DOI: 10.20103/j.stxb.202502280430

徐小博, 田哲豪, 佟一杰, 王加亭, 唐士明, 朱慧, 王新谱, 白明. 粪甲虫衰减与草地生态系统健康的关联以及应对策略. 生态学报, 2025, 45(22):

Xu X B, Tian Z H, Tong Y J, Wang J T, Tang S M, Zhu H, Wang X P, Bai M. The association between dung beetle decline and grassland ecosystem health: Strategies for mitigation. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(22):

粪甲虫衰减与草地生态系统健康的关联以及应对策略

徐小博^{1,2}, 田哲豪^{1,2}, 佟一杰², 王加亭³, 唐士明⁴, 朱 慧⁵, 王新谱^{6,*}, 白 明²

1 宁夏大学林业与草业学院, 银川 750021

2 中国科学院动物研究所, 动物多样性保护与有害动物防控全国重点实验室, 北京 100101

3 全国畜牧总站, 北京 100125

4 中国农业科学院草原研究所, 农业农村部饲草高效生产模式创新重点实验室, 呼和浩特 010021

5 东北师范大学生命科学学院, 植被生态科学教育部重点实验室, 吉林松嫩草地生态系统国家野外科学观测研究站, 长春 130024

6 宁夏大学农学院, 银川 750021

摘要: 粪甲虫作为草地生态系统的关键分解者, 通过加速粪便分解、促进土壤养分循环和植被生长维持草地健康。然而, 集约化放牧、化学农药滥用及栖息地破坏导致其种群数量与多样性显著下降。本文系统综述了粪甲虫的生态功能及其全球范围内的种群衰退, 发现粪甲虫功能多样性对粪便清除率的贡献高于物种多样性, 而伊维菌素等药物残留可使其繁殖率下降, 导致粪便分解速率降低, 进而引发地表积粪污染加剧、温室气体排放量增加等连锁生态问题。全球案例表明, 保护性引种计划可恢复粪甲虫功能, 每年创造数亿经济价值。我国虽将部分粪甲虫纳入保护名录, 但仍缺乏系统性保护策略。未来需加强草-粪-虫互作机制研究, 开发抗药性监测技术, 并制定兽药安全使用规范与适时性禁牧政策, 同时推动公众参与和跨区域合作, 以实现草地生态恢复与畜牧业可持续发展。

关键词: 草地生态; 粪甲虫; 蜣螂; 物种保护; 保护措施

The association between dung beetle decline and grassland ecosystem health: Strategies for mitigation

XU Xiaobo^{1,2}, TIAN Zhehao^{1,2}, TONG Yijie², WANG Jiating³, TANG Shiming⁴, ZHU Hui⁵, WANG Xinpu^{6,*}, BAI Ming²

1 School of Forestry and Prataculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

2 State Key Laboratory of Animal Biodiversity Conservation and Integrated Pest Management, Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

3 National Animal Husbandry Service, Beijing 100125, China

4 Key Laboratory for Model Innovation in Forage Production Efficiency, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Institute of Grassland Research, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Hohhot 010021, China

5 School of Life Sciences, Key Laboratory of Vegetation Ecology of the Ministry of Education, Jilin Songnen Grassland Ecosystem National Observation and Research Station, Northeast Normal University, Changchun 130024, China

6 School of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

Abstract: Dung beetles, as keystone decomposers in grassland ecosystems, sustain grassland health by accelerating dung decomposition, enhancing soil nutrient cycling, and promoting vegetation growth. However, intensive grazing, overuse of

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2022YFC2601200); 国家自然科学基金青年科学基金项目(32200354); 宁夏高等学校一流学科建设(草学学科)资助项目(NXYLXK2017A01); 珍稀濒危物种调查监管与行业规范项目

收稿日期: 2025-02-28; **网络出版日期:** 2025-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wangxinpu@nxu.edu.cn

chemical pesticides, and habitat degradation have led to significant declines in their population abundance and diversity. This review systematically synthesized the ecological functions of dung beetles and their global population decline, revealing that functional diversity contributes more substantially to dung removal efficiency than species diversity. Residues of pharmaceuticals such as ivermectin reduced fecundity and diminished dung decomposition rates, triggering cascading ecological consequences, including exacerbated surface dung accumulation and increased greenhouse gas emissions. Global case studies demonstrate that conservation-oriented introduction programs can restore dung beetle functionality, generating annual economic benefits amounting to hundreds of millions of dollars. Although China has included certain dung beetle species in conservation lists, comprehensive protection strategies remain underdeveloped. Future efforts must prioritize interdisciplinary research on grassland-dung-beetle interaction mechanisms, develop monitoring technologies for pesticide resistance, and establish safety protocols for veterinary drug application alongside adaptive seasonal grazing bans. Concurrently, fostering public engagement and cross-regional collaboration will be critical to achieving grassland ecological restoration and the sustainable development of livestock husbandry.

Key Words: grassland ecology; dung beetles; Scarabaeinae; species conservation; conservation strategies

草地生态系统作为全球面积最大的陆地生态系统^[1],兼具草畜生产功能,以及生物多样性保育、水土保持、水源涵养、气候调节和固碳等诸多生态功能^[2]。草地生态系统的物质循环与能量流动影响草地健康,而生态系统的结构不稳定与过程失衡将会导致草地退化,威胁国家生态文明建设和生态安全^[3]。值得关注的是,草地生态系统中的排泄物分解过程作为物质循环的关键环节,其生态效能主要体现在有效返还土壤重要元素碳、氮和磷等,对提升土壤氮素可利用性、增强碳库活性并激发微生物群落功能等方面具有帮助^[4]。在此过程中,粪甲虫类群作为关键分解者,通过破碎粪便对物质循环产生级联效应。然近 10 年来,受集约化放牧模式的影响,粪甲虫种群数量急剧下降,群落结构显著失衡^[5]。若这一趋势持续,将导致粪便分解速率降低、地表积粪污染加剧及养分循环受阻等一系列生态问题,进而威胁草地生态系统的健康与稳定性。

粪甲虫指粪食性甲虫 (Dung beetle),囊括金龟总科金龟科蜣螂亚科 (Scarabaeinae)、蜣金龟亚科 (Aphodiinae) 和粪金龟科 (Geotrupidae) 昆虫^[6]。其中的代表亚科蜣螂 (Ture dung beetle) 属鞘翅目 (Coleoptera) 多食亚目 (Polyphaga) 金龟总科 (Scarabaeoidea) 金龟科 (Scarabaeidae)^[7],是世界范围内分解粪便的关键生物^[8]。其通过破碎粪块和掘动土壤等改善草场环境,对草地植被生长、碳循环和维持生物链平衡等有着重要作用^[9],目前全球范围内已知超过 5,000 种蜣螂使用动物的粪便作为成虫和幼虫的食物资源^[10]。这类昆虫全球除海洋与南极洲外广布,目前已记录约 245 属 6,231 种,我国分布 31 属 324 种^[11]。然而不合理的草地管理,如倾倒地施用含大环内酯或拟除虫菊酯等杀虫剂、以及除草剂的滥用对非目标昆虫 (包括蜣螂) 造成负面影响^[12-14],已导致全球粪甲虫数目下降^[15]。从而引发粪便堆积等一系列问题间接影响草地生态系统正常循环,加速驱动草地退化。

