

DOI: 10.20103/j.stxb.202304270880

孙义,何冬梅,姬文翔,韦新仪,廖雅芳,孙子墨,吴文俊,马青山,李猛,邹景文,宜树华.互花米草防治和麋鹿保护的系统耦合作用——基于自然的解决方案.生态学报,2024,44(5):1881-1891.

Sun Y, He D M, Ji W X, Wei X Y, Liao Y F, Sun Z M, Wu W J, Ma Q S, Li M, Zou J W, Yi S H. Coupling effects of *Elaphurus davidianus* conservation and *Spartina alterniflora* control based on the basic theory of grassland agroecology ecosystem and nature-based solutions. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44 (5): 1881-1891.

互花米草防治和麋鹿保护的系统耦合作用 ——基于自然的解决方案

孙 义¹, 何冬梅^{2,3}, 姬文翔¹, 韦新仪¹, 廖雅芳¹, 孙子墨¹, 吴文俊¹, 马青山⁴, 李 猛¹,
邹景文², 宜树华^{1,*}

1 南通大学脆弱生态环境研究所/南通大学地理科学学院, 南通 226019

2 江苏省林业科学研究院, 南京 211153

3 江苏盐城滨海湿地生态系统国家定位观测研究站, 盐城 224000

4 青海省黄南藏族自治州林业站, 同仁 811300

摘要:互花米草(*Spartina alterniflora*)是典型的外来入侵物种,因其繁殖力和适应力强难以防治,直接威胁我国滨海滩涂湿地生物多样性,改变了该生态系统的结构和功能;麋鹿(*Elaphurus davidianus*)是我国 I 级保护动物,是野生动物迁地保护和回归自然的典范,但仍面临野生种群稳定性低、与保护区环境承载力矛盾尖锐的问题。麋鹿喜食互花米草,其牧食行为可有效调控互花米草的时空分布格局,提升滨海滩涂湿地生态系统功能和稳定性,并为其自身野化回归提供良好的环境。目前针对互花米草防治和麋鹿保护的研究较多,但少有二者耦合作用的探讨。尝试借助草地农业系统理论阐释互花米草防治和麋鹿保护(互花米草 & 麋鹿)耦合发展的范式和潜在机制,即寻求基于自然的克服系统相悖的解决方案。以期打破珍稀物种保护和入侵物种防控各自为战的范式,探索二者耦合发展思路和陆海农业实践。同时,探讨了利用无人机等技术搭建滨海滩涂湿地互花米草 & 麋鹿耦合系统的空-天-地一体化监测、分析和管理体系。

关键词:草地农业;珍稀物种;生物入侵;草畜互作;系统相悖

Coupling effects of *Elaphurus davidianus* conservation and *Spartina alterniflora* control based on the basic theory of grassland agroecology ecosystem and nature-based solutions

SUN Yi¹, HE Dongmei^{2,3}, JI Wenxiang¹, WEI Xinyi¹, LIAO Yafang¹, SUN Zimo¹, WU Wenjun¹, MA Qingshan⁴,
LI Meng¹, ZOU Jingwen², YI Shuhua^{1,*}

1 Institute of Fragile Eco-Environment, School of Geographic Science, Nantong University, Nantong 226019, China

2 Jiangsu Academy of Forestry, Nanjing 211153, China

3 Yancheng Coastal Wetland Ecosystem National Research Station, Yancheng 224000, China

4 Forestry Station of Huangnan Prefecture of Qinghai Province, Tongren 811300, China

Abstract: *Spartina alterniflora* is a typical alien invasive grass species with high reproductivity and adaptability but few natural enemies. *S. alterniflora* reduces the biodiversity and alters the structure and functions of the coastal tidal wetland

基金项目:江苏省自然科学基金项目(BK20201439);国家自然科学基金资助项目(31901393);大学生创新创业训练计划项目(202320304054Z, 202310304145Y)

收稿日期:2023-04-27; **网络出版日期:**2023-12-11

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yis@ntu.edu.cn

ecosystem. The Père David's deer *Elaphurus davidianus*, a Level I national protected species in China, is a paragon of wildlife ex-situ conservation. However, the increasing deer population may induce significant concerns, e.g., the lower stability of wild populations and the decrease of the environmental carrying capacity of conservation areas. *E. davidianus* prefers *S. alterniflora* for grazing, and the grazing activities regulate the spatio-temporal distribution of *S. alterniflora*, which could potentially improve the functions and stability of the coastal tidal wetland ecosystem. Meanwhile, it could be beneficial to accelerate the return to the wild state process for *E. davidianus*. Although some work focusing on *E. davidianus* conservation and *S. alterniflora* prevention has been done, few researches paid attention to their interaction mechanisms. Here, we illustrated the coupling development model and potential interaction mechanisms of *E. davidianus* and *S. alterniflora* based on the grassland agroecosystem theory (i.e., nature-based solutions for overcoming system discordance). We then attempted to break the traditional pattern that split the endangered species conservation and invasive species prevention, and explored the guidelines and practice of terrestrial-marine agriculture. Finally, we discussed the UAV-based space-air-ground integrated monitoring and analysis system for *E. davidianus* conservation and *S. alterniflora* prevention.

Key Words: grassland agroecosystem; endangered species; biological invasion; grassland-livestock interaction; system discordance

互花米草(*Spartina alterniflora*)是禾本科米草属多年生草本植物,适应性强,具有强大的克隆整合与环境饰变能力^[1-2]。互花米草原产于大西洋沿岸,被引入后在我国滨海滩涂湿地呈爆发式扩散,尤其近几十年来以每十年 137 km²的速度扩张^[3],改变了滨海滩涂湿地生态系统的结构和功能,并在一定程度上影响了区域气候^[4-5]。互花米草是我国滨海滩涂湿地生态环境面临的最为严峻的挑战之一,长期投入大量的人力、物力和经费进行防治,但是效果并不理想^[6]。同时,大量的研究证实适宜区域、适量互花米草的防风促淤、保滩护岸作用显著^[7],研究者也逐渐意识到生物防控和合理利用是治理互花米草的有效途径^[8-10]。因此,亟待探究以生态环境和社会经济可持续发展为目标的互花米草合理利用、生物防治的方法与机制。

麋鹿(*Elaphurus davidianus*)是一种大型鹿科偶蹄目麋鹿属动物,被国际自然保护联盟(IUCN)红皮书列为野外灭绝物种^[11],喜食互花米草^[12-13]。麋鹿是我国特有的鹿科动物,也是 I 级重点保护动物,经历了本土野外灭绝、圈养种群引至国外、国外圈养种群重引入、复壮、迁地保护、放归野外,是野生动物迁地保护的典范^[14-15]。随着种群数量的增多,圈养保护方式下麋鹿与环境承载力的矛盾凸显,放归自然是保护的关键步骤也是缓解保护区环境承载力的有效途径^[16]。到目前为止,尚没有在麋鹿野生种群稳定及其合理化管理和利用等方面形成统一的理论和实践指导,仍处于各自为战、摸索前进的阶段^[14, 17]。

