总计 1 168 份粪便样本。研究中涉及的数据指标包括: (1) 配种当日前一天起向前连续 31 d 的每日粪便质量 (kg); (2) 激素启动时间, 指雌激素水平持续上升的首日, 且满足以下条件: 雌激素水平介于 10~20 $\mu\text{g/g}$ 且孕酮水平小于等于 10 $\mu\text{g/g}$, 或者雌激素水平小于等于 10 $\mu\text{g/g}$ 且雌孕激素比值不低于 1; (3) 配种后产仔情况, 包括 17 例成功产仔的记录和 21 例未能产仔的记录。

1.3 数据拟合方法

本研究采用最小二乘法对配种前天数 (x , 单位 d) 和粪便质量 (y , 单位 kg) 进行多项式拟合。多项式的次数设定选项为 1 至 15, 以决定系数 (R^2) 作为拟合结果的评分标准。对 38 组记录的粪便质量数据及其对应的配种前天数在每一个多项式次数下分别进行拟合, 然后评分, 随后计算在每一个多项式次数下这 38 个评分的平均值和标准差。将平均值大于 0.8 且标

准差小于 0.1 的最小次数作为最佳拟合结果。基于该最佳拟合结果, 采用 Python 库 kneed 中的 KneeLocator 方法 (Satopaa et al. 2011) 计算粪便质量的下降拐点。接下来, 通过限定在拐点至配种当日前第 3 天之间, 且 x 值取整数, 确定粪便质量下降最快时的配种前天数。通过比较不同 x 值对应的多项式的斜率, 选取斜率最小的 x 值作为粪便质量下降最快时的配种前天数。

1.4 数据统计分析

对粪便质量下降拐点时间、粪便质量下降最快时的配种前天数和激素启动时间进行统计分析, 计算其平均值和标准差, 分别比较粪便质量下降拐点、粪便质量下降最快时的配种前天数与激素启动时间的差异性; 将大熊猫分成产仔组和未产仔组, 以粪便质量下降拐点为分界线划分粪便质量稳定期和下降期两个阶段, 采用 Wilcoxon 符号秩检验 (Rey et al. 2011) 比较这两组大熊猫在配种前期不同阶段的粪便质量平均值和标准差的差异性, 显著性水平为 $P < 0.05$ 。

使用 Python 3.10.9 (Van Rossum et al. 2009) 及以下库进行数据分析: pandas 1.5.3 (McKinney 2010) 用于数据读取, numpy 1.23.5 (Harris et al. 2020) 用于数值计算和粪便质量多项式拟合, matplotlib 3.7.0 (Hunter 2007) 用于数据可视化, kneed 0.8.3 (Satopaa et al. 2011) 用于确定粪便质量下降拐点, scipy 1.10.0 (Virtanen et al. 2020) 用于 Wilcoxon 符号秩检验。数据以平均值 \pm 标准差表示。

2 结果

2.1 多项式拟合次数的选择

大熊猫粪便质量为 (8.5 ± 6.2) kg (0~33 kg)。雌性大熊猫粪便质量多项式拟合次数的选择过程如图 1 所示。随着多项式次数的增加, R^2 的平均值逐渐增大, 标准差逐渐减小。当平均值大于 0.8 且标准差小于 0.1 时, 选择最小的次数 5 用于多项式拟合。

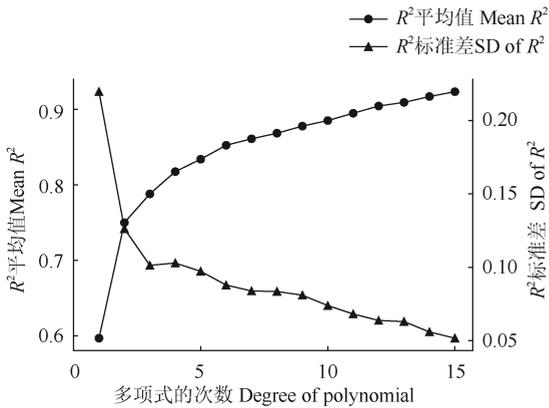


图1 多项式的次数对雌性大熊猫粪便质量拟合的决定系数 (R^2) 的影响

Fig. 1 Determination coefficients (R^2) of fitting fecal weight of female Giant Pandas *Ailuropoda melanoleuca* with different degrees of polynomials