根据现有论文发表情况,草地粪甲虫研究多集中于生态环境科学、生物多样性及陆地生态科学等(图 1),具体细化,以粪甲虫促进家畜粪便分解^[16]、减少温室气体释放^[17-18]、改变土壤微生物群落结构^[19-22]及功能形态学^[23]等方面较为深刻。我国对粪甲虫的研究起始于 21 世纪初。2005 年刘新民^[24]和姜世成^[25]等分别从粪金龟群落方面对草地积粪分解进行量化描述,提出蜣螂对解决草场家畜粪便分解难的问题具有关键作用,白明^[10]等对蜣螂生态价值进行评述,认为蜣螂在种子二次传播、传粉、对有害生物的控制等方面具有重要作用,并提出蜣螂保护的迫切需求和重要意义。近年来,我国学者针对粪甲虫分解草地家畜粪便也开展系列研究工作^[26-27]。

本文针对草地生态系统中的粪甲虫发挥的生态功能、衰退产生的后果及粪甲虫保护举措等进行系统性论述,旨在深度解析粪甲虫与草地生态系统健康之间的关联性,提升对我国草地生态系统中粪甲虫分解角色的重要认识,推动草地粪甲虫保护与生态平衡维护。

右^[28],粪便完全分解时间可缩短 48%左右^[29]。通常依据粪甲虫利用粪便资源的方式及筑巢行为将粪甲虫分为三种类型:粪居型(dweller)、直接掘洞型(tunneler)和滚粪球型(roller)^[30],在草原上三者的数量以粪居型、直接掘洞型、滚粪球型依次递减,但破碎粪坨(Dung Pat)的能力却以掘洞型最强。Purevdorj等^[31]发现在温带干旱草原上,蜣螂的粪清除率高峰是在粪便产生的 48h 内,且直接掘洞型表现出明显高于粪居型和滚粪球型的粪清除率,其中以 *Cheironitis eumenes* 的粪清除率最高,达到 $0.91\text{g 只}^{-1}\text{d}^{-1}$,另三种直接掘洞型蜣螂的粪清除率约为 $0.71\text{g 只}^{-1}\text{d}^{-1}$ 、 $0.57\text{g 只}^{-1}\text{d}^{-1}$ 和 $0.50\text{g 只}^{-1}\text{d}^{-1}$,而粪居型粪清除率约为 $0.43\text{g 只}^{-1}\text{d}^{-1}$,滚粪球型粪清除率最弱,约为 $0.36\text{g 只}^{-1}\text{d}^{-1}$ 。Cheng等^[27]也发现相似结果,掘洞型粪甲虫对牛粪的分解效率显著高于粪居型,且两种功能型的粪甲虫组合能够对粪便分解起到显著的增效作用。曹佳敏等^[29]在绢蒿(*Seriphidium transiliense*)荒漠草地研究也表明,粪居型、掘洞型和滚粪球型粪甲虫共同作用下牛粪分解速度最快。

以往研究中,对草地家畜粪便分解快慢常与粪甲虫的数量和物种多样性密切相关。然而,最新关于全球 38 个草地牧场的调查研究表明,不同地点的粪便清除率随着粪甲虫的物种丰富度增加而增加,而功能多样性持续增强了局域尺度的粪便清除率^[16]。因此,鉴于粪甲虫功能多样性相比于物种多样性对粪清除的贡献更大,在估测草地粪便清除速率时,除了应考虑粪甲虫的种群密度外,其功能类型也需重点关注。

1.2 粪甲虫对草地土壤微生物与养分循环的影响

粪甲虫作为动物粪便的重要分解者,通过破碎化粪便后将粪便中的有机质输送到土壤中,从而影响土壤理化性质、微生物活性和养分循环^[32-33]。首先,粪甲虫的地下活动可以提高土壤孔隙度^[34]、增加土壤通气^[27]、改善水渗透率^[35],对土壤碳循环产生重要影响^[28,36],也能够进一步减少径流和土壤损失,降低寄生线虫的数量^[37]。被掩埋的粪便可以增加浅层土壤(0—10cm)的有机碳、可利用性氮和有效磷含量^[29,38-39]。粪甲虫将粪便破碎化后,也能够通过淋溶使家畜粪便中的养分快速进入土壤中,改变土壤中的养分含量,但是这一途径还缺少实验性证据。此外,粪甲虫将家畜粪便中不易分解的纤维素等物质作为食物资源,自身产生的粪便及尸体能够在土壤中快速分解,从而也能改变土壤理化性质。粪甲虫引起的这种土壤理化性质的改变必然会调节土壤微生物群落及其相关的氮循环过程。然而,仅有少量学者开展对粪甲虫的活动与土壤微生物群落之间的关系的研究^[22],揭示了粪甲虫活动对增加微生物丰度、大肠杆菌(*Escherichia coli*)浓度和双歧杆菌科(Bifidobacteriaceae)、梭菌科(Clostridiaceae)和侏囊菌科(Nannocystaceae)等固氮固碳菌的占比起到促进作用^[21,40]。由于土壤理化性质和微生物群落改变与土壤氮循环过程密不可分。一项利用¹⁵N 同位素示踪研究证明,粪甲虫促进了土壤氨化作用和硝化作用,加速氮循环,从而提高土壤肥力^[41]。截止目前,关于粪甲虫对草地土壤微生物群落及与其密切相关的碳氮循环影响及其机理仍需要更系统性研究。

1.3 粪甲虫对草地植被生长的促进作用

粪金龟甲虫通过取食和埋藏粪便的行为也能够影响植物生长。从地上植被角度考虑,粪甲虫的活动有助于草地地上植被生长。Bang等实验证明 *Copris ochus*、*Copris tripartitus* 和 *Onthophagus lenzii* 的活动在 3 个月后将增加了牧草干物质含量,并在 10cm 深处提高土壤透气性^[42]。相似结果在 Barragán 等的实验中也被发现^[32]。而且,当粪甲虫数量充足,功能群结构良好时,粪便的分解速度快,可避免放牧草场因粪堆积导致的粪下植被缺氧枯死,以及牲畜拒食沾粪牧草引起的采食量降低等问题^[25]。粪甲虫对植物生长的作用效应更多依赖于粪甲虫群落组成,而不是单一物种^[34]。掘洞型粪甲虫通过改变土壤物理结构与养分影响植物生长,这种作用效应也在不同气候区存在显著差异。例如,在寒冷区域,粪甲虫增加土壤水分渗透从而促进植物生长。而在热带地区,粪甲虫的掘洞行为使土壤易干燥,则降低植物生长^[43]。