随着对人与自然辩证关系认识的深入和传统以技术手段进行生态保护观念的改变,人们开始着眼于自然协调发展,并形成了“基于自然的解决方案”(NBS)理念,即“受到自然启发、支撑并利用自然的解决方案,以有效和适应性手段应对社会挑战,提高经济、社会和环境效益”^[18]。NBS 的核心是提倡依靠自然进行生态保护和治理,其宗旨与草地农业生态系统的系统耦合发展一致,即通过因地制宜、资源有效利用及系统性干预措施,激发各子系统耦合效应以实现生态系统的可持续发展。本文以被广泛关注的麋鹿(珍稀草食性动物)保护和互花米草(典型入侵植物)防治与利用作为切入点,结合前人工作和野外调查,以 NBS 和草地农业生态系统理论为基础论述了二者潜在耦合作用以及其对滨海滩涂湿地生态系统功能和稳定性的影响,以期为珍稀物种保护和生物入侵防治工作提供必要的理论依据,为滨海滩涂湿地生态系统的可持续发展提供参考。

1 NBS 防控互花米草的必要性

1.1 互花米草的引入及现状

我国海岸线总长为 3.2 万 km,滨海滩涂湿地面积约 200 万 hm²,因为大部分缺乏天然植被保护而被严重侵蚀^[4]。为了改良土壤、防风固堤和提升滨海滩涂湿地生态屏障的功能,我国于 1979 年引入互花米草^[19-20]。

因为互花米草具备极强的耐盐、耐淹和繁殖能力,在我国滨海滩涂湿地快速蔓延,被列入原国家环境保护总局公布的首批 16 种造成严重生态危害和经济损失的外来入侵物种名单^[21-22]。互花米草泛滥形成单种优势群落,降低生物的分布数量和种类,破坏了滨海滩涂湿地的生态系统结构和功能^[23],减弱其在调节区域资源平衡、维持区域生态安全及改善环境质量等方面的作用^[24-25]。同时,也直接或间接地给当地经济发展带来重大损失^[23],如影响蛏、贝类滩涂养殖。但值得注意的是,互花米草入侵的不同阶段和程度带来的生态效应和生态问题有所差异。在适宜的区域和合理管理的基础上,互花米草在海岸保护、减缓人地矛盾和生物固碳等方面的作用突出^[26]。例如互花米草保住了温州苍南 15km 海堤免受台风侵袭;上海南汇嘴观海公园由互花米草滩涂开垦而来,成为围填海的典范。因此,目前对互花米草防治和利用的认知及实施中存在诸多不足,探索行之有效的新型防治模式迫在眉睫。

1.2 互花米草入侵原因及防控瓶颈

互花米草入侵主要依靠自身的入侵力、滨海滩涂湿地的可入侵性以及适时的入侵通道^[22, 27-28]。入侵力主要取决于活力繁殖体的可传播性及定植机会窗口的时空可利用性,互花米草兼具无性和有性繁殖方式,在其茎的基部和地下茎的节上常有腋芽伸出土面,并在适宜条件下形成新的植株(图 1)。在立地条件较好的滩涂种子可直接萌发,萌发率达 80%—90%(图 1);叶片盐腺和气孔密布,在高盐度、长时间浸淹的条件下仍能正常生长(图 1);根系发达、植株高大韧性强、耐淤埋、耐风浪,适宜在沿海潮滩生长(图 1)^[22]。生境的可入侵性即对入侵的抵抗力,表现为对互花米草的适合度和原有土著物种对其的竞争、共生等关系^[28]。互花米草适宜较宽广的气候带,滨海滩涂湿地土壤和盐度条件适合其生长^[29-30]。适时提供的入侵通道为互花米草入侵提供了便利。种子可以随风传播,也可以随着潮流运动立地发芽,脱落的互花米草植株也可以随沿岸流进行远距离传播。此外,互花米草还可以借助多种人为方式传播,例如船只、港口及部分陆上运输等无意传播,浙江象山港及杭州湾南岸潮滩互花米草种群就是通过自然媒介和人为无意识传播形成的。



图 1 互花米草的形态及生理结构特征

Fig.1 The morphological and physiological structural characteristics of *S. alterniflora*

①根系发达;②通气组织发达;③具盐腺;④种子产量高、萌发率高;⑤植株高大,茎秆密集

互花米草在自然界中缺乏天敌,到目前为止国内以物理防治为主^[6],但存在如下问题:(1)治理效率低下,泥泞滩涂的作业环境复杂;(2)治理成本高,需要大量的人力、物力和经费支撑;(3)治理难度大,潮水和淤泥等人力和机械等作业困难;(4)效果不明显,互花米草多样的传播途径和繁殖方式导致简单铲除的防治效果不佳;(5)处于被动应对状态,未实现预防和合理控制^[22, 31]。更为关键的是,尽管越来越多的研究者意识到合理利用对防治互花米草比简单去除更有意义,也开展了大量的尝试性的研究工作(例如将其统一收割进行青贮作为饲料或通过深加工制成饮料等^[9]),但是这些方法多数沿用传统技术手段,即需要大量的人力和资源的投入而难以在大范围实施,且多数停留在尝试阶段^[8]。因此,亟需在理论和实践方面寻求基于自然的、适宜大范围实施的解决方案,而通常生物防控是一种最具潜力的方法^[32]。此外,目前多数研究基于站点

尺度,因为样本数量和空间布局有限而无法全面阐释互花米草与其生境间的关系^[1]。卫星遥感观测方法则因为可获取影像的空间、光谱分辨率有限及地面验证资料匮乏等因素难以对互花米草的空间分布和入侵过程进行精确刻画^[33],即无法在大尺度定量解析互花米草扩散过程与其与所处生境的关系。因此,亟待寻求适合大尺度、高分辨率的长期定点监测方法以开展互花米草入侵机制、时空分布格局的研究并探讨合理防治的理论和方法。

2 NBS 麋鹿保护的必要性

2.1 麋鹿灭绝与重引入

历史上麋鹿有 5 种,现存麋鹿为达氏种,其他 4 个种均已灭绝。达氏种麋鹿角主干在前、分叉向后、尾巴为其它鹿类的一倍以上、蹄宽大具有腱膜^[34],适宜湿地环境并且能量转化效率高^[35]。麋鹿原产于我国长江、黄河中下游沼泽地带,起源于 200 万年前。因为栖息地丧失与捕猎增加导致麋鹿野外种群消失,1866—1900 年间在中国本土灭绝,仅有少量麋鹿通过售卖和战争掠夺被境外饲养^[36]。1985 年,我国启动了麋鹿重引入项目,分两批次从英国运回 77 只麋鹿并建立国家级自然保护区对其进行饲养和复壮。

