网络出版时间:2025-08-07 DOI:10.13207/j.jnwafu.2026.02.009

# 气候变暖和降水变化对草地植物多样性-群落生产力及其稳定性关系的影响

阿旺[1,2],吕汪汪[2],孙建平[2],李博文[2],汪诗平[2]

(1 西藏大学 生态环境学院,西藏 拉萨 850000;2 中国科学院 青藏高原研究所 青藏高原地球系统与资源环境国家重点实验室,北京 100101)

[摘 要] 在气候变暖和降水格局改变的背景下,如何确保草地生态系统持续稳定地发挥功能并提供生态服务,依赖于对生物多样性-群落生产力及其稳定性关系的系统研究,这也是当前全球变化生态学研究的热点之一。文章系统综述了国内外在全球变化生态学领域的最新研究进展,重点包括以下 3 个方面:第一,回顾了物种多样性对生产力及其稳定性的内在影响机制;第二,总结了基于野外控制试验等方法,研究植物多样性-生产力及其稳定性关系响应气候变暖和降水变化的最新研究成果;第三,探讨了气候变暖和降水变化下植物物种组成的动态变化对群落生产力稳定性的关键调控作用。最后提出了亟需在草地生态系统植物群落稳定性及其作用机制研究中深入探讨的关键问题与未来研究方向。

[关键词] 草地生态系统;气候变暖;降水变化;物种多样性;群落生产力;群落稳定性

[中图分类号] S812;Q948.112 [文献标志码] A [文章编号] 1671-9387(2026)02-0085-10

# Effects of climate warming and precipitation change on the relationship between plant diversity-community productivity and its stability in grassland

A Wang[1,2],LÜ Wangwang[2],SUN Jianping[2],LI Bowen[2],WANG Shiping[2]

(1 *School of Ecology and Environment,Tibet University,Lhasa,Xizang* 850000,*China*;2 *State Key Laboratory of Tibetan Plateau Earth System,Resources and Environment,Institute of Tibetan Plateau Research,Chinese Academy of Sciences,Beijing* 100101,*China*)

**Abstract**: Under the background of climate warming and changing precipitation pattern,how to ensure the sustainable and stable function of grassland ecosystem and their ability to provide ecological services depends on comprehensive study of the relationship between biodiversity and productivity and its stability. This is also one of the central focus in the study of global change ecology. This paper systematically reviews the latest research progress in global change ecology at home and abroad,focusing on the following three aspects:First,we provide an overview of how species diversity affects productivity and its stability,as well as the potential mechanisms underlying these effects. Second,we provide a detailed overview of recent studies on the relationship between plant diversity and productivity and its stability in response to climate warming and changing precipitation,based on field experiments and other methods. Finally,we explore how dynamic changes in plant species composition play a crucial role in regulating the stability of community

[收稿日期] 2024-08-27 [修回日期] 2024-11-18

[基金项目] 国家自然科学基金项目(32201358);西藏自治区那曲市科技局重大项目(NQKJ-023-03);阿里地区科技局区域科技协同创新专项(QYXTZX-AL2022-05)

[作者简介] 阿旺(1995—),男,西藏拉孜人,讲师,博士,主要从事生态系统稳定性研究。E-mail:ngawang@utibet.edu.cn

[通信作者] 汪诗平(1964—),男,安徽桐城人,研究员,博士,主要从事气候变化、草原管理以及草地畜牧业可持续发展研究。E-mail:wangsp@itpcas.ac.cn

productivity. Therefore, this paper puts forward some suggestions on the key issues and future research directions of plant community stability and its mechanism in a grassland ecosystem.

**Key words**: grassland ecosystem; climate warming; precipitation change; species diversity; community productivity; community stability

目前,全球温室气体的排放量每年高达550亿t二氧化碳当量,远高于19世纪工业革命前的排放量,直接推动了全球气温的上升[1]。相较于工业革命前的气候状态,地球表面温度已经上升了1.2 ℃[1],根据模型预测结果,未来全球气温还将持续上升[2]。随着地球表面温度持续上升,冰川和冻土融化速度不断加快,冰川和雪的覆盖范围逐渐缩小,地面蒸发增加,进一步影响大气中的水汽压,从而改变大气水循环模式[3],这些变化最终导致了全球降水格局的巨大转变[4]。当前,全球不同地区的降水变化呈现出较大的区域差异,整体上陆地降水呈增加趋势,同时不同地区极端降水和干旱事件的频率与强度也在增加[2],这种极端干旱和降水事件的增加导致生态环境和社会问题日益严重。另有研究预测这种变化在未来将持续加剧[5]。