2.2 粪便质量变化时间点

多项式拟合结果见图2。基于多项式计算,粪便质量下降拐点出现在配种前(17.5 ± 4.8)d,早于激素启动时间,即配种前(9.2 ± 2.3)d,可提前约8d预示激素启动的到来(图2,表1),且两者存在显著差异($T = 6.5, P = 2.0 \times 10^{-7}$)。在拐点到配种前第3天之间,粪便质量下降最快时的配种前天数为(9.8 ± 5.6)d,与激素启动时间相近($T = 313.5, P = 0.99$)。

2.3 产仔与未产仔大熊猫配种前粪便质量的比较

本研究38次记录中有21次未产仔,占比达55%。鉴于此,本研究比较了产仔与未产仔大熊猫配种前每日粪便质量的差异性。如图3a所示,两者的粪便质量变化趋势相近,即在初始阶段保持相对稳定,随后逐步下降。进一步比较发现,两者的平均值接近,但产仔大熊猫的粪便质量标准差普遍大于未产仔大熊猫。为了进一步确认该特征,以粪便质量下降拐点将时间划分后得到两个阶段:第一阶段为配种前第31天至配种前第18天的粪便质量稳定期;第二阶段为配种前第17天至配种前第1天的粪便质量下降期。在第一阶段,产仔与未产仔的

大熊猫粪便平均质量分别为(10.9 ± 6.6)kg与(11.0 ± 5.5)kg。在第二阶段,产仔与未产仔的大熊猫粪便平均质量分别为(6.6 ± 6.5)kg与(6.2 ± 4.6)kg。在各自阶段内,产仔与未产仔的大熊猫的粪便质量平均值相近,但标准差相差较大。进一步采用Wilcoxon符号秩检验对各自阶段内每日粪便质量平均值和标准差进行差异分析,在这两个阶段中,产仔与未产仔大熊猫粪便质量的平均值相近($P > 0.05$),但产仔大熊猫粪便质量的标准差较未产仔的大($P < 0.05$) (表2)。总之,无论是在拐点前还是在拐点后,产仔大熊猫的粪便质量分布范围相比未产仔的较大,但平均值无显著差异。

此外,产仔与未产仔大熊猫每日粪便质量标准差的差值分布显示(图3b),在配种前天数约21~10d,即粪便质量下降拐点[配种前(17.5 ± 4.8)d]附近,产仔大熊猫粪便质量标准差较大,明显高于未产仔组。

3 讨论

本研究结果显示,雌性大熊猫粪便质量下降拐点[配种前(17.5 ± 4.8)d]较激素启动[配种前(9.2 ± 2.3)d]提前约8d,可以提早预示激素启动的到来,为激素启动监测提前做好准备,从而优化配种前期监测和繁殖管理。激素启动由雌激素值与孕酮值相对大小共同确定。雌激素往往对食欲有抑制作用,而孕酮正好相反(Geary 1998, Asarian et al 2006, Hirschberg 2012, Dragano et al. 2020, Vigil et al. 2022)。雌激素上升和孕酮下降可能使得大熊猫进食减少,导致配种前期粪便质量下降。孕酮也可以刺激食欲和进食(Asarian et al. 2006, Hirschberg 2012)。Wilson等(2022)研究了雌性大熊猫在发情周期中雄激素含量的变化,发现孕酮下降与雌激素上升的交叉点比雌激素和孕酮变化的交叉点所提示的发情启动提前约4d。虽然该结果将发情启动信号进一步向前推移至发情高峰前14~13d(Wilson et al. 2022),但粪便质量下降拐点仍然稍靠前。发情启动之前,雌