麋鹿重引入并成功恢复野生种群,是全球 138 个物种重引工作中最成功的 15 个之一^[37],中国麋鹿保护工作也得到世界认可。但是,随着麋鹿种群的持续壮大,其与环境承载力矛盾的激化及其可持续管理的问题日益突出,例如大丰麋鹿国家级自然保护区逐年调出适量的麋鹿以缓解种群快速增长对环境的压力,将种群规模维持在适当范围^[14, 38—39]。

2.2 麋鹿野化瓶颈

麋鹿独特的生理结构和性状保证其适应湿地生境的同时也成为其走出湿地的障碍。主要体现在:(1)蹄子宽大,增大了与湿地的接触面积使其适应湿地行走与奔跑,但也导致其无法像高山林地鹿类和其他草食动物一样快速奔跑,更容易被天敌捕食^[35, 40];(2)尾巴较长,有利于驱赶蚊虫,但容易被草木牵绊而不适宜在森林中行动,亦不利于躲避天敌;(3)角主干在前分叉在后,通常鹿角的形态决定了竞争力,麋鹿在与其他鹿种(如马鹿)在打斗上处于劣势^[41—43],即麋鹿“四不像”特征,使其生存空间受限面临着严峻的生态竞争压力^[44]。因此,在其适宜生存的区域改进生存条件,对麋鹿的保护、生存和发展至关重要。

中国麋鹿自重引入后,遵循圈养与半散放种群、保护区野化训练种群到逐步形成自然种群的野生物种保护进程开展保护^[17, 35]。我国麋鹿种群在保护区建群后,数量快速增长、分布点增多。全国现有数量已超过 8000 只;麋鹿分布点从最初的两个发展到 2020 年的 81 个,其中野生种群分布在 6 处。麋鹿以禾本科、苔草类植物为主要食物,尽管在核心繁育区辅以颗粒饲料补饲,但现有麋鹿种群数量已远超栖息地环境容纳量^[45—47]。对于野化训练种群,目前主要依托原保护区和当地林草局等部门进行管理,但尚无明确的管理规范,也没有形成统一的种群监测和分析方法(北京麋鹿生态中心已开始起草“麋鹿人工繁育及放归规范”)^[14]。麋鹿圈养种群有 47 个,多数圈养场所面积小、环境差,麋鹿个体密度高,种群长期处于紧张、应急状态,易引发疾病并加速传染病的传播^[48],与环境承载力的矛盾激化:一方面,随着种群壮大,食物的供给缺口逐渐变大导致保护区的运营成本不断攀升,麋鹿的驯化效果和体况随之下降。另一方面,麋鹿与自然环境的竞争关系加剧,对保护区环境产生负面影响^[16, 44, 49]。

综上所述,目前的麋鹿保护和可持续发展,尤其麋鹿野化过程的长期布局和与环境协调发展方面欠缺,亟待探索行之有效的新型保护、管理的模式和机制。

3 互花米草 & 麋鹿系统耦合途径

系统耦合是指两个或两个以上的具有耦合潜力的子系统,通过人为调控能流、物流和信息流,形成新的、高一级的结构-功能体^[50—51],完善生态系统结构、释放生产潜力和放大系统的生态、经济效益^[52—53]。系统相悖则相反,是子系统在进行系统耦合时发生系统性的结构不完善及由此导致功能不协调,是解放系统生产潜

力的关键所在^[54]。NBS 是以系统耦合为基础,通过系统性干预实现改善生态系统功能,达到可持续发展的目的。结合前期研究和实地监测结果(例如大丰麋鹿保护区试验区高强度麋鹿放牧导致互花米草消失),以草地农业生态系统为理论指导将麋鹿保护和互花米草防治进行有机结合,激发耦合效应、克服系统相悖,有望突破传统各自为战的范式,形成兼顾滨海滩涂湿地环境和濒危物种保护的 NBS。

3.1 互花米草引入-前植物-植物生产层耦合

草地农业生态系统中,草丛-地境界面是最基本的界面,可能由水、热及养分供求之间的不协调引发系统相悖^[54]。滨海滩涂湿地因为土壤盐分含量高及周期性的水淹环境使得少有植被建植(图 2)^[22],形成地境-草丛界面的系统相悖。相较于土著物种,互花米草独特的形态结构和耐盐、耐淹的生理形态特征适宜在潮间带生长(图 1)^[55],将互花米草引入可被视作克服系统相悖的尝试和实践,而且引入初期(抑或将其控制在适宜的区域)其在滨海滩涂湿地生态系统改善方面的作用明显^[4]。但是互花米草快速蔓延导致滨海滩涂湿地的生物多样性下降形成单种优势群落,即发生系统相悖(尤其种间相悖,图 1),集中体现在两方面:其一,互花米草独特的生理、形态结构形成显著的竞争优势,导致其他物种竞争失利消失、改变底栖生物生境、降低生态系统的生物多样性;其二,作为外来物种,互花米草生境优渥且缺乏天敌。因此,草丛-地境界面系统耦合或相悖往往需要在一定的阈值范围内探讨,这一阈值的界定需要大量的实地研究和监测予以确定。同时,说明也扩展生产层对整个系统的良性运行的必要性^[54]。

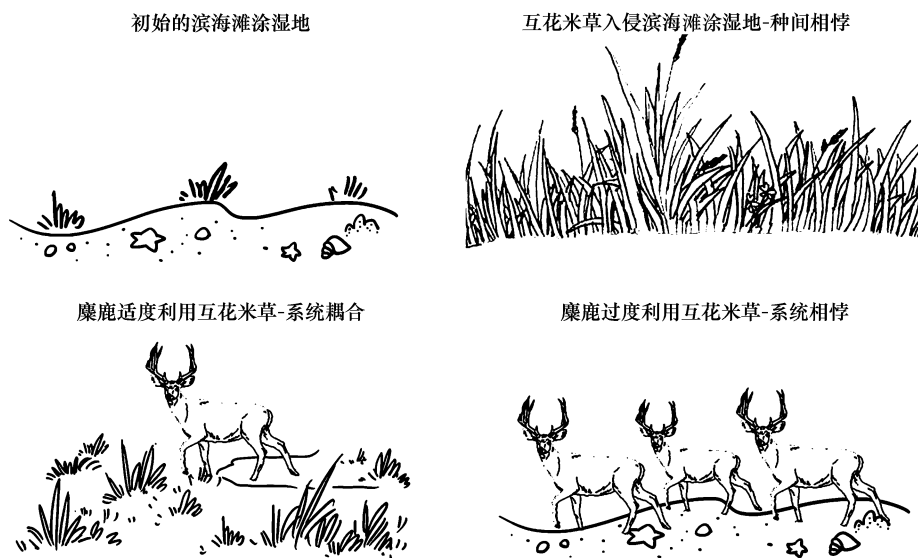


图 2 互花米草 & 麋鹿系统的可能互作模式

Fig.2 The potential interaction patterns of *S. alterniflora* controlling and *E. davidianus* conservation