气候变化正在重塑全球物种分布格局,导致物种向极地、高海拔或更深水域迁移[6],从而影响生物多样性、生态功能及多样性-功能的关系[7-10]。草地生态系统约占全球陆地面积的25%,贡献了全球陆地生态系统20%以上的生产力[11],为人类生存提供了不可替代的功能和服务(如生态系统碳平衡、涵养水源、保持水土、调节气候以及保障畜牧业等)[12]。气候变化正在影响着草地植物多样性及一系列生态系统功能,如生产力及其稳定性[11,13]。气候变化背景下,能够适应变化并增加丰度的物种通常被称为"赢家",而那些无法应对气候变化导致丰度降低的物种被称为"输家"[14],当赢家和输家物种数量不平衡时,气候变化会对当地植物多样性产生影响[15]。这一变化将会改变植物多样性-生态系统功能和维持生态系统功能(即生产力及其稳定性)的关系。然而,目前对于增温和降水变化如何调控植物多样性-生产力及其稳定性关系的认识相对不足。

大多数物种多样性试验通过单播、两两混播或多个物种混播的方式来比较不同丰富度下的生产力等功能(相较于天然草地,这些人为构建群落的物种丰富度相对较低),这类试验中物种多样性与群落生产力及其稳定性之间往往呈正相关关系[16]。这与物种相对丰富的天然草地不完全相同[17-18],甚至相反[19]。值得注意的是,通过物种多样性控制试验与野外物种随机剔除试验模拟全球生物多样性丧失对生态系统功能的影响研究时,所得到的研究结果可能不同,甚至结论彼此矛盾[20-21]。此外,在具备一定物种数量的天然生态系统中,多样性可以通过增加种间异步性维持其生态系统功能[22],这也使得种间异步性(尤其是随时间物种组成变化驱动的群落演替)成为解释气候变化对生态系统功能影响的重要生物机制之一[23-24]。然而,气候变化背景下,群落组成变化如何调控多样性-生产力及其稳定性关系的研究综述较少。因此,本研究在系统梳理自然条件下草地植物多样性-生产力及其稳定性关系的基础上,着重讨论气候变化对草地植物多样性、生产力及其稳定性关系的影响及作用机制,为推动中国气候变化对草地植物多样性-生产力及其稳定关系的研究提供依据。

## 1 草地植物多样性-群落生产力的关系

物种多样性控制试验结果表明,多样性增加有利于提高生产力,主要由于物种多样性的增加扩大了群落可利用资源的种类和范围,增强了种间资源的互补,使群落可以获得更多的资源,进而增加群落生物量[16,25]。TILMAN等[26]通过物种多样性以及不同干扰的控制试验,研究了草原植物多样性丧失对生产力的影响,揭示其至少与氮、二氧化碳、降水、食草动物的变化以及火灾干扰的影响一样大。但是,一些学者强烈质疑该观点,其认为群落内高产物种的数量决定了群落生产力。因为在均质生境中,由于物种间的代谢和光合作用效率各不相同,具有较强竞争力的物种能够更高效地利用有限资源来产生较高的生产力[27-28]。

在天然草地生态系统中,高植物多样性维持高生产力的主要机制包括种间生态位差异、资源互补性、有限资源的高效利用性、微环境的改善和食草动物以及病害的降低等[16,29]。具体来说:(1)物种快速生长期因不同季节而分化,促进了年群落生物量的最大化,即物种通过在不同季节的异步性或生态位的互补性来维持其生态系统功能[30];(2)群落内豆科植物的存在增加了土壤固氮,提高了邻近物种的养分供给,这种种间资源互补有利于提高群落生