1.4 其他作用

从生物防治角度考虑,早在 1921 年粪甲虫抑制病虫害的能力就被发现^[44],并成功应用于夏威夷和澳大利亚^[45]等国家。在半干旱草地上,粪甲虫通过吸食粪液和将粪球转移至地下的行为加速了粪便的干燥速度,使粪中环境恶化,从而降低卫生害虫如:灌木丛蝇(*Musca vetustissima*)和水牛虻(*Haematobia irritans exigua*)等^[46]的虫卵孵化率以及线虫传播能力^[47-48]。除此之外,粪甲虫还被认为可以通过二次传播粪便中未消化的

种子,促进植物扩散和降低幼苗密度,以及影响土壤种子库结构,但这些能力因地区和传播模式的不同有巨大差异^[49-50]。曹佳敏等实验表明中国绢蒿荒漠中 80% 的种子模拟物被埋藏在粪坩水平距离 20cm 以内及 0—10cm 深的土壤中^[6],证明在中国粪甲虫对种子的传播能够起到一定帮助。

2 粪甲虫种群衰退潜在原因及其生态后果

2.1 衰退的原因

早在 20 世纪 60 年代粪甲虫的种群衰退现象就已被发现^[51]。此后 Lobo^[52]于 2001 年对伊比利亚半岛的滚粪球型粪甲虫历史数据进行统计与对比,发现 11 种中有 9 种的出现频率下降,且大多数滚粪球型粪甲虫的活动范围明显缩小了,有研究将之归因为 1950 年以来沿海地区的旅游业发展,相似结果在之后也被证实^[53-54]。

粪甲虫种群衰退的原因多样,现有研究表明环境变化和人类活动是两大重要因素。粪甲虫对食物资源和生境的高度专一性导致其种群结构受到环境影响大,多种环境因子通过直接或间接途径调控着粪甲虫的种群动态和分布格局^[55-56]。通常粪便丰富和产粪规律性高的地方粪甲虫物种多样性高^[57],草地生态系统因拥有较多的哺乳动物和大量新鲜粪便,其粪甲虫物种多样性与丰度均高于森林和农田^[58]。植被盖度是影响粪甲虫生存的重要因子,高植被盖度有利于其躲避天敌捕食和促进物种繁殖^[59]。而海拔高度则限制了粪甲虫的活动范围,物种丰富度随海拔升高递减^[60-61]。

当今时代,与自然环境波动引起的种群动态变化相比,人类活动对粪甲虫种群的影响呈现出更为显著的负面效应,特别是在农业的快速扩张和集约化进程中,粪甲虫的消失速度仍在加快^[52-53,62-63]。Fuzessy 等^[64]整理 1970 年至 2019 年间的相关研究,发现人为活动可能会直接导致栖息地被破坏和间接通过大型哺乳动物丧失引发的级联效应引起粪甲虫数量以惊人的速度降低。

首先,全球人口数量不断增多,使城市化和农业化速度加快,草地面积减少和草原管理不当使粪甲虫的生境丧失,从而减少粪甲虫多样性和种群数量^[65]。当前,我国草地面积已由 41% 的国土面积减少到 27.6%^[66],也将面临粪甲虫的种类和数量下降的严重问题。

其次,草地的放牧模式和土地用途的转变加速粪甲虫衰退。尽管放牧活动本身不直接作用于草场的家畜粪便分解过程,但是放牧可以通过改变草地粪甲虫种群数量间接影响粪便分解。在草地系统中,围封、长期暂停放牧或不规律放牧都会导致粪甲虫的物种多样性下降,不合理地开垦草地亦会如此。例如,在墨西哥的一项研究中,三种不同的放牧模式(天然放牧、人工放牧和刈牧兼用)下,粪甲虫物种的变化与放牧诱导的植被覆盖度密切相关。高载畜量和人工栽培草地容易吸引外来物种,从而降低本地物种的比例^[67]。在巴西地区的研究则显示,将牛群移出牧场三个月就能够对粪甲虫物种多样性指数和功能多样性指数产生负面影响^[68];将天然草地转变为人工草地也会降低粪甲虫的物种多样性^[69];将草地转变为大豆单播农耕地具同样后果:塞拉多灌木丛大草原粪甲虫的物种多样性、丰度和生物量都显著高于当地人为改造的农耕地,改造后的土地上甚至无法采集到 49 种草原粪甲虫^[70]。此外,如果草场内家畜粪便被人为清除(如当地人收集用于家庭和农业用途)也会影响粪甲虫数量^[71]。在脆弱的生态系统内(如青藏高原),过度放牧也会威胁粪甲虫的生存,但这并不意味着畜牧活动与物种多样性保护不相容,因此“如何衡量放牧强度与粪甲虫生态适应性间的平衡点”是个重要的科学问题。

再次,比起集约化放牧和土地的不合理利用,目前人类对粪甲虫生存造成最大威胁的是不合理的兽药和化学农药使用。许多广谱杀虫剂在控制牲畜寄生虫方面具有高效性,却对非目标节肢动物产生了严重副作用。例如,香豆素、敌敌畏、吡啶啉、呋喃、拟除虫菊酯和多数大环内酯类药物均对粪甲虫具有较高毒性^[72]。从中聚焦蜚螂,有研究表明,拟除虫菊酯和大内环酯影响 *Onthophagus similis* 生殖功能,喂食含有 1mg/L 伊维菌素的粪便导致雌虫卵母细胞长度显著缩短(中位数由 1.5mm 下降至 1.2mm),在施用此类药物的农场中捕获的雌虫受精率也明显下降(从 25% 降至 6%)^[73]。伊维菌素不仅在体内诱发不同性别蜚螂的氧化保护机