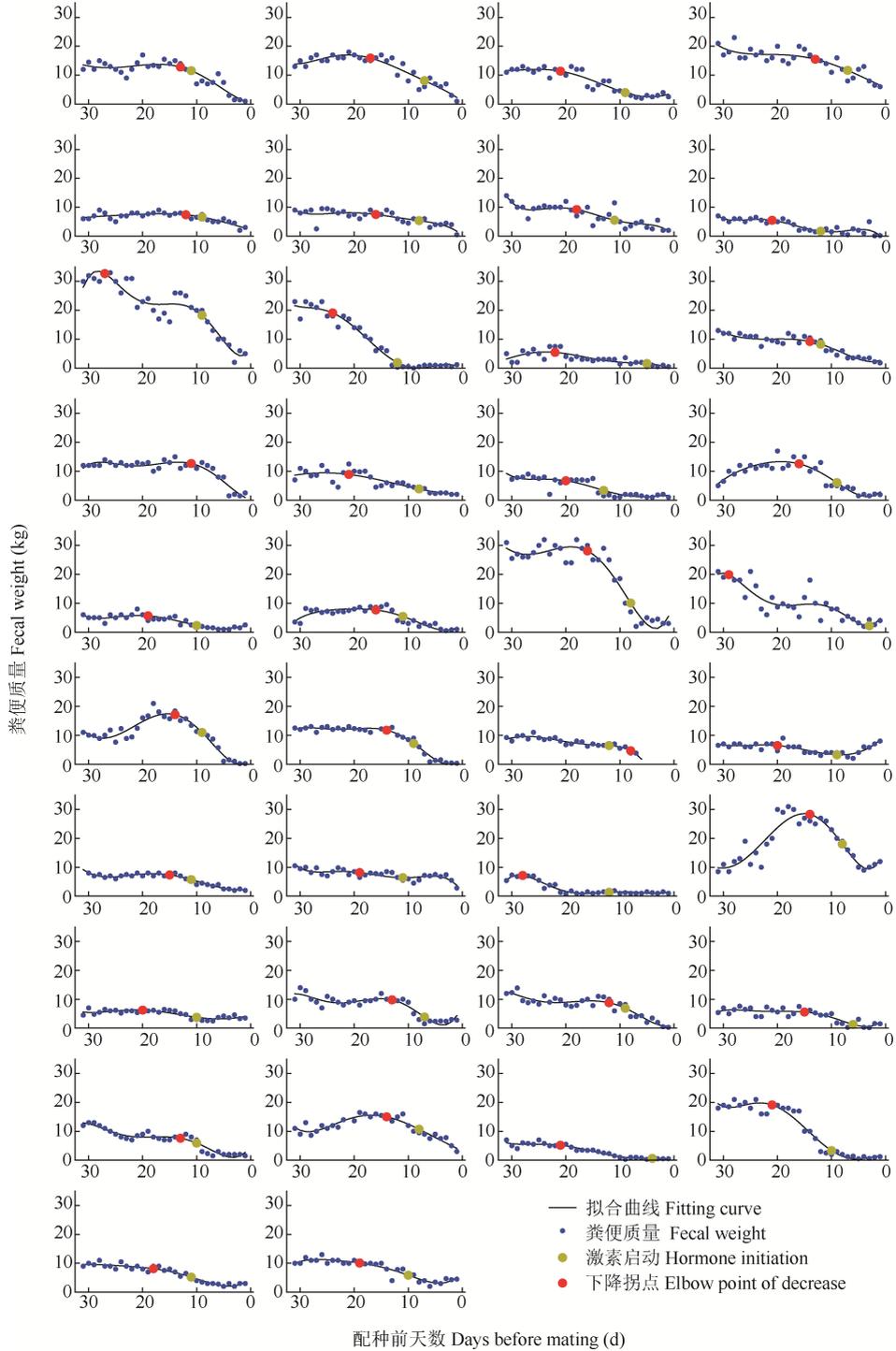


图 2 雌性大熊猫配种前 31 d 的粪便质量变化

Fig. 2 Changes in fecal weight of female Giant Pandas *Ailuropoda melanoleuca* during the 31 d pre-mating period