产力[31]；(3)在恶劣的环境条件下，具有较强耐受性的物种能够创造独特的微环境条件，有助于邻近物种的生存和生长[29]。最近，有学者通过面板数据分析(panel data analysis)发现，在天然草地生态系统中，物种丰富度的增加降低了生产力，并强调以往多样性与生态系统功能关系的研究未控制其他因素的影响[19]，例如温度、降水、养分、土壤微生物和病原体等调控植物多样性-生产力关系的因素[9,32-33]。此外，在多样性试验中，缺乏针对优势种(或常见种)与非优势种以及入侵物种之间组合或混播的设计[19]，导致以往研究结果很难直接推广到天然草地生态系统。

## 2　草地植物多样性-群落生产力稳定性的关系

植物多样性是维持群落生产力的重要生物机制。TILMAN 等[16]结合试验研究结果以及其他有关多样性的研究发现，丰富的物种多样性增加了群落生产力的时间稳定性($\mu/\sigma$)。ISBELL 等[34]综合分析 46 个草地的植物多样性模拟试验数据发现，丰富的多样性增加了生态系统对各种气候事件的抗性，包括潮湿或干燥、中度或极端、短暂或长期的降水和干旱事件。然而，生态系统恢复力对物种丰富度无明显的依赖，但高均匀度提高了其恢复力[35]。GARCÍA-PALACIOS 等[7]研究发现，在极端干旱条件下，叶片性状的多样性对生态系统的稳定性发挥着重要作用，这项研究强调了性状多样性研究的必要性。首先，物种多样性增加了不同干扰条件下耐受性或适应性物种存在的可能性。例如，在植物多样性丰富的群落中，某物种遭灾后其他物种会快速挤占该物种的资源和生长空间来维持其生态系统生产力，这一作用机制被称为“保险效应”。在具备一定物种多样性的天然草地中，保险效应或种间异步性是物种多样性应对外界干扰并维持其生态系统功能的主要机制[22]。其次，多物种组成群落的生产力大于单物种或低多样性的群落，物种多样性可以通过增加群落生产力均值来提高生态系统生产力的稳定性[36]，这一作用机制被称为“超产效应”。在物种多样性试验中，超产效应较为常见，当物种增加到一定数量时，生物量达到最大值，而向该生态系统继续添加物种对生产力作用不大，但会增加种群波动[16]。然而，人们对于多样性通过增加群落生产力提高其稳定性背后的理论或原理仍缺乏认识。草地生产力增加可促进畜牧业发展、提高生态系统固碳潜力等服务功能，这可能有利于维持社会稳定以及依靠草地维持生存的动物稳定性(如食物链的稳定性[37])。综上所述，某环境条件变化下，物种多样性有利于群落中那些最适应变化环境或最能高效利用资源的物种成为优势种，从而提高资源利用率并维持其群落生产力。另外，最近有研究发现多样性有利于维持土壤温度的稳定性，进而有助于维持群落生产力的稳定性[38]。

虽有研究表明，物种多样性是维持生产力稳定性的重要生物机制，但野外模拟气候变化试验及物种剔除试验结果并不支持该结论。HOULAHAN 等[39]通过对 91 篇文章的整合分析表明，其中支持物种多样性-群落生产力稳定性呈现显著正相关的有 26 篇，负相关的有 7 篇。然而，物种多样性-群落生产力稳定性关系依赖于空间尺度。在大尺度上，生物多样性和稳定性才能呈现正相关[40]。值得关注的是，天然草地生态系统遇到外界干扰时，物种多样性间接通过增加种间异步性来提高群落生产力的稳定性[22,41]。此外，在验证多样性-稳定性关系的野外模拟气候变化试验中，缺乏物种多样性以及不同物种数量(如物种剔除试验)与不同干扰的耦合试验[42]，导致难以验证物种多样性在维持生态系统功能中的作用[19]。

## 3　增温对草地植物多样性-群落生产力关系的影响

植物多样性-群落生产力关系对增温的响应依赖于群落固有物种多样性的水平及非优势物种的增加。SHAO 等[8]的文献综述表明，增温条件下，当群落物种丰富度低于 10 种时，物种丰富度与生产力呈现正相关；而当群落物种丰富度高于 10 种时，物种丰富度与生产力的关系则呈现负相关。关于其作用机制：首先，在物种越丰富的群落中，对气候变化敏感的物种数量越多，导致此类植物群落(如生产力)对变暖气候胁迫的抵抗力降低[43]。其次，气候变暖胁迫本地物种(尤其是优势种)，而不断增加非优势种和入侵种[44]。非优势种和非本地物种多数属于低产物种[19]，由此导致的物种丰富度降低以及非本地物种入侵产生的化感作用均会降低生产力[45]。此外，植物多样性受增温方式的影响，例如开顶式气室(open top chamber，OTC)增温可能抑制物种的入侵，同时可能降低风速，从而影响种子扩散[46-47]，导致植物多样性降低，而其生产力增加[48]。