制,使雌虫 *HSP70* 表达增加、雄虫抗氧化水平提高^[74],还通过父本传递影响了雄性子代的头角发育^[75]。在群落层面,伊维菌素还减少了高粪清除率粪甲虫的数量,削弱了整体粪便清除功能^[13,76-77]。阿维菌素类和米尔贝霉素类作为常用的抗寄生虫药物,被证明能显著降低 *Euoniticellus intermedius* 的生殖率和孵化率,进而导致个体数量减少,粪便降解和掩埋率降低^[78]。在中国,牛粪中伊维菌素的残留被证明对腐食性节肢动物具有影响,在伊维菌素处理牛 3d 后排泄的牛粪块中,腐食性节肢动物群在粪堆积 60d 时多度显著低于对照组(下降 12N/g 干粪),且粪食性金龟的粪居型和直接掘洞型多度在处理组中均有显著下降(分别下降 0.1 和 0.13N/g 干粪)^[79]。除草剂也被证明对蜣螂有影响,Martínez 等^[80]发现在牧场中施用除草剂会降低 *Ataenius apicalis* 的丰度(收集的数量减少 9158 头)以及影响 *Canthon cyanellus* 的繁殖(卵和成功孵化幼虫的数量均减少)。另外,伊维菌素缓释栓剂被认为对粪甲虫具显著吸引力,且这种响应是无差别的,即各种功能类型的粪甲虫都能在含有伊维菌素的粪便中被收集到,并且数量相比于对照组显著增加^[81]。这些现象凸显了药物滥用的危害,因为它可能导致受危害的粪甲虫远超预期,并间接地通过影响繁殖力危及未来几代。这些药物还能够通过食物链影响以粪甲虫为食的鸟类和蝙蝠等动物^[82-83],形成跨营养级的恶性循环。在草原生态中,这种危害表现为粪甲虫数量的减少,反过来延迟粪分解过程^[84]。

2.2 粪甲虫衰退所带来的问题

据统计,在自由放牧模式中,每年约有 2/3 牧草干物质被农业动物利用,其中约有 1/2 作为粪便排泄被动物排出体外^[85],若草原牧区现有的粪甲虫清粪能力不足,则会导致大量的家畜粪便未能及时分解而堆积在草地上,引起众多生态问题。

最早在 18 世纪,澳大利亚在畜牧业快速发展时就曾因未引入对应的食牛粪甲虫导致反刍动物粪便过量沉积,致使牧场污染、有害植物入侵和害虫侵袭^[86]。澳大利亚家畜动物数量众多(2200 万头牛和 7000 万头羊^[87]),会产生大量的排泄物,但本地粪甲虫对外来引入的家畜粪便清除能力差,导致粪下植被环境恶化,粪便内部蝇虫滋生^[46]。我国 2010 年畜禽粪便总量达到 22.34 亿 t,其中牛、羊和马等草食家畜占比 50% 以上^[88],如果这样大量的粪便未被及时掩埋,沉积在草地上,将会对草地生态环境产生巨大影响。姜世成等^[25]人于 2009 年发现在内蒙古草原的粪便囤积现象,但至今仍无结合粪甲虫的草地处理措施,如果长期下去,草地粪清除能力不足将会成为草原退化的重大隐患之一。

尽管生物多样性对因粪甲虫不足导致的草地问题响应滞后,在短期内,最稀有或弹性最差的物种损失并不总是导致粪甲虫提供的服务发生明显改变^[63],但如果在监测到大规模的种群衰退后再采取措施,那么将其恢复至原始服务水平的工作将会变得异常困难。

3 保护粪甲虫所带来的经济效益

澳大利亚联邦科学与工业研究组织(CSIRO)从 1965—1982 年开始实行澳大利亚粪甲虫引种项目,主要从非洲和欧洲南部非洲和南部欧洲成功引进 5,523 种粪甲虫,其中 23 种成功扩繁,使澳大利亚牧场质量和肥力得到显著改善,并且有害生物例如牛虻和灌木蝇(*Musca vetustissima*)的数量减少了 90%。之后澳大利亚重新开始研究之前没有成功引种的欧洲粪甲虫物种:*Onthophagus vacca* 和 *Bubas bubalus*,在 2012—2014 年引进并投放到澳大利亚南部。目前,澳大利亚政府每年仍然在拨款实行粪甲虫的引种和农牧场的粪甲虫投放推广^[46]。随后澳大利亚在 2018 年实行 Dung Beetle Ecosystem Engineers (DBEE)项目,评估现有及引进的粪甲虫在土壤系统中的影响,该项目称澳大利亚的粪甲虫每年可为国家农业经济创造 6.2 亿澳元的价值^[89]。新西兰环境保护局于 2010 年批准 11 种外来粪甲虫种类无条件释放到新西兰牧场上,以解决粪便堆积对新西兰牧场造成的负面影响^[90]。同样在英国,粪甲虫每年的生态效益可达到 3.67 亿英镑,农业草地粪便分解的生态系统功能已被确定为英国 100 个政策相关的关键问题之一。在农业环境计划保护下粪甲虫可为英国养牛业每年节省 4,020 万英镑,除了驱虫药本身的节省之外,停止对成年牛使用驱虫药进行不必要的治疗可以为英国养牛业每年额外节省 620 万英镑^[91]。国际方面,世界自然保护联盟(IUCN)已将蜣螂亚科共 52 属,590

种纳入保护范围,评估等级从近危等级 (NT) 至数据缺乏等级 (DD),如 *Onthophagus* 属记录有 144 种^[92]。

我国《国家重点保护野生名录》中也有对于粪甲虫种类的保护,其中有艾氏泽蜣螂 *Scarabaeus erichsoni*、拜氏蜣螂 *Scarabaeus babori*、悍马巨蜣螂 *Heliocopris bucephalus*、上帝巨蜣螂 *Heliocopris dominus* 和迈达斯巨蜣螂 *Heliocopris midas* 五种,但覆盖类群还远远不足。除此之外,粪甲虫保护倡议和战略文件的缺少也反应了国内粪甲虫物种地位的亟待提升。

4 展望

我国草地约占国土总面积的 27.5%,生物多样性丰富,草地生态系统在我国占据着重要的地位^[93]。然而,尽管我国拥有丰富的草地资源和多样的粪甲虫物种资源,近年来粪甲虫数量减少导致的一系列生态问题已逐渐显现,严重影响了草地生态系统的平衡和功能。在已有研究的基础上,粪甲虫的生态服务潜力得到了关注,但实际保护工作仍存在不足,相关政策和科学支持亟待加强。为此,有必要从科学研究、政策制定和公众参与等方面进一步完善保护策略,推动粪甲虫在草地生态系统中的功能恢复与应用。