3.2 麋鹿保护-植物-动物生产层耦合

传统草地农业生态系统中草地-动物界面最为活跃,是催化系统耦合的关键^[54]。滨海滩涂湿地生态系统在缺失动物生产层(除部分底栖生物)的条件下,互花米草大量繁殖导致系统结构和功能的改变和破坏。类同于我国传统农业系统中因缺少或忽视动物生产层导致生产效益至少减少 50%和系统生态缺陷^[56]。参考草地农业耦合生态系统引入草食动物,可通过其采食、践踏和排泄的方式加速系统物质循环、提高生态经济效益^[57]。麋鹿采食互花米草能使其地上部分结构和功能消失,并且通过肠道消化加速系统物质循环和改善土壤养分状况,而且放牧强度决定麋鹿对互花米草的影响^[45, 58],也是激发系统耦合的直接动力:(1)不放牧时两个系统独立,形成空间系统相悖。一方面,互花米草快速入侵改变滨海滩涂湿地生态环境和功能(图 2),另一方面,麋鹿在有限的活动空间靠采购或者收割饲料喂养,耗费大量的经费和人力、物力,也不利于麋鹿保护和驯化,难以真正实现回归自然的目标;(2)适度放牧实现系统耦合,适当强度的采食和践踏降低互花米草的

群落优势度^[13],有效防止互花米草抽穗,避免其纤维化程度增高、可食性降低和通过种子过度繁殖^[12](图2),即通过麋鹿放牧压力迫使互花米草改变生存策略,将更多的能量和资源用于维持自身生长(如被采食植株会不断生长出鲜嫩的叶片)^[12],限制其分配给无性繁殖的能量输送,并且有效降低互花米草种子成熟的数量和质量,阻断互花米草繁殖和扩张的途径,既保证互花米草的生态和经济功能,也防止其泛滥破坏滨海滩涂湿地生态系统。同时,麋鹿反复采食使得互花米草植株一直保持幼嫩状态、适口性好,养分含量高,有利于加速麋鹿回归、提升其生产、繁殖性能;(3)麋鹿过度采食和践踏去除互花米草地上部分导致其无法通过光合作用获取生长和生殖的营养,并且无法排解高浓度盐分,从而加速互花米草的消亡(图2),例如在大丰麋鹿保护区试验区2019年开始放牧约900头麋鹿,其中靠近堤坝树荫区(便于乘凉,且堤坝另一侧有水源),经过一年多高强度的麋鹿放牧,互花米草不复存在(图3),而且互花米草分布区由堤坝区向后退缩约400 m。因此,适当的管理措施可实现互花米草合理防治和麋鹿保护、畜产品生产的耦合发展。

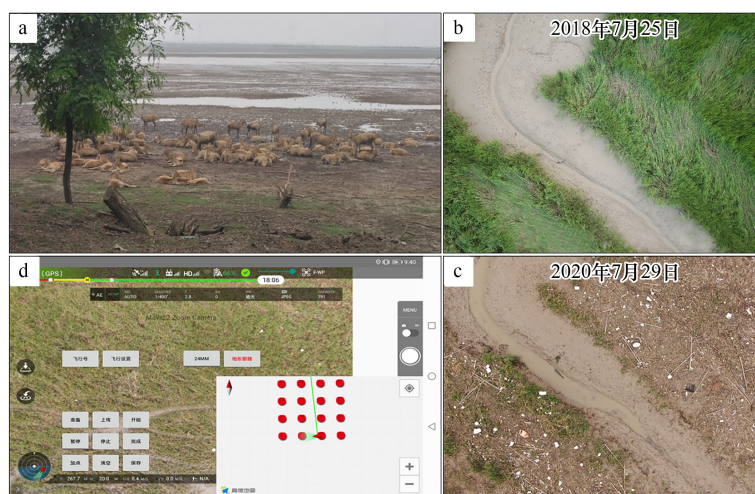


图3 江苏大丰麋鹿国家级自然保护区高强度放牧麋鹿(靠近堤坝区)导致互花米草消亡

Fig.3 The *S. alterniflora* disappeared from the fixed monitoring points after heavy grazing of *E. davidianus* since 2019

(a) 麋鹿在堤坝树荫处进行卧息;(b)一(c)利用 FragMAP 系统拍摄麋鹿高强度放牧前后互花米草的状态(分别在2018年7月25日和2020年7月29日,麋鹿于2019年开始引入该试验区);(d)FragMAP 系统监测互花米草的控制界面

3.3 合理化管理

草地农业生态系统是人为调控下的自然-社会生态系统,社会因素是系统进化和生产潜力解放的内因^[54],即构建互花米草 & 麋鹿系统后,还需要通过合理化管理实现系统的多生产层耦合。例如在综合评估互花米草实现相应的生态功能的基础上(如防风固堤),可将过剩的部分用于放牧麋鹿。保证调控互花米草优势度的同时,也可解决长期以来在小范围圈围区域活动而引发的栖息地退化,为麋鹿提供更为良好的野化或生存环境^[13, 16]。互花米草 & 麋鹿系统中,可以依据麋鹿的生活习性实现其时空分布的调控,例如在夏季可通过搭建遮阳棚、种植其不采食的植被以及提供水源等措施将麋鹿引导至互花米草集中分布区域(图3,沿堤坝树荫下麋鹿高频度采食、践踏和卧息活动使得互花米草消亡)从而达到精准防治的结果^[13, 16]。这些基于麋鹿行为习惯的管理方式能够促进麋鹿迅速完成环境适应和野化过程,更早完成保护目标的同时,也可增加其观赏性并提升麋鹿数量,逐步形成与之对应的畜产品深加工、旅游、转运等。可借鉴的案例如祁连山高山草原-甘肃马鹿(*Cervus elaphus kansuensis*)生产系统通过优化管理引发系统耦合,使经济效益提高3.3倍,并且由于生态环境改善而增加生态系统服务价值^[54]。因此,互花米草 & 麋鹿系统将小范围圈养的方式改进为适当人为调控的自然放牧的保护方式,将有利于麋鹿逐步野化放归自然并实现入侵生物防治、珍稀物种保护、固碳清淤等多赢的局面。