38 个子图分别表示 38 次配种前期的粪便质量变化趋势。

The 38 panels represent the changes in fecal weight in 38 pre-mating periods.

表 1 雌性大熊猫激素启动时间、粪便质量下降拐点时间及下降最快处时间

Table 1 Time of hormone initiation, elbow point, and the fastest fecal weight decrease in female Giant Pandas

Ailuropoda melanoleuca

序号 No.	激素启动距配种天数 Days between hormone initiation and mating (d)	拐点距配种天数 Days between elbow point and mating (d)	下降最快处距配种天数* Days with the fastest fecal weight decrease before mating* (d)
1	11	13	5
2	7	17	3
3	9	21	13
4	7	13	3
5	9	12	3
6	8	16	3
7	11	18	14
8	12	21	17
9	9	27	6
10	12	24	17
11	5	22	17
12	12	14	8
13	11	11	4
14	8	21	12
15	13	20	14
16	9	16	9
17	10	19	12
18	11	16	8
19	8	16	9
20	3	29	26
21	9	14	7
22	9	14	7
23	12	8	3
24	9	20	14
25	11	15	9
26	11	19	3
27	12	28	24
28	8	14	8
29	10	20	13
30	7	13	8
31	9	12	6
32	6	15	8
33	10	13	7
34	8	14	5
35	4	21	15
36	10	21	14
37	11	18	10
38	10	19	10
平均值 Mean	9.2	17.5	9.8
标准差 SD	2.3	4.8	5.6

* 拐点与配种前第 3 天之间粪便质量下降最快时的配种前天数。

* Days with the fastest fecal weight decrease between the elbow point and the 3rd day before mating.

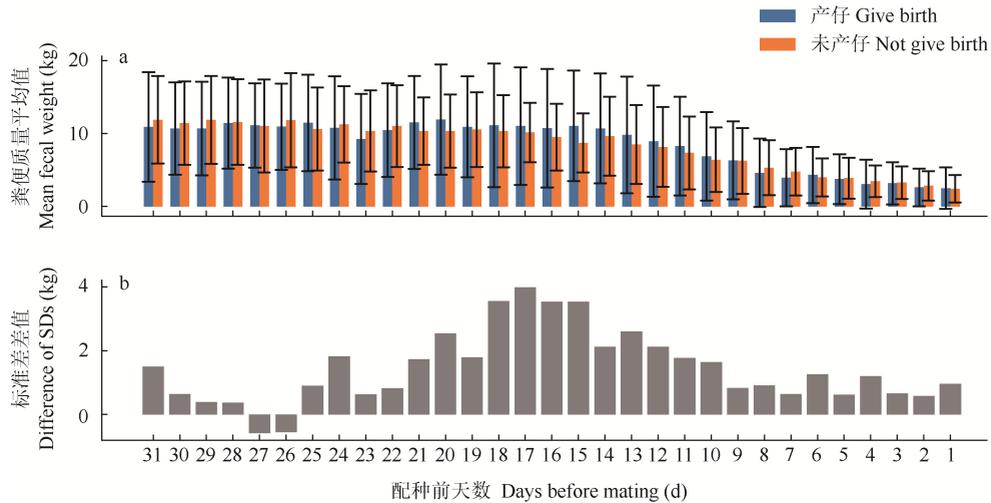


图3 产仔与未产仔大熊猫在配种前31 d的每日粪便质量

Fig. 3 Daily fecal weights of Giant Pandas *Ailuropoda melanoleuca* that give birth and those that do not during the 31 d pre-mating period

a. 每日粪便质量平均值和标准差; b. 产仔与未产仔大熊猫每日粪便质量标准差之差。

a. Mean and standard deviation (SD) of daily fecal weight; b. Difference in the SDs of daily fecal weight between Giant Pandas that give birth and those that do not.