首先,在科学依据的构建方面,目前草-粪-虫三者间的互作机制,尤其在在不同草地类型中的作用和影响仍缺乏系统的研究。因此深入研究草地、粪便和粪甲虫的生态互作机制对优化草地生态系统和粪分解功能至关重要。为达成此目的,需要进行如下工作:(1)历史数据整理与本底数据收集:通过结合主动采集和飞行阻隔器^[94-95]等被动方法,对全国不同草地类型的粪甲虫种类、数量和生态适应情况进行普查。(2)关键影响因子的筛选与策略制定:利用分子手段(如基因条形码 COI)^[96]对粪甲虫的遗传多样性进行分析,有助于评估各种群的灭绝风险与遗传健康。在明确粪甲虫种群结构和分布后,需进一步研究与粪甲虫生存息息相关的生态因素(如气候、土壤养分和土地利用类型等),从而提出优化的种群保护和引种策略。此外,为提升濒危或区域性灭绝粪甲虫种类的饲养与扩繁成功率,应结合其营养需求和生态习性,开发高效、可持续的人工饲料,以缓解对天然粪源的依赖,为区域性引种和适地扩繁提供技术支持^[97-98]。(3)土壤抗生素残留与生态分解关系研究:针对草地生态系统中粪甲虫所面临的药物污染问题,亟需开展土壤中抗生素残留现状与药代动力学研究,明确抗生素在土壤-粪-虫系统中的影响路径,评估药物残留对草地粪分解过程的潜在威胁。

其次,在政策方针的制定方面,为实现粪甲虫的有效保护和合理利用,必须将研究成果转化为政策方针,以形成综合管理的实施框架。在科学研究的基础上,政策制定需结合生态保护与产业发展,通过系统化、地方化的方式推动高功能性粪甲虫种群的恢复与扩展,保障草地生态功能与农村经济的双向发展。应做工作如下:(1)推行适时性禁牧政策和兽药残留粪便的无害化集中处理:在明晰兽药的安全排放浓度和药物代谢规律后对给药家畜进行短期舍饲隔离,并集中处置高浓度兽药残留粪便以保护草场生态安全。(2)建立高功能性物种繁育和乡村振兴、扶贫项目的联系:以高功能性粪甲虫种类为基础,建立人工扩繁体系以高效繁育候选物种,有效支持草场健康和产量的可持续提升;并将相关技术下放,繁育科技公司和相关产业,推动农业有益生物的普查,使保护和利用工作与乡村经济发展相结合。

最后,在公众科普方面,需加强公众对粪甲虫保护的认知,鼓励社会各界参与生态保护工作;提高有关部门的认知与管理水平,控制优质功能性粪甲虫种群资源,并与海关系统联动,防止重要生态资源外流。

综上所述,粪甲虫在草地生态系统中的作用不可忽视。保护粪甲虫种群对于维护草地生态平衡和促进畜牧业可持续发展至关重要。因此,加强粪甲虫保护工作对于改善我国草地生态环境、提高畜牧业生产效率具有重要的现实和历史意义。

致谢:感谢中国科学院动物研究所李露露提供建议,感谢贵州大学陈鑫欣和宁夏大学殷凡提供部分文献。

参考文献 (References):

[1] Buisson E, Archibald S, Fidelis A, Suding K N. Ancient grasslands guide ambitious goals in grassland restoration. *Science*, 2022, 377(6606):

594-598.

- [2] 吕鑫, 李晓兵, 张辰昊, 党东良, 王凯, 娄安如. 农牧交错区草地生物多样性研究进展: 方法、挑战、不足与展望. 中国草地学报, 2024, 46(5): 120-131.
- [3] 朱剑霄, 尚占环, 蒋胜竞, 师研, 冯琦胜, 赵新全, 辛晓平, 闫玉春, 苏艳军, 贺金生. 草地生态系统保护、修复与功能提升的关键科学问题. 中国科学基金, 2024, 38(4): 658-667.
- [4] 熊朝阳, 李佳秀, 杜静, 张雪, 曹颖, 汪爽, 杜子银. 放牧牲畜行为对草地土壤氮转化的影响研究进展. 中国草地学报, 2025, 47(01): 118-129.
- [5] Su H, Xu H, Su B, Liu W, Cao Y F, Li Y G. Macrocyclic lactone residues in cattle dung result in a sharp decline in the population of dung beetles in the rangelands of northern China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2023, 356: 108621.
- [6] 曹佳敏, 郭亚亚, 李娜娜, 孙海荣, 车昭碧. 绢蒿荒漠粪甲虫多样性特征及其对粪便内种子的二次分配. 草业学报, 2021, 30(8): 137-145.
- [7] 白明. 武夷山金龟志. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2020: 53.
- [8] Nichols E, Spector S, Louzada J, Larsen T, Amezquita S, Favila M. Ecological functions and ecosystem services provided by Scarabaeinae dung beetles. *Biological Conservation*, 2008, 141(6): 1461-1474.
- [9] Decastro-Arrazola I, Andrew N R, Berg M P, Curtsdotter A, Lumaret J-P, Menéndez R, Moretti M, Nervo B, Nichols E S, Sánchez-Piñero F, Santos A M C, Sheldon K S, Slade E M, Hortal J. A trait-based framework for dung beetle functional ecology. *Journal of Animal Ecology*, 2023, 92(1): 44-65.
- [10] 白明, 杨星科. 蜣螂的生态价值和保护意义. 昆虫知识, 2010, 47(1): 39-46.
- [11] 白明. 中国蜣螂亚科的系统学研究及基于化石形态和分子数据对金龟子起源与演化的探讨(鞘翅目: 金龟总科)[D]. 北京: 中国科学院大学, 2008: 125-136.
- [12] Floate K D, Düring R-A, Hanafi J, Jud P, Lahr J, Lumaret J-P, Scheffczyk A, Tixier T, Wohde M, Römbke J, Sautot L, Blanckenhorn W U. Validation of a standard field test method in four countries to assess the toxicity of residues in dung of cattle treated with veterinary medical products. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2016, 35(8): 1934-1946.
- [13] Sands B, Wall R. Sustained parasiticide use in cattle farming affects dung beetle functional assemblages. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2018, 265: 226-235.
- [14] Rodríguez-Vivas R I, Basto-Estrella G D S, Reyes-Novelo E, Arcila-Fuentes W, Ojeda-Chi M, Trinidad-Martínez I, Martínez-M I. Sub-lethal effects of moxidectin on the Neotropical dung beetle *Onthophagus landolti* Harold (Coleoptera; Scarabaeinae). *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 2019, 22(1): 239-242.
- [15] Bruinenberg M, Van Agtmaal M, Hoekstra N, Eekeren N V. Residues of pesticides in dairy cow rations and fly treatments reduce the number of Coleoptera in dung. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2023, 344: 108307.
- [16] Noriega J A, Hortal J, Decastro-Arrazola I, Alves-Martins F, Ortega J C G, Bini L M, Andrew N R, Arellano L, Beynon S, Davis A L V, Favila M E, Floate K D, Horgan F G, Menéndez R, Milotic T, Nervo B, Palestini C, Rolando A, Scholtz C H, Senyüz Y, Wassmer T, Adam R, Araújo C D O, Barragan-Ramírez J L, Boros G, Camero-Rubio E, Cruz M, Cuesta E, Damborsky M P, Deschodt C M, Rajan P D, D'hondt B, Rojas A D, Dindar K, Escobar F, Espinoza V R, Ferrer-Paris J R, Rojas P E G, Hemmings Z, Hernández B, Hill S J, Hoffmann M, Jay-Robert P, Lewis K, Lewis M, Lozano C, Marín-Armijos D, Farias P M D, Murcia-Ordoñez B, Karimbunkara S N, Navarrete-Heredia J L, Ortega-Echeverría C, Pablo-Cea J D, Perrin W, Pessoa M B, Radhakrishnan A, Rahimi I, Raimundo A T, Ramos D C, Rebolledo R E, Roggero A, Sánchez-Mercado A, Somay L, Stadler J, Tahmasebi P, Céspedes J D T, Santos A M C. Dung removal increases under higher dung beetle functional diversity regardless of grazing intensification. *Nature Communications*, 2023, 14(1): 8070.
- [17] Slade E M, Riutta T, Roslin T, Tuomisto H L. The role of dung beetles in reducing greenhouse gas emissions from cattle farming. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 18140.
- [18] Piccini I, Nervo B, Forshage M, Celi L. Dung beetles as drivers of ecosystem multifunctionality: Are response and effect traits interwoven?. *Science of The Total Environment*, 2018, 616-617(6783): 1440-1448.
- [19] Ezeokoli O T, Badenhorst J, Raimi A, Dabrowski J, Scholtz C, Adeleke R. Effect of dung and dung beetle application on topsoil fungal assemblage of a post-coal mining reclamation land: Towards soil health improvement. *Applied Soil Ecology*, 2023, 185: 104804.
- [20] Sun C, Qiu M, Lu X, Wang Y W. Core microbiota play important roles in maintaining soil multi-nutrient cycling in lakeshore wetland of plateau lake Caohai. *Land Degradation & Development*, 2024, 35(4): 1308-1319.
- [21] Ma L, Weeraratne N, Gurusinge S, Aktar J, Haque S, Eberbach P L, Gurr G G, Weston L A. Dung beetle activity is soil-type-dependent and modulates pasture growth and associated soil microbiome. *Agronomy*, 2023, 13(2): 325.
- [22] Slade E M, Roslin T, Santalahti M, Bell T. Disentangling the 'brown world' faecal—detritus interaction web: dung beetle effects on soil microbial