综上所述,系统耦合最基本的意义在于激发生态系统的生产潜力,但在进行系统耦合时也往往伴随着

系统相悖。应因势利导,通过基于自然的方案和合理化的管理措施实现互花米草 & 麋鹿系统耦合和可持续发展。

4 互花米草 & 麋鹿耦合系统的生态系统功能和稳定性

4.1 互花米草 & 麋鹿耦合系统功能和服务

生物入侵是当前最棘手的三大环境问题之一^[59],直接或间接地改变被入侵生态系统的结构,并最终导致生态系统的退化及功能和服务的丧失^[60],严重威胁区域生态安全 and 经济发展^[61]。互花米草是典型的入侵草本植物,草地农业生态系统耦合理论认为不能为人类所直接利用的植物产品,可经过草食动物而转化为动物性产品,即实现动物生产层与植物生产层链接以取得经济、生态和社会效益。同时,草食动物通过踩踏和体内消化等作用加速植物的分解速度,从而促进生态系统的活力,即系统耦合可在较短时间内控制生态环境恶化,拓宽系统的生态阈值,并作为一个整体在多变的环境中具备更高的活性与缓冲能力^[54]。将麋鹿(抑或其他适宜草食动物,即动物生产层)与互花米草(植物生产层)结合,通过麋鹿等草食动物调控互花米草的时空分布格局,借助合理化管理进行分类利用与管理,可降低互花米草优势度,增加生物多样性并且维持其保滩促淤作用。同时,强化耦合系统在生态旅游和畜牧产业的功能并加速珍稀物种迅速野化回归的进程^[62](图4)。因此,互花米草 & 麋鹿耦合系统可充分利用自然生态系统的自调节属性,克服系统相悖以提升生态系统的多功能和服务性,实现耦合系统的可持续发展。

4.2 互花米草 & 麋鹿耦合系统的稳定性

可持续发展不是指保持生态系统一成不变地处于某一阶段,而是动态进化、平稳运转的状态^[35]。耦合系统多稳定潜势是系统的安全阀,避免生态和经济效益的大幅波动,实现生态系统高水平地平滑运转^[54],互花米草 & 麋鹿耦合系统具备更高的生物多样性和更多的生产层,受干扰时维持自身结构和功能、抵抗偏离的能力更强,即具备更高的稳定性和可持续性^[63-66](图4)。生物多样性通过缓冲和补偿效应促进生态系统稳定性^[67],一方面更多具有独特生活史策略的物种更有利于抵御环境扰动并在经受胁迫后群落具备快速恢复的能力^[64,68];另一方面,不同物种对环境波动的响应不同,某些物种功能减少可由其他物种的增加来补偿(即异步性)以保证群落的稳定性^[69-70]。更多的生产层能够增加系统的多稳定潜势,应对环境变化的能力更强,在管理过程中应充分考虑生产层的扩展,并且重视自然过程的作用。因此,互花米草 & 麋鹿耦合系统的构建不仅保护麋鹿本身,借此产生的生产层扩展和系列物种的增加(如植物、无脊椎动物、鱼类和水禽等)更有利于搭建滨海滩涂湿地生物多样性保护网络^[35],实现恢复后生态系统的稳定性和可持续性。

5 技术保障和研究展望

5.1 技术保障

互花米草 & 麋鹿耦合系统能够有效克服系统相悖,通过自然解决方案实现滨海滩涂湿地生态系统的可持续发展并加速麋鹿保护进程。然而,实施过程仍会面临诸多挑战,需要完备的风险评估和应急保障:

(1) 不同管理模式区域的高精度划分和风险评估。明析互花米草的时空分布格局,综合评估各区域的生态服务价值和风险并精准划分是合理利用和防治互花米草的前提之一。滨海滩涂湿地受到独特地理环境和交通通达性的限制,难以直接开展基于地面的区域尺度的互花米草监测和评估。卫星遥感方法受云雨较多气候条件的影响,难以获取高分辨率的卫星影像^[71]。无人机遥感技术飞行高度低、不受云层影响、操控简单并且灵活高效,逐渐成为海岸带高空间分辨率数据获取有利工具^[72-73],也将大幅提升刻画互花米草时空分布格局的精确度。在此基础上,综合评价互花米草的生态服务功能并划定适宜管理方式的实施区域,例如依据评估结果精确划定互花米草提供促淤护岸的区域(同样需要合理管控以防止过度泛滥)。需要指出的是这个过程需要长期、综合、系统的观测和分析,除了无人机等技术的观测和规划外,大量社会调查以及应对气候、环境变化的考量也必不可少,是系统性的工作。

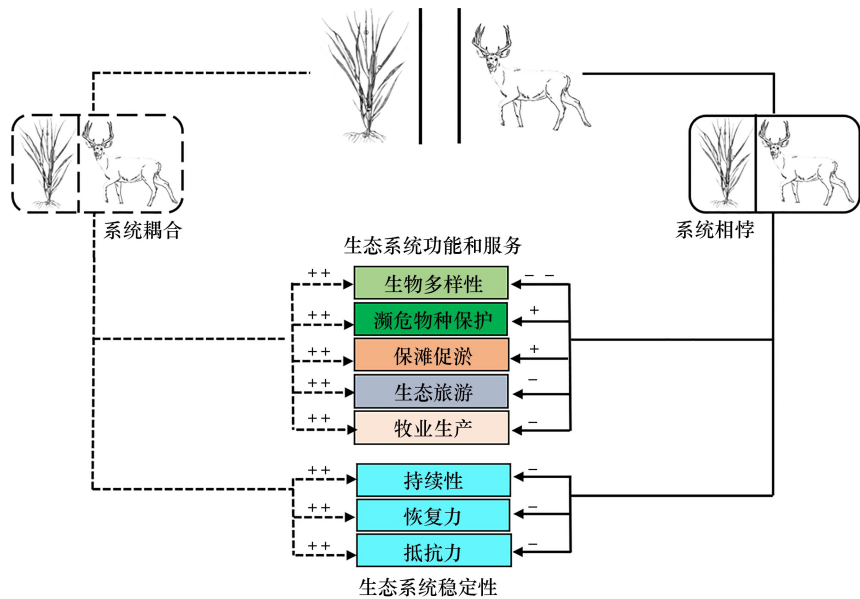


图 4 系统耦合与相悖对互花米草 & 麋鹿的生态系统功能和服务的作用比较

Fig.4 Comparison of the effects of system coupling vs. discordance of *E. davidianus* & *S. alterniflora* on ecosystem functions and services