物种多样性对增温的响应不仅依赖于当地降水量，而且受群落年龄的影响；而生产力对增温的响应

受当地降水量、群落组成变化(尤其是优势种的转变)等影响。因此,增温对草地植物多样性-群落生产力关系的调控随时间、空间的变化可能存在多种情景,包括正相关、负相关和不相关。在全球尺度上增温增加了植被生产力,主要是寒区的植被生产力[49],因为气候变暖缓解了植被生长的低温限制。此外,可能的作用机制还包括:(1)增温激发土壤氮矿化,为植物生长提供更多的养分[50]。(2)气候变暖不断增加热适应物种和植物群落温度指数[51-52]。然而,热适应物种的光合速率高于冷适应物种,在变暖条件下可保持甚至增加产量。(3)在温暖的气候中,春天植物返青的提前和秋天枯黄的延迟,延长了生长季节的长度[53],可能会增加生产力。但是在部分地区(如干旱地区)增温降低了地上生产力,这主要是因为增温导致的土壤水分降低会对植物产生负效应[54-55]。值得注意的是,增温对生产力的影响随时间推移而减弱[18],这可能与物种组成的变化有关。此外,气候变暖和降水变化之间的相互作用共同影响植被生产力[17]。但是,随着增温年限增加,群落演替将会逐渐抵消增温和降水变化对植被生产力的交互影响[56]。

在全球尺度上,增温会导致干旱(年降水量$<$300 mm)和低海拔($<$1 000 m)草地的物种丰富度降低[47],还会降低受水分限制的高寒草原的物种丰富度,但增温对水分相对充足的高寒草甸的物种丰富度不会产生显著影响[48]。模拟增温显著降低物种丰富度,但对香农-维纳多样性指数无显著影响[13]。物种多样性对增温的响应不仅依赖于当地降水量,而且受草地类型和增温年限的影响:(1)草地类型。以温度为限制因素的草地生态系统中,适应增温的物种可能多于其他地区,增温有利于维持和增加其植物多样性[57]。(2)增温年限。局部物种多样性是由物种的迁入速率和已有物种的消失或灭绝速率共同决定的。当物种迁入速率和消失速率相等时,二者可能处于动态平衡状态,此时物种丰富度不变而物种周转率增加。如 PLOTTO 等[58]研究发现,变暖未对欧洲高山植物物种丰富度产生影响,但显著增加了物种周转率。定点短期脉冲增温的时间往往不能满足植物物种迁移、定植所需的时间,更多反映在增温对植物产生的胁迫作用,进而导致消失物种的增加。长期增温试验则出现不变或相反的结果。例如,在高寒草甸增温 18 年后,迁入种通过定植和竞争释放(优势物种的转变)弥补了增温前期所降低的物种丰富度[59]。总体而言,在不同草地生态系统中,增温对植物多样性与生产力的影响方向、大小及其作用机制不完全相同。因此,增温对草地植物多样性-群落生产力关系的影响在不同时间和空间上存在差异。