- properties. *Oikos*, 2016, 125(5): 629-635.
- [23] Nervo B, Roggero A, Isaia M, Chamberlain D, Rolando A, Claudia P. Integrating thermal tolerance, water balance and morphology: An experimental study on dung beetles. *Journal of Thermal Biology*, 2021, 101(6): 103093.
- [24] 刘新民. 内蒙古中部地区土壤金龟子群落特征研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2005.
- [25] 姜世成, 周道玮. 牛粪堆积对草地影响的研究. *草业学报*, 2006(4): 30-35.
- [26] Wu X W, Duffy J E, Reich P B, Sun S C. A brown-world cascade in the dung decomposer food web of an alpine meadow: effects of predator interactions and warming. *Ecological Monographs*, 2011, 81(2): 313-328.
- [27] Cheng J W, Li F Y, Wang Y D, Wang Y N, Liu X M, Zhang J Z, Wang Z Y, Li Y L, Wang H, Yang Z P, Potter M A. Dweller and tunneler dung beetles synergistically accelerate decomposition of cattle and horse dung in a semi-arid steppe. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2022, 329: 107873.
- [28] Menéndez R, Webb P, Orwin K H. Complementarity of dung beetle species with different functional behaviours influence dung—soil carbon cycling. *Soil Biology and Biochemistry*, 2016, 92: 142-148.
- [29] 曹佳敏, 郭亚亚, 李娜娜, 孙海荣, 车昭碧, 鲁为华. 绢蒿荒漠粪甲虫对牛粪、马粪分解及粪下土壤养分的影响. *中国草地学报*, 2021, 43(2): 75-81+114.
- [30] 白明, 杨星科. 粪食性金龟的行为及其适应演化. *昆虫知识*, 2008(3): 499-505.
- [31] Jargalsaikhan P, Altangerel G, Enkhchimeg T, Altangerel G, Purevdorj J. Variation in Dung Removal Rates by Dung Beetles (Coleoptera: Scarabaeoidea) in a Temperate, Dry Steppe Ecosystem. *Diversity*, 2023, 15(1): 91.
- [32] Barragán F, Douterlungne D, Ramírez-Hernández A, Gelvez S M G, Guzmán A, Rodas-Ortiz J P. The rolling dung master: An ecosystem engineer beetle mobilizing soil nutrients to enhance plant growth across a grassland management intensity gradient in drylands. *Journal of Arid Environments*, 2022, 197: 104673.
- [33] 刘新民, 海英. 荒漠草原马粪中粪金龟子组成及分解作用. *生态学杂志*, 2011, 30(10): 2269-2276.
- [34] Manning P, Slade E M, Beynon S A, Lewis O T. Functionally rich dung beetle assemblages are required to provide multiple ecosystem services. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, 218: 87-94.
- [35] Badenhorst J, Dabrowski J, Scholtz C H, Truter W F. Dung beetle activity improves herbaceous plant growth and soil properties on confinements simulating reclaimed mined land in South Africa. *Applied Soil Ecology*, 2018, 132: 53-59.
- [36] Whitehead D, Schipper L A, Pronger J, Moinet G, Mudge P L, Pereira R C, Kirschbaum M U F, McNally S, Beare M H, Arbestain M C. Management practices to reduce losses or increase soil carbon stocks in temperate grazed grasslands: New Zealand as a case study. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2018, 265: 432-443.
- [37] Forgie S A, Paynter Q, Zhao Z, Flowers C, Fowler S. Newly released non-native dung beetle species provide enhanced ecosystem services in New Zealand pastures. *Ecological Entomology*, 2018, 43(4): 431-439.
- [38] Evans K S, Mamo M, Wingeyer A, Schacht W H, Eskridge K M, Bradshaw J, Ginting D. Soil fauna accelerate dung pat decomposition and nutrient cycling into grassland soil. *Rangeland Ecology & Management*, 2019, 72(4): 667-677.
- [39] Gómez-Cifuentes A, Munévar A K, Zurita G A. Dung beetles diversity and their role in nutrient cycling in livestock systems of the dry Chaco. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2023, 358: 108708.
- [40] Lipton S, Meyer R S, Richardson G, Philpott S M. *Onthophagus taurus* increases soil microbes associated with nutrient cycling in California pastureland soils. *Rangeland Ecology & Management*, 2023, 91(suppl 1): 24-29.
- [41] Nervo B, Caprio E, Celi L, Lonati M, Lombardi G, Falsone G, Iussig G, Claudia P, Said-Pullicino D, Rolando A. Ecological functions provided by dung beetles are interlinked across space and time: Evidence from ¹⁵N isotope tracing. *Ecology*, 2017, 98(2): 433-446.
- [42] Bang H S, Lee J-H, Kwon O S, Na Y-E, Jang Y S, Kim W H. Effects of paracoprid dung beetles (Coleoptera: Scarabaeidae) on the growth of pasture herbage and on the underlying soil. *Applied Soil Ecology*, 2005, 29(2): 165-171.
- [43] Slade E M, Roslin T. Dung beetle species interactions and multifunctionality are affected by an experimentally warmed climate. *Oikos*, 2016, 125(11): 1607-1616.
- [44] Bornemissza G F. Insectary studies on the control of dung breeding flies by the activity of the dung beetle, *Onthophagus gazella* F. (Coleoptera: Scarabaeinae). *Australian Journal of Entomology*, 1970, 9(1): 31-41.
- [45] Fincher G T. Effects of Dung Beetle Activity on the Number of Nematode Parasites Acquired by Grazing Cattle. *The Journal of Parasitology*, 1975, 61(4): 759-762.
- [46] Doube B M. Ecosystem services provided by dung beetles in Australia. *Basic and Applied Ecology*, 2018, 26: 35-49.
- [47] Szewc M, De Waal T, Zintl A. Biological methods for the control of gastrointestinal nematodes. *The Veterinary Journal*, 2021, 268: 105602.
- [48] Maldaner M E, Sobral-Souza T, Prasniewski V M, Vaz-de-Mello F Z. Effects of climate change on the distribution of key native dung beetles in