(2)合理管控与应急。合理的管理和应急措施是耦合系统健康发展的必要保障。一方面,尽管实施系统耦合时互花米草已经处于入侵状态,但是也同样需要开展定期、定点的观测,用于评估耦合系统的运行状态并进行实时调整,例如通过引导、限制等方式调整放牧强度确保耦合系统的维系与发展。另一方面,需要在耦合系统边缘区高密度布设无人机观测点,通过高测频率监测和及时施治有效防治互花米草种群的扩散(例如利用 FragMAP 系统开展高效、协同的长期定点监测^[74—75])。根据麋鹿群居的特性,利用全球定位系统(GPS)项圈或者电子耳标等手段结合无人机航拍技术监测麋鹿的行为特征、种群结构等特征^[72],适时进行必要的人工调控及疾病防治等^[17],例如通过及时准确的评估,如果发现麋鹿放牧过度,通过搭建凉棚等手段引导麋鹿向环境承载力高的区域采食、活动,即确保耦合系统可持续发展的同时也加速麋鹿野化、回归自然的进程。

5.2 研究展望

标准化的基础数据和管理是互花米草 & 麋鹿耦合系统发展的重要保障,未来可能需要着重从以下方面拓展:

(1)监测与规划体系。遥感影像精度的提升和无人机个性化路径规划及控制平台的日趋成熟,为构建耦合系统空-天-地一体化的监测和规划体系提供了技术支撑^[74],可实现准确刻画互花米草的时空分布格局、解析影响其时空分布的关键因素,了解和掌握该物种入侵的生态学过程、实施“精准防控”和合理管理,也可准确监测麋鹿的动态,掌握其种群时空分布的动态以及种群构成情况。据此,结合生态环境信息逐步构建评价体系,明确麋鹿种群与其生境承载力的关系,减缓麋鹿种群与环境承载力的矛盾,促进麋鹿种群健康发展和保护进程^[44]。

(2)协作范式。依据标准化的监测和规划体系搭建跨区域、跨领域的信息交流和科学研究平台,实现数据共享^[76],从而提高预防风险的能力。例如通过协调合作逐步实现麋鹿可能发生的重大疾病、互花米草泛滥成灾预警机制^[14, 17, 77],切实提升系统性的整体规划^[44],突破传统珍稀物种保护和入侵物种防治各自为战的范式,构建物种保护-生物防治-经济发展新思路,探索和推进区域协同、一体化管理方式创新。此外,还需探索耦合系统与周边群众“双赢”的保护和治理方式,共同参与管理耦合系统,例如依托 FragMAP 系统,借助移动终端(手机等)和消费级无人机搭建“公民科学家”的参与范式,切实引导群众走符合自然生态规律的和谐发展道路^[17]。与此同时,推动麋鹿保护和滨海滩涂湿地生态系统的可持续发展^[20, 44, 78],发展草地农业生态系

统耦合理论为生物多样性保护和生态文明建设蓄积力量,也是我国发展陆海农业理念的实践性尝试^[79]。

(3) 制度保障。我国珍惜物种保护相关的法律法规较为成熟,但在种群健康维持及其与周围居民关系方面的内容较少。麋鹿在耦合系统中往往难以自然调整种群结构。随着麋鹿的繁殖和快速野化,可借鉴国际上对一些大型动物采取有计划地狩猎来调控种群结构的方式^[80],对野生麋鹿种群采取一定的种群结构调控促进其健康繁衍^[81]。例如可在国家野生动物主管部门统筹规划下,在耦合系统中适当淘汰不良个体,以控制种群结构,保持种群基因健康发展^[17],亦即通过旅游(前植物生产层)、畜产品(动物生产层)等扩展生产层提升耦合系统的生态-经济-社会效益^[54,56]。

参考文献(References):

- [1] 赵志远,袁琳,李伟,朱晓涇,潘家琳,陈雅慧,张利权. 生境异质性及源株密度对互花米草入侵力的影响. 生态学报, 2018, 38(18): 6632-6641.
- [2] 徐伟伟,王国祥,刘金娥,陈正勇,杭子清,王会. 苏北海滨湿地互花米草种群繁殖方式. 生态学报, 2014, 34(14): 3839-3847.
- [3] Liu M Y, Mao D H, Wang Z M, Li L, Man W D, Jia M M, Ren C Y, Zhang Y Z. Rapid invasion of *Spartina alterniflora* in the coastal zone of mainland China: new observations from landsat OLI images. Remote Sensing, 2018, 10(12): 1933.
- [4] 李加林,杨晓平,童亿勤,张殿发,沈永明,张忍顺. 互花米草入侵对潮滩生态系统服务功能的影响及其管理. 海洋通报, 2005, 24(5): 33-38.
- [5] Zhang Y H, Ding W X, Luo J F, Donnison A. Changes in soil organic carbon dynamics in an Eastern Chinese coastal wetland following invasion by a C₄ plant *Spartina alterniflora*. Soil Biology and Biochemistry, 2010, 42(10): 1712-1720.
- [6] 谢宝华,韩广轩. 外来入侵种互花米草防治研究进展. 应用生态学报, 2018, 29(10): 3464-3476.
- [7] Qin P, Xie M, Jiang Y S, Chung C H. Estimation of the ecological-economic benefits of two *Spartina alterniflora* plantations in North Jiangsu, China. Ecological Engineering, 1997, 8(1): 5-17.
- [8] 谢宝华,路峰,韩广轩. 入侵植物互花米草的资源化利用研究进展. 中国生态农业学报:中英文, 2019, 27(12): 1870-1879.
- [9] 刘金娥,钦佩,周虹霞,谢民. 米草生态工程加环效益能值分析. 应用生态学报, 2004, 15(4): 673-677.
- [10] Daehler C C, Strong D R. Status, prediction and prevention of introduced cordgrass *Spartina* spp. invasions in Pacific Estuaries, USA. Biological Conservation, 1996, 78(1/2): 51-58.
- [11] 王立波,丁玉华,魏吉祥. 大丰麋鹿种群增长抑制因素初步探讨. 野生动物, 2009, 30(6): 299-301.
- [12] 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.
- [13] 丁晶晶,薛欢,朱立峰,丁玉华,常青,侯立冰,王磊. 江苏大丰野生麋鹿种群及其栖息地保护. 野生动物学报, 2015, 36(3): 265-269.
- [14] 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.
- [15] 丁玉华. 麋鹿回归大丰 35 周年. 特种经济动植物, 2021, 24(9): 1-2.
- [16] 徐安宏,俞晓鹏. 大丰麋鹿保护现状与可持续发展策略探讨. 安徽农业科学, 2019, 47(5): 107-109.
- [17] 张树苗,白加德,李夷平,陈颀,程志斌,孟庆辉,胡德夫,梁兵宽. 中国麋鹿迁地保护现状保护模式及保护建议. 林业资源管理, 2017(2): 16-22.
- [18] Commission E. Towards and EU Research and Innovation Policy Agenda for Nature-based Solutions and Re-naturing Cities. Final Report of the Horizon 2020 Expert Group on "Nature-Based Solutions and Re-naturing cities, 2015, pp:74.
- [19] 宋连清. 互花米草及其对海岸的防护作用. 东海海洋, 1997, 15(1): 11-19.
- [20] 李晶,雷茵茹,崔丽娟,潘旭,张骁栋,张曼胤,李伟. 我国滨海滩涂湿地现状及研究进展. 林业资源管理, 2018(2): 24-28, 137.
- [21] An S, Gu B, Zhou C F, Wang Z S, Deng Z F, Zhi Y B, Li H L, Chen L, Yu D H, Liu Y H. *Spartina* invasion in China: implications for invasive species management and future research. Weed Research, 2007, 47: 183-191.
- [22] 王卿,安树青,马志军,赵斌,陈家宽,李博. 入侵植物互花米草-生物学,生态学及管理, 2006, 44(5): 559-588.
- [23] Li B, Liao C Z, Zhang X D, Chen H L, Wang Q, Chen Z Y, Gan X J, Wu J H, Zhao B, Ma Z J, Cheng X L, Jiang L F, Chen J K. *Spartina alterniflora* invasions in the Yangtze River Estuary, China: an overview of current status and ecosystem effects. Ecological Engineering, 2009, 35(4): 511-520.
- [24] Liu J E, Zhou H X, Qin P, Zhou J, Wang G X. Comparisons of ecosystem services among three conversion systems in Yancheng National Nature Reserve. Ecological Engineering, 2009, 35(5): 609-629.
- [25] Beaumont N J, Jones L, Garbutt A, Hansom J D, Toberman M. The value of carbon sequestration and storage in coastal habitats. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2014, 137: 32-40.