## 4 增温对草地植物多样性-群落生产力稳定性关系的影响

在增温条件下,植物多样性仍是维持群落生产力稳定性的重要生物机制。虽然以往研究揭示种间异步性是维持生态系统稳定性的重要生物机制[41,60],但是物种多样性是发生群落组成的变化(尤其是优势种转变及群落演替)和产生种间异步性的前提和基础。XU 等[22]研究发现,在全球不同生态系统(陆地和海洋)中,物种多样性通过增加种间异步性($n=51$)来提高生态系统功能稳定性或维持生产力。TILMAN[61]认为当某个物种处于最适温度时,其对资源的需求或利用最大,其自身的竞争能力也最强。增温直接导致了原有物种所处的温度条件发生变化,从而影响了其生长的最适温度条件。在全球尺度上,长期增温导致热适应物种不断扩张,冷适应物种的生存范围缩减,群落温度指数上升[52]。然而,定点短期脉冲增温的时间往往不足以满足植物物种完成迁移以及定植。因此,短期增温试验结果主要反映的是脉冲增温对植物物种胁迫引起的物种迁出或消失,这与物种丰富度对长期增温响应的结果[62]相反。例如,对高山、高海拔区域植物群落特征进行的长期定位监测发现,近 100 年随着温度增加,物种丰富度呈现上升趋势[62];另有一项 14 年的长期增温试验表明,增温前期对物种组成未产生显著影响,后期则相反[44]。因此,由短期模拟增温试验结果很难推断气候变化对多样性-生产力稳定性关系的真实影响的方向和大小。此外,短期增温主要通过降低种间异步性对群落生产力稳定性产生负面影响[17,63],而长期增温可能通过增加种间异步性维持群落生产力。例如,随着试验年限延长,迁入物种和非优势种不断增加[44],导致优势种以及草地类型转变[24,56],进而维持草地生态系统功能。这表明种间异步性对生态系统功能的正响应依赖于时间,甚至 10 年以上的增温时间才能显现出其在维持生态系统功能中的作用[23]。

增温对群落生产力及其稳定性的影响表现并不一致,包括增加[64]、降低[63]或不变[65]。有研究发现,生产力稳定性随增温时间呈非线性变化[18],其变化机制也随时间而变化[23],这可能与群落的演替

有关。理论生态学预测，生态系统对干扰（如气候变化）的响应因不同演替阶段而异[66]。并且有研究发现，功能群的转变或组成变化驱动的群落演替决定了生产力的稳定性[56,64]。然而，群落演替的过程中，赢家和输家物种的数量不平衡，导致植物多样性本身可能处于不稳定状态，促使物种多样性-群落生产力及其稳定性呈现出多样化的关系[39,67]。此外，生产力稳定性受均匀度的影响[35]，主要表现在优势种对功能稳定性的驱动[68]。因此，植物多样性和群落组成变化共同驱动功能稳定性。但是，目前缺乏这 2 种因素对功能稳定性相对贡献的量化分析。此外，物种多样性也会受群落组成变化的影响。例如，在高寒草地中，暖干化会促进高大物种，如禾本科（如紫花针茅）的生长（相对于莎草科[24,55]），进而限制矮小物种的受光面积，加剧光竞争，降低物种多样性[69]。然而，这种优势种的转变将会提高群落生产力的稳定性[70]。

在气候变化背景下，高产物种和低产物种互相转变也会调控物种多样性-群落生产力稳定性的关系。如增温通过促进光合效率较高的 $C_4$ 植物生长来增强群落生产力稳定性[56,64]。但是，在增温条件下，能够迅速生长并提高生产力的物种，在面临其他干扰胁迫后，恢复其原始状态的能力未必比其他物种好[71]，相反可能更为敏感。例如，与快速生长的物种相比，慢速生长的物种（尤其是那些富含干物质的物种）对环境扰动的敏感性较低[72-73]。这引发了物种组成变化对生态系统生产力稳定性影响的不确定性，并因之出现了影响生产力稳定性的多种机制，如优势种的转变、异步性的降低或增加、植物多样性和优势度的变化。总体而言，群落内拥有抗具体干扰特性的高产物种或基因，对于维持生产力的稳定性至关重要[74]。

## 5　降水变化对草地植物多样性-群落生产力及其稳定性关系的影响

以往研究表明，降水减少对植被生长（植物多样性、生产力及其稳定性）具有负效应，降水增加则相反[41,75-78]。尤其是在水分受限制的地区（如干旱地区），植被对降水变化的敏感性大于降水丰沛地区[79]。其中，在干旱及半干旱草地上，降水减少会使植物过度消耗土壤水分，导致次年土壤水分不足[77]，增加土壤水分的年际变异，进而降低植被稳定性。生长在荒漠草原上的植物多数为深根系，轻度干旱对荒漠草原群落生产力稳定性无显著影响[41]。此外，降水减少会使土壤中硝态氮和微生物氮含量降低[13,80]，同时干旱会引起高温胁迫，这些均不利于维持植物稳定性。