表2 产仔与未产仔大熊猫在配种前粪便质量的差异显著性

Table 2 Significance of fecal weight differences between Giant Pandas *Ailuropoda melanoleuca* that give birth and those that do not

配种前天数 (d) Days before mating	粪便质量平均值差异显著性* Significance of difference in mean fecal weight*	粪便质量标准差差异显著性* Significance of difference in SD of fecal weight*
31 - 18	$T = 45, P = 0.670$	$T = 7, P = 0.002$
17 - 1	$T = 39, P = 0.080$	$T = 0, P < 0.001$

*Wilcoxon 符号秩检验。T 表示 Wilcoxon 符号秩检验的统计量。

* Wilcoxon signed-rank test. T indicated Wilcoxon signed-rank statistics.

激素、孕激素和睾酮等性激素在稍早时候的轻微变化可能已经对大熊猫的进食行为产生了影响，导致其粪便质量下降。然而，粪便量减少也可能由其他原因产生，例如粪便质量的正常波动、饮食的改变、环境的变化和健康状况的影响等，因此应充分结合常规的发情启动评估方法来综合分析粪便质量下降预示的现象。激素启动与粪便质量下降最快时的时间相重叠，并无显著差异，由此可以推测，激素启动与粪便质量快速减少可能存在关联。此时，雌激素

上升、孕酮和雄激素下降较明显 (Wilson et al. 2022)，这些性激素含量变化的综合效应可能对大熊猫行为影响较大。但需注意，尽管本研究基于有限的数据集得出了激素启动与粪便质量下降之间存在潜在关联的统计结果，但不能确立两者之间的直接因果关系。

产仔与未产仔大熊猫配种前粪便质量平均值相近，但标准差存在显著差异，特别是在粪便质量下降拐点前后，产仔大熊猫每日粪便质量分布范围明显大于未产仔的大熊猫 (图3)。

该现象可能反映了能够怀孕的大熊猫在配种前期一个月内分泌更加不稳定,对饮食量和排泄量的波动造成了影响,但具体的机制尚不清楚。大熊猫存在假孕现象,圈养过程中常常做足了配种工作也未能产仔,这给大熊猫繁殖管理带来了挑战。大熊猫怀孕和假孕的表现非常相近,导致难以精准配置合适的资源对怀孕大熊猫进行特别管理。一些研究探讨了大熊猫发情或交配后的激素水平变化对怀孕与否的区分能力 (Swaisgood et al. 2003, Willis et al. 2011, Cai et al. 2017, Roberts et al. 2018, Wilson et al. 2019, 2022)。本研究的发现提示,在配种前期通过监测大熊猫粪便质量的波动,可以对其能否怀孕进行早期预估。这将有助于大熊猫繁殖管理人员更精准地投入资源,提高大熊猫繁殖成功率。不过,粪便的质量波动是否可以作为大熊猫繁殖管理的有效指标,未来需要更深入的研究来验证。