- South American grasslands. *Agronomy*, 2021, 11(10): 2033.
- [49] Andresen E, Urrea-Galeano L A. Effects of dung beetle activity on tropical forest plants. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2022, 10: 979676.
- [50] Griffiths H M, Louzada J, Bardgett R D, Beiroz W, França F M, Tregidgo D J, Barlow J. Biodiversity and environmental context predict dung beetle-mediated seed dispersal in a tropical forest field experiment. *Ecology*, 2015, 96(6): 1607-1619.
- [51] Johnson C. The scarabaeoid (Coleoptera) fauna of Lancashire and Cheshire and its apparent changes over the last 100 years. *The Entomologist*, 1962, 95: 153-165.
- [52] Lobo J M. Decline of roller dung beetle (Scarabaeinae) populations in the Iberian peninsula during the 20th century. *Biological Conservation*, 2001, 97(1): 43-50.
- [53] Carpaneto G M, Mazziotta A, Valerio L. Inferring species decline from collection records: Roller dung beetles in Italy (Coleoptera, Scarabaeidae). *Diversity and Distributions*, 2007, 13(6): 903-919.
- [54] Sánchez-Bayo F, Wyckhuys K A G. Worldwide decline of the entomofauna: A review of its drivers. *Biological Conservation*, 2019, 232: 8-27.
- [55] Hussain M, Kanwal M, Aftab K, Khalid M, Liaquat S, Iqbal T, Rahman G, Umar M. Distribution patterns of dung beetle (Coleoptera: Scarabaeidae) assemblages in croplands and pastures across two climatic zones of Pakistan. *Oriental Insects*, 2022, 56(3): 392-407.
- [56] Menéndez R, Gutiérrez D. Shifts in habitat associations of dung beetles in northern Spain: Climate change implications. *Écoscience*, 2004, 11(3): 329-337.
- [57] Rodrigues M M, Uchôa M A, Ide S. Dung beetles (Coleoptera: Scarabaeoidea) in three landscapes in Mato Grosso do Sul, Brazil. *Brazilian Journal of Biology*, 2013, 73(1): 211-220.
- [58] Kunz B K, Krell F-T. Habitat differences in dung beetle assemblages in an African savanna—forest ecotone: Implications for secondary seed dispersal. *Integrative Zoology*, 2011, 6(2): 81-96.
- [59] 刘伟, 门丽娜, 刘新民. 内蒙古武川县农田退耕还草对粪金龟子群落的影响. *生态学报*, 2013, 33(15): 4724-4736.
- [60] Imura O, Morimoto N, Shi K, Sasaki H. Landscape diversity of pasture dung beetle communities in the central region of mainland Japan and implications for conservation management. *Biodiversity and Conservation*, 2014, 23(3): 597-616.
- [61] Mantoni C, Tsafack N, Palusci E, Pietro S D, Fattorini S. Diversity Patterns of Dung Beetles along a Mediterranean Elevational Gradient. *Insects*, 2021, 12(9): 781.
- [62] Biström O, Silfverberg H, Rutanen I. Abundance and distribution of coprophilous *Histerini* (Histeridae) and *Onthophagus* and *Aphodius* (Scarabaeidae) in Finland (Coleoptera). *Entomologica Fennica*, 1991, 2(2): 53-66.
- [63] Lumaret J-P, Kadiri N, Martínez-M I. The global decline of dung beetles. *Imperiled: The Encyclopedia of Conservation*, 2022: 553-562.
- [64] Fuzessy L F, Benítez-López A, Slade E M, Bufalo F S, Magro-de-Souza G C, Pereira L A, Culot L. Identifying the anthropogenic drivers of declines in tropical dung beetle communities and functions. *Biological Conservation*, 2021, 256: 109063.
- [65] 刚成诚, 王钊齐, 杨悦, 陈奕兆, 张艳珍, 李建龙, 程积民. 近百年全球草地生态系统净初级生产力时空动态对气候变化的响应. *草业学报*, 2016, 25(11): 1-14.
- [66] 徐红. 齐奏“三调”同心曲确保调查数据真实准确——第三次全国国土调查主要数据成果发布. *中国测绘*, 2021(9): 10-14.
- [67] Barragán F, Labastida J, Ramírez-Hernández A. Response of dung beetle diversity to three livestock management systems in drylands of central Mexico. *Journal of Arid Environments*, 2021, 193(3): 104598.
- [68] Correa C M A, Lara M A, Puker A, Noriega J A, Korasaki V. Quantifying responses of dung beetle assemblages to cattle grazing removal over a short-term in introduced Brazilian pastures. *Acta Oecologica*, 2021, 110: 103681.
- [69] De Albuquerque Correa C M, Puker A, Ferreira K R, Cristaldo C M, Ferreira F N F, Abot A R, Korasaki V. Using dung beetles to evaluate the conversion effects from native to introduced pasture in the Brazilian Pantanal. *Journal of Insect Conservation*, 2016, 20(3): 447-456.
- [70] Machado A F, Da Silva R J, Correa C M D A, Silva R J D, Vaz-de-Mello F Z, Pereira M J B, Peres C A, Silva D J D, Storck-Tonon D. Severe simplification of the structure of dung beetle assemblages in neotropical soybean croplands regardless of the native vegetation domain. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2023, 357: 108654.
- [71] Krell F-T, Mahiva V S, Kouakou C, N'goran P, Krell-Westerwalbesloh S, Newman D H, Weiß I, Doumbia M. Human influence on the dung fauna in Afrotropical Grasslands (Insecta: Coleoptera) [D]. Berlin: African Biodiversity, 2005: 133-139.
- [72] Lumaret J P, Errouissi F. Use of anthelmintics in herbivores and evaluation of risks for the non target fauna of pastures. *Veterinary Research*, 2002, 33(5): 547-562.
- [73] Weaving H, Sands B, Wall R. Reproductive sublethal effects of macrocyclic lactones and synthetic pyrethroids on the dung beetle *Onthophagus similis*. *Bulletin of Entomological Research*, 2020, 110(2): 195-200.
- [74] Villada-Bedoya S, Chávez-Ríos J R, Montoya B, Castelán F, Córdoba-Aguilar A, Escobar F, González-Tokman D. Heat shock proteins and antioxidants as mechanisms of response to ivermectin in the dung beetle *Euoniticellus intermedius*. *Chemosphere*, 2021, 269: 128707.