- [26] Zhang X H, Zhang Z S, Li Z, Li M, Wu H T, Jiang M. Impacts of *Spartina alterniflora* invasion on soil carbon contents and stability in the Yellow River Delta, China. *Science of the Total Environment*, 2021, 775: 145188.
- [27] 邓自发, 安树青, 智颖颢, 周长芳, 陈琳, 赵聪蛟, 方淑波, 李红丽. 外来种互花米草入侵模式与爆发机制. *生态学报*, 2006, 26(8): 2678-2686.
- [28] Alpert P, Bone E, Holzapfel C. Invasiveness, invasibility and the role of environmental stress in the spread of non-native plants. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 2000, 3(1): 52-66.
- [29] 沈永明, 刘咏梅, 陈全站. 江苏沿海互花米草(*Spartina alterniflora* Loisel)盐沼扩展过程的遥感分析. *植物资源与环境学报*, 2002, 11(2): 33-38.
- [30] 刘春悦, 张树清, 江红星, 王会. 江苏盐城滨海湿地外来种互花米草的时空动态及景观格局. *应用生态学报*, 2009, 20(4): 901-908.
- [31] Hedge P, Kriwoken L, Patten K. A review of *Spartina* management in Washington state, US. *Journal of Aquatic Plant Management*, 2003, 41(2): 82-90.
- [32] 彭少麟, 向言词. 植物外来种入侵及其对生态系统的影响. *生态学报*, 1999, 19(4): 560-568.
- [33] Adam E, Mutanga O, Rugege D. Multispectral and hyperspectral remote sensing for identification and mapping of wetland vegetation: a review. *Wetlands Ecology and Management*, 2010, 18(3): 281-296.
- [34] 曹克清. 麋鹿研究. 上海: 上海科技教育出版社, 2005.
- [35] 杨戎生. 麋鹿回归自然与湿地生态系统的保护. 中国动物学会北方六省市学术会议, 1997.
- [36] 白加德. 麋鹿生物学研究. 北京: 北京科学技术出版社, 2014.
- [37] 杜悦英. 麋鹿: 野生动物保护的中国样本. *中国发展观察*, 2018(8): 50-52.
- [38] 于长青, 梁崇歧, 陆军, 丁玉华. 大丰麋鹿种群的增长与管理. *兽类学报*, 1996, 16(4): 259-263, 261.
- [39] 刘彬, 安玉亭, 薛丹丹, 孙大明, 王立波, 刘德元, 任义军, 沈华. 人类活动对野化麋鹿生存的影响及保护对策. *四川动物*, 2021, 40(2): 176-182.
- [40] 赵世臻. 麋鹿与梅花鹿、马鹿之不同. *特种经济动植物*, 2009, 12(7): 5-6.
- [41] 包海鹰. 我国鹿类及各种鹿角形态特征的研究. *中医药信息*, 1994, 11(5): 27-31.
- [42] Blob R W, Labarbera M. Correlates of variation in Deer antler stiffness: age, mineral content, intra-antler location, habitat, and phylogeny. *Biological Journal of the Linnean Society*, 2001, 74(1): 113-120.
- [43] Blob R W, Snelgrove J M. Antler stiffness in moose (*Alces alces*): correlated evolution of bone function and material properties? *Journal of Morphology*, 2006, 267(9): 1075-1086.
- [44] 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.
- [45] 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.
- [46] 田宏, 温华军, 李鹏飞, 张鹤山, 熊军波, 刘洋, 党志强. 麋鹿栖息地混播人工草地初级生产力及营养物质动态研究. *家畜生态学报*, 2021, 42(7): 65-69.
- [47] 任义军, 孙大明, 甄军爱, 王立波, 赵雨梦, 沈华, 刘彬, 陈玉清. 江苏大丰麋鹿国家级自然保护区麋鹿死亡分析. *兽类学报*, 2022, 42(6): 741-748.
- [48] 张树苗, 刘丹妮, 白加德, 李夷平, 吴越, 陈硕, 常江, 侯文华. 麋鹿栖息地水体溶解性有机质光谱学特征. *环境科学与技术*, 2018, 41(10): 13-20.
- [49] 丁玉华, 丁晶晶, 李鹏飞, 朱建强. 中国野生麋鹿种群发展策略探究. *江苏林业科技*, 2018, 45(5): 49-51, 56.
- [50] 任继周. 草地农业生态学. 北京: 中国农业出版社, 1995.
- [51] 任继周, 万长贵. 系统耦合与荒漠—绿洲草地农业系统——以祁连山—临泽剖面为例. *草业学报*, 1994, 3(3): 1-8.
- [52] 任继周, 朱兴运. 中国河西走廊草地农业的基本格局和它的系统相悖——草原退化的机理初探——. *草业学报*, 1995, 4(1): 69-79.
- [53] 任继周, 贺达汉, 王宁, 朱兴运, 李镇清. 荒漠—绿洲草地农业系统的耦合与模型. *草业学报*, 1995, 4(2): 11-19.
- [54] 林慧龙, 侯扶江. 草地农业生态系统中的系统耦合与系统相悖研究动态. *生态学报*, 2004, 24(6): 1252-1258.
- [55] Bertness M D. Zonation of *Spartina patens* and *Spartina alterniflora* in new England salt marsh. *Ecology*, 1991, 72(1): 138-148.
- [56] 任继周, 李向林, 侯扶江. 草地农业生态学研究进展与趋势. *应用生态学报*, 2002, 13(8): 1017-1021.
- [57] McNaughton S J, Banyikwa F F, McNaughton M M. Promotion of the cycling of diet-enhancing nutrients by African grazers. *Science*, 1997, 278(5344): 1798-1800.
- [58] 侯扶江, 杨中艺. 放牧对草地的作用. *生态学报*, 2006, 26(1): 244-264.
- [59] Sala O E, Chapin F S 3rd, Armesto J J, Berlow E, Bloomfield J, Dirzo R, Huber-Sanwald E, Huenneke L F, Jackson R B, Kinzig A, Leemans