本研究发现,雌性大熊猫配种前一个月每日粪便质量的变化与其发情启动和配种后产仔可能性存在关联。粪便质量下降的出现可以预示约 8 d 后激素启动的来临,可提早为大熊猫繁殖管理做准备。激素启动与粪便质量快速减少时间重叠,可能反映了雌激素、孕酮和雄激素等性激素含量对大熊猫排泄量变化的显著影响。此外,产仔大熊猫配种前每日粪便质量分布范围较未产仔的大,可能与其内分泌较大的波动存在关系。然而,由于样本量限制,本研究也存在一定的局限性。首先,未来需要对样本量进行扩充,以验证研究结果的稳定性;其次,需要研究粪便质量变化与其他因素之间的关系,以进一步提高粪便质量变化作为发情启动判断的准确性;此外,本研究结果为统计学结论,可作为繁殖管理的参考,但对个体熊猫的管理,仍需要就该熊猫在配种前期内分泌、形态和行为等的综合表现进行具体分析。综上,本研究为圈养雌性大熊猫配种前期的评估以及配种后产仔可能性预估提供了新的视角和方法,扩大了圈养繁殖管理的准备窗口,有利于

更加精准地配置资源以提高繁殖成功率,有望在大熊猫繁殖保护工作中起到积极作用。未来的研究可以进一步深入探究粪便质量在配种前期变化的机制,并结合更多的数据和技术手段,为大熊猫的繁殖计划提供更为精确的指导。

参 考 文 献

- Asarian L, Geary N. 2006. Modulation of appetite by gonadal steroid hormones. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 361(1471): 1251–1263.
- Cai K, Yie S, Zhang Z, et al. 2017. Urinary profiles of luteinizing hormone, estrogen and progesterone during the estrous and gestational periods in Giant Pandas (*Ailuropda melanoleuca*). *Scientific Reports*, 7: 40749.
- Dierenfeld E S, Hintz H F, Robertson J B, et al. 1982. Utilization of Bamboo by the Giant Panda. *The Journal of Nutrition*, 112(4): 636–641.
- Dragano N, Milbank E, López M. 2020. Estradiol and appetite: to eat or not to eat. *Molecular Metabolism*, 42: 101061.
- Geary N. 1998. The effect of estrogen on appetite. *Medscape Women's Health*, 3(6): 3.
- Harris C R, Millman K J, Van Der Walt S J, et al. 2020. Array programming with NumPy. *Nature*, 585: 357–362.
- Hirschberg A L. 2012. Sex hormones, appetite and eating behaviour in women. *Maturitas*, 71(3): 248–256.
- Huang H, Chen S, Feng Y, et al. 2023. Genetic parameter estimates for estrus duration and urinary hormone levels in captive female Giant Pandas. *Mammalian Biology*, 103(5): 543–548.
- Hunter J D. 2007. Matplotlib: A 2D graphics environment. *Computing in Science & Engineering*, 9(3): 90–95.
- Keeley T, O'Brien J K, Fanson B G, et al. 2012. The reproductive cycle of the Tasmanian Devil (*Sarcophilus harrisi*) and factors associated with reproductive success in captivity. *General and Comparative Endocrinology*, 176(2): 182–191.
- Kersey D C, Wildt D E, Brown J L, et al. 2010a. Unique biphasic progesterone profile in parturient and non-parturient Giant Pandas (*Ailuropoda melanoleuca*) as determined by faecal hormone monitoring. *Reproduction*, 140(1): 183–193.