降水增加不仅可以有效缓解土壤水分亏缺对植物生长的抑制，而且有利于豆科植物的生长，进而增加土壤固氮以及增加根的生产和周转，促进氮的矿化，使土壤可利用氮含量增加，促进种间资源互补，从而有利于植被生长[31,80-82]。但降水增加到某种程度之后，伴随着径流的增多[7]，水分可利用性降低、土壤养分流失加剧；同时，土壤水分过多还会导致植物根系缺氧，从而抑制植被生长[83]。当降水增加的方式为暴雨或强降水时，土壤养分、种子的严重流失和花絮的破坏可能不利于植物多样性、生产力及其稳定性[84-85]。值得注意的是，一般草地的植被生长变化由少数极端干旱和强降水事件主导[86]，以往模拟降水变化的控制试验往往会低估降水变化对植物群落的影响[87]。此外，虽然冬、春季干旱对深根系植物的生长不会产生很大影响[88]，但会推迟浅根系植物的物候[89]，并抑制其生长[55]。这将增加深根系植物和浅根系植物之间返青的时间间隔，从而增加深根系植物获取营养和扩大生长的时空范围，提高其生产力[90]。例如，减水会增加耐旱禾本科植物盖度，而降低莎草科植物比例[55]。也有研究表明，极端干旱条件下禾本科植物的地下芽库储备充足，恢复过程中其芽库迅速萌蘖，对裸地进行有效补充，抢占生态位空间，促使禾草功能群的繁盛[91]。因此，全球各地多样化草地可能通过扩展本地耐旱物种而对干旱具有更强的恢复力[74]。这一变化使得种间异步性成为降水影响群落生产力稳定性变化的主要生物机制[41,75-76]。降水增加会导致适应在干旱或半干旱条件下生长的植物叶片形态和生理特征改变[13]，并有利于杂类草的生长[81,90]。

总体来看，降水变化对植物多样性的影响方向与其对生产力及其稳定性的影响方向基本一致。因此，很少有研究报道降水变化对植物多样性-生产力及其稳定性关系的调控作用，但在持续暖湿化和暖干化背景下，群落将进一步发生演替[9]。演替中期物种组成由演替早期物种和晚期物种重叠构成，导致演替中期多样性高峰以及高产物种与低产物种相互取代，进而促使多样性-生产力关系的正相关与负相关产生转变[92]。在全球尺度上，物种多样性-生产力的关系变化依赖于干旱程度[7]。例如，在中度和重度干旱条件下，温带草原上的物种多样性-生产力关系呈显著正相关[10]。因此，生态系统遇到气候变化等强烈干扰时，该生态系统才可能表现出物种

多样性在维持生态系统功能中的作用[93]。

## 6 展 望

多年来植物多样性试验和长期定点监测研究促进了人们对草地植物多样性-功能关系的认知,揭示了物种多样性在维持草地生态系统功能中具有不可替代的作用。此外,近几年来模拟气候变化干扰对多样性-稳定性关系影响的研究取得了新的认识,特别强调了在多样性丰富的天然草地生态系统中,气候变化影响草地群落生产力及其稳定性的生物机制为种间异步性及其物种组成因气候和时间变化驱动的群落演替,这些研究结果为了解气候变化对生态系统功能、功能维持(生产力及其稳定性)和多样性-功能关系的影响提供了很好的科学依据,并为今后多样性-功能关系的研究奠定了基础。基于当前研究的不足,在未来研究中亟需关注以下 4 个关键问题:

1)关注植物群落组成的稳定性。HOPPING 等[94]研究发现,增温在促进灌木生长并提高生产力的同时,可能会增强生产力的时间稳定性,但是会降低生态系统的服务功能。此外,随时间推移,气候变化所降低的生产力稳定性可能会通过保险效应恢复至原始状态,而群落组成却难以恢复到原有状态。相较于单纯研究地上植物多样性-群落总生产力及其稳定性关系,未来更需要多维度评估物种功能(如防御病虫害、药材价值等)以及组成稳定性对气候变化的响应。