- [75] Baena-Díaz F, Martínez-M I, Gil-Pérez Y, González-Tokman D. Trans-generational effects of ivermectin exposure in dung beetles. *Chemosphere*, 2018, 202: 637-643.
- [76] Ambrožová L, Sládeček F X J, Zítek T, Perlík M, Kozel P, Jirků M, Čížek L. Lasting decrease in functionality and richness: Effects of ivermectin use on dung beetle communities. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2021, 321(10): 107634.
- [77] Pecenka J R, Lundgren J G. Effects of herd management and the use of ivermectin on dung arthropod communities in grasslands. *Basic and Applied Ecology*, 2019, 40: 19-29.
- [78] Jacobs C T. Effects of certain anthelmintics on the survival and reproduction of *Euoniticellus intermedius* (Reiche) (Coleoptera: Scarabaeidae) [D]. South Africa: University of Pretoria (South Africa), 2014: 99.
- [79] 乌吉斯古楞. 牛粪中伊维菌素残留对内蒙古典型草原粪节肢动物的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2020.
- [80] Martínez I M, Lumaret J-P, Cruz M R. Suspected side effects of a herbicide on dung beetle populations (Coleoptera: Scarabaeidae). *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences-Series III - Sciences de la Vie*, 2001, 324(11): 989-994.
- [81] Errouissi F, Lumaret J-P. Field effects of faecal residues from ivermectin slow-release boluses on the attractiveness of cattle dung to dung beetles. *Medical and Veterinary Entomology*, 2010, 24(4): 433-440.
- [82] Buijs J, Ragas A, Mantingh M. Presence of pesticides and biocides at Dutch cattle farms participating in bird protection programs and potential impacts on entomofauna. *Science of The Total Environment*, 2022, 838(Part 3): 156378.
- [83] Finch D, Schofield H, Floate K D, Kubasiewicz L M, Mathews F. Implications of endectocide residues on the survival of Aphodiine dung beetles: A meta-analysis. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2020, 39(4): 863-872.
- [84] Wall R, Beynon S. Area-wide impact of macrocyclic lactone parasiticides in cattle dung. *Medical and Veterinary Entomology*, 2012, 26(1): 1-8.
- [85] Doube B, Marshall T S. Dung down under: Dung beetles for Australia. South Australia: Dung Beetle Solutions Australia, 2014.
- [86] Waterhouse D F. The biological control of dung. *Scientific American*, 1974, 230(4): 100-109.
- [87] Australian Bureau of Statistics. Agricultural Commodities, Australia. (2023-01-17) [2025-02-28]. <https://www.abs.gov.au/statistics/industry/agriculture/agricultural-commodities-australia/2021-22>.
- [88] 谢光辉, 包维卿, 刘继军, 安捷. 中国畜禽粪便资源研究现状述评. *中国农业大学学报*, 2018, 23(4): 75-87.
- [89] Caron V, Vila S P, Gueidan C. *Beauveria australis* finds a new host in French dung beetles introduced to Australia. *Journal of Invertebrate Pathology*, 2023, 197: 107889.
- [90] Forgie S A, Dymock J J, Tompkins D M. No evidence that brushtail possums (*Trichosurus vulpecula*) forage on dung beetles (Coleoptera: Scarabaeidae) in New Zealand. *New Zealand Journal of Zoology*, 2014, 41(2): 95-102.
- [91] Beynon S A, Wainwright W A, Christie M. The application of an ecosystem services framework to estimate the economic value of dung beetles to the U.K. cattle industry. *Ecological Entomology*, 2015, 40(S1): 124-135.
- [92] IUCN. IUCN Red List categories and criteria, version 3.1. (2000-02-09) [2025-02-28]. <https://www.iucnredlist.org/search/map>.
- [93] 王德利, 王岭, 辛晓平, 李凌浩, 唐华俊. 退化草地的系统性恢复: 概念、机制与途径. *中国农业科学*, 2020, 53(13): 2532-2540.
- [94] 李盼盼, 佟一杰, 曹浩宇, 容国森, 覃诗晴, 杨星科, 王国全, 白明. 广西花坪 SITE100 样地甲虫标本照片数据集. *生物多样性*, 2021, 29(9): 1165-1169.
- [95] 石天琪. 湖南莽山国家级自然保护区金龟总科物种多样性与季节发生动态[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2022.
- [96] Yoon T J, Park H C, Kang J H, Bayartogtokh B, Bae Y J. Genetic divergence between the South Korean and Mongolian populations of the dung beetle, *Gymnopleurus mopsus* (Coleoptera: Scarabaeidae) based on mitochondrial cytochrome c oxidase subunit I (COI) gene sequences. *Entomological Research*, 2017, 47(6): 366-372.
- [97] Goza D, Gandiwa P, Mashapa C, Never M, Gandiwa E. Assessment of browse availability and suitability for Black Rhino's re-introduction in Northern Gonarezhou National Park, Southeastern Zimbabwe. *Open Journal of Ecology*, 2019, 9(9): 326-335.
- [98] 胡超, 于静. 应用 MaxEnt 和 ArcGIS 对湖南省马尾松良种在湖北省同一适宜引种生态区精准预测. *东北林业大学学报*, 2022, 50(7): 40-46.