- Kersey D C., Wildt D E, Brown J L, et al. 2010b. Endocrine milieu of perioestrus in the Giant Panda (*Ailuropoda melanoleuca*), as determined by non-invasive hormone measures. *Reproduction, Fertility, and Development*, 22(6): 901–912.
- Laksmi D N D I, Trilaksana I G N B. 2020. The change in external genital and estrogen level of Bali Cattle during estrus. *Journal of Veterinary and Animal Sciences*, 3(1): 40–50.
- Lindburg D G, Czekala N M, Swaisgood R R. 2001. Hormonal and behavioral relationships during estrus in the Giant Panda. *Zoo Biology*, 20(6): 537–543.
- McGeehan L, Li X, Jackintell L, et al. 2002. Hormonal and behavioral correlates of estrus in captive Giant Pandas. *Zoo Biology*, 21(5): 449–466.
- McKinney W. 2010. Data structures for statistical computing in Python // van der Walt S, Millman J. *Proceedings of the 9th Python in Science Conference (SciPy 2010)*. Austin, Texas, 56–61.
- Rey D, Neuhäuser M. 2011. Wilcoxon-Signed-Rank Test // Lovric M. *International Encyclopedia of Statistical Science*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 1658–1659.
- Roberts B M, Brown J L, Kersey D C, et al. 2018. Use of urinary 13, 14, dihydro-15-keto-prostaglandin F_{2α} (PGFM) concentrations to diagnose pregnancy and predict parturition in the Giant Panda (*Ailuropoda melanoleuca*). *PLoS One*, 13(5): e0195599.
- Satopaa V, Albrecht J, Irwin D, et al. 2011. Finding a “Kneedle” in a Haystack: Detecting knee points in system behavior // 2011 31st International Conference on Distributed Computing Systems Workshops. Minneapolis, MN, USA: IEEE; 166–171.
- Sims J A, Parsons J L, Bissell H A, et al. 2007. Determination of bamboo-diet digestibility and fecal output by Giant Pandas. *Ursus*, 18(1): 38–45.
- Swaisgood R R, Zhou X, Zhang G, et al. 2003. Application of behavioral knowledge to conservation in the Giant Panda. *International Journal of Comparative Psychology*, 16(2): 65–84.
- Van Rossum G, Drake F L. 2009. *Python 3 Reference Manual*. Scotts Valley, CA: CreateSpace.
- Vigil P, Meléndez J, Petkovic G, et al. 2022. The importance of estradiol for body weight regulation in women. *Frontiers in Endocrinology*, 13: 951186.
- Virtanen P, Gommers R, Oliphant TE, et al. 2020. SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python. *Nature Methods*, 17(3): 261–272.
- Willis E L, Kersey D C, Durrant B S, et al. 2011. The acute phase protein ceruloplasmin as a non-invasive marker of pseudopregnancy, pregnancy, and pregnancy loss in the Giant Panda. *PLoS One*, 6(7): e21159.
- Wilson K S, Li D, Valentine I, et al. 2022. The novel use of urinary androgens to optimise detection of the fertile window in Giant Pandas. *Reproduction and Fertility*, 3(3): 122–132.
- Wilson K S, Wauters J, Valentine I, et al. 2019. Urinary estrogens as a non-invasive biomarker of viable pregnancy in the Giant Panda (*Ailuropoda melanoleuca*). *Scientific Reports*, 9(1): 12772.
- Zhang H, Li D, Wang C, et al. 2009. Delayed implantation in Giant Pandas: the first comprehensive empirical evidence. *Reproduction*, 138(6): 979–986.
- 杨纯香, 许尔兴, 汤洋, 等. 2007. 大熊猫迁居碧峰峡新生境的适应能力研究. *应用与环境生物学报*, 13(5): 686–690.
- 唐平, 周昂, 李操, 等. 1997. 冶勒自然保护区大熊猫摄食行为及营养初探. *四川师范学院学报: 自然科学版*, 18(1): 1–4.
- 杨波, 赖燕舞, 周强, 等. 2022. 圈养雌性大熊猫发情及排卵监测方法论述及展望. *四川动物*, 41(3): 348–360.
- 张志和, 魏辅文. 2006. *大熊猫迁地保护: 理论与实践*. 北京: 科学出版社, 60–61.
- 赵灿南, 王鹏彦, 张和民, 等. 1988. 大熊猫发情期繁殖行为的研究. *南充师院学报: 自然科学版*, 9(4): 288–294.
- 周材权, 胡锦涛, 袁重桂, 等. 1997. 马边大风顶自然保护区大熊猫的食性与采食行为. *四川师范学院学报: 自然科学版*, 18(4): 273–277.
- 朱爱玲, 张亚兰, 孙伟敏, 等. 2023. 亚成体大熊猫的成长分析. *浙江畜牧兽医*, 48(1): 3–7.