2)加强多样性与干扰、增温及降水变化耦合试验的研究。①全球环境变化野外模拟试验所处群落的固有多样性(低、中、高生物多样性)和物种组成不同,很难揭示生态系统遇到干扰时,多样性起到的作用方向和大小。因此,建议加强物种多样性(进行常见种与非优势种、入侵物种的混合播种,旨在实现尽可能接近自然的物种组成)与干扰的耦合试验研究,进一步揭示多样性对生态系统维持功能的贡献及有关机制。②增温和降水变化共同影响了植物群落,然而以往模拟气候变化的试验以单独增温或降水变化等单个处理为主,而单因子试验结果可能会高估或低估群落对气候变化的响应程度,甚至会得出相反的结论。随着全球温度升高,干旱和极端降水事件频繁发生[2],野外气候变暖模拟试验中不能忽视降水(尤其是极端干旱和降水事件)变化的影响[70,95]。

3)需要长期监测气候变化对植物群落特征的影响。生产力稳定性的影响机制随时间推移而发生转变,这可能与群落组成变化有关。例如,在青藏高原以禾本科为主的群落生产力稳定性低于以莎草科为主的群落[68]。在全球尺度上,杂类草的稳定性大于禾本科的稳定性。但是,气候变化条件下地上净初级生产力(above net primary productivity,ANPP)的稳定性主要受到禾本科植物稳定性的调控[65]。因此,功能群变化(即不同功能群对特定干扰的响应)可能调控 ANPP 稳定性对气候变化的响应[64,96],这将会促使物种组成稳定性与生产力稳定性之间产生各种关系[67,97]。然而,物种组成变化驱动的群落演替如何调控物种多样性与 ANPP 稳定性之间关系,目前的认知仍较为有限。因此,需要在不同草地类型中开展长期气候变化试验的比较研究,且应该更加关注群落演替。

4)需要关注地下生产力稳定性及多样性的变化。CHEN 等[98]对青藏高原不同草地类型的监测发现,地形、环境条件、植物多样性和土壤多样性对生态系统功能稳定性的贡献分别占 4%,42%,39% 和 15%。有研究表明,干旱导致的微生物群落简化可能会削弱群落的稳定性[99]。此外,也有研究表明,面对极端干旱事件,气候变暖对植物地上和地下生产力稳定性的影响作用方向相反[100]。气候变化不仅通过地上物种多样性影响生产力稳定性,还可能通过地下根系、微生物结构和土壤动物影响生态系统的稳定性[98,101]。研究地下生物多样性的变化过程是揭示植物生产力稳定性影响机制的重要部分,未来稳定性的研究需要进一步扩展到生态系统水平上,包括地下生物多样性-生态系统功能的关系。

## [参考文献]


[1] FORSTER P M,SMITH C J,WALSH T,et al. Indicators of global climate change 2022:annual update of large-scale indicators of the state of the climate system and human influence [J]. Earth System Science Data,2023,15(6):2295-2327.

[2] MASSON-DELMOTTE V,ZHAI P,PIRANI A,et al. Climate change 2021:the physical science basis[M]. Cambridge:Cambridge University Press,2021.

[3] DAVIES B,MCNABB R,BENDLE J,et al. Accelerating glacier volume loss on Juneau Icefield driven by hypsometry and melt-accelerating feedbacks[J]. Nature Communications,2024,15(1):5099.

[4] STEPHENS G L,HU Y X. Are climate-related changes to the character of global-mean precipitation predictable? [J]. Environmental Research Letters,2010,5(2):25209-25215.

[5] TRANCOSO R, SYKTUS J, ALLAN R P, et al. Significantly wetter or drier future conditions for one to two thirds of the world's population [J]. Nature Communications, 2024, 15(1): 483.

[6] PÖRTNER H O, SCHOLES R J, ARNETH A, et al. Overcoming the coupled climate and biodiversity crises and their societal impacts [J]. Science, 2023, 380(6642): eabl4881.

[7] GARCÍA-PALACIOS P, GROSS N, GAITÁN J, et al. Climate mediates the biodiversity-ecosystem stability relationship globally [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2018, 115(33): 8400-8405.

[8] SHAO J J, ZHOU X H, VAN GROENIGEN K J, et al. Warming effects on grassland productivity depend on plant diversity [J]. Global Ecology and Biogeography, 2022, 31(3): 588-598.

[9] WANG Y F, DU J Q, PANG Z, et al. Unimodal productivity-biodiversity relationship along the gradient of multidimensional resources across Chinese grasslands [J]. National Science Review, 2022, 9(12): nwac165.

[10] ZUO X A, LI X Y, YUE P, et al. Drought-driven shifts in relationships between plant biodiversity and