- R, Lodge D M, Mooney H A, Oesterheld M, Poff N L, Sykes M T, Walker B H, Walker M, Wall D H. Global biodiversity scenarios for the year 2100. *Science*, 2000, 287(5459): 1770-1774.
- [60] McKinney M L, Lockwood J L. Biotic homogenization: a few winners replacing many losers in the next mass extinction. *Trends in Ecology & Evolution*, 1999, 14(11): 450-453.
- [61] Pimentel D, Lach L, Zuniga R, Morrison D. Environmental and economic costs of nonindigenous species in the United States. *BioScience*, 2000, 50(1): 53-65.
- [62] 张宏, 黄震方, 方叶林, 涂玮, 王坤. 湿地自然保护区旅游者环境教育感知研究——以盐城丹顶鹤、麋鹿自然保护区为例. *生态学报*, 2015, 35(23): 7899-7911.
- [63] Ives A R, Carpenter S R. Stability and diversity of ecosystems. *Science*, 2007, 317(5834): 58-62.
- [64] 方精云, 景海春, 张文浩, 高树琴, 段子渊, 王竑晟, 钟瑾, 潘庆民, 赵凯, 白文明, 李凌浩, 白永飞, 蒋高明, 黄建辉, 黄振英. 论草牧业的理论体系及其实践. *科学通报*, 2018, 63(17): 1619-1631.
- [65] Bai Y F, Han X G, Wu J G, Chen Z Z, Li L H. Ecosystem stability and compensatory effects in the Inner Mongolia grassland. *Nature*, 2004, 431(7005): 181-184.
- [66] Isbell F, Craven D, Connolly J, Loreau M, Schmid B, Beierkuhnlein C, Bezemer T M, Bonin C, Bruehlheide H, de Luca E, Ebeling A, Griffin J N, Guo Q F, Hautier Y, Hector A, Jentsch A, Kreyling J, Lanta V, Manning P, Meyer S T, Mori A S, Naeem S, Niklaus P A, Polley H W, Reich P B, Roscher C, Seabloom E W, Smith M D, Thakur M P, Tilman D, Tracy B F, van der Putten W H, van Ruijven J, Weigelt A, Weisser W W, Wilsey B, Eisenhauer N. Biodiversity increases the resistance of ecosystem productivity to climate extremes. *Nature*, 2015, 526(7574): 574-577.
- [67] 贺金生, 卜海燕, 胡小文, 冯彦皓, 李守丽, 朱剑霄, 刘国华, 王彦荣, 南志标. 退化高寒草地的近自然恢复: 理论基础与技术途径. *科学通报*, 2020, 65(34): 3898-3908.
- [68] Tilman D, Downing J A. Biodiversity and stability in grasslands. *Nature*, 1994, 367(6461): 363-365.
- [69] Naeem S, Li S B. Biodiversity enhances ecosystem reliability. *Nature*, 1997, 390(6659): 507-509.
- [70] Tilman D, Reich P B, Knops J M H. Biodiversity and ecosystem stability in a decade-long grassland experiment. *Nature*, 2006, 441(7093): 629-632.
- [71] 陈祖刚, 巴图娜存, 徐芝英, 胡云锋. 基于数码相机的草地植被盖度测量方法对比研究. *草业学报*, 2014, 23(6): 20-27.
- [72] Sun Y, Yi S H, Hou F J, Luo D W, Hu J Q, Zhou Z Y. Quantifying the dynamics of livestock distribution by unmanned aerial vehicles (UAVs): a case study of yak grazing at the household scale. *Rangeland Ecology & Management*, 2020, 73(5): 642-648.
- [73] Zhu X D, Meng L X, Zhang Y H, Weng Q H, Morris J. Tidal and meteorological influences on the growth of invasive *Spartina alterniflora*: evidence from UAV remote sensing. *Remote Sensing*, 2019, 11(10): 1208.
- [74] 孙义, 秦彧, 魏天锋, 常丽, 张仁平, 刘志有, 吕燕燕, 宜树华. 草地植物物种多样性测度方法及发展趋势. *应用生态学报*, 2022, 33(3): 655-663.
- [75] Yi S H. FragMAP: a tool for long-term and cooperative monitoring and analysis of small-scale habitat fragmentation using an unmanned aerial vehicle. *International Journal of Remote Sensing*, 2017, 38(8/9/10): 2686-2697.
- [76] 张树苗, 梁兵宽, 张林源, 李坤. 中国麋鹿种群现状与潜在资源利用. *林业调查规划*, 2009, 34(4): 41-45.
- [77] 张林源, 温华军, 钟震宇, 李鹏飞, 王文, 李坤, 沙平. 湖北石首野生麋鹿种群大量死亡原因调查. *畜牧与兽医*, 2011, 43(4): 89-91.
- [78] Liu J G, Dietz T, Carpenter S R, Alberti M, Folke C, Moran E, Pell A N, Deadman P, Kratz T, Lubchenco J, Ostrom E, Ouyang Z Y, Provencher W, Redman C L, Schneider S H, Taylor W W. Complexity of coupled human and natural systems. *Science*, 2007, 317(5844): 1513-1516.
- [79] 任继周. 中国亟需从陆地农业到陆海农业的战略转移——中国实现农业现代化的最后一个台阶. *草业学报*, 2020, 29(8): 1-5.
- [80] Foote T J, Foote E. Demographic and genetic status and management// *The Biology and Management of Extinct Species Pere David's deer*. New Jersey: Noyes Publications, 1983, pp:133-186.
- [81] 蒋志刚. 保护生物学. 杭州: 浙江科学技术出版社, 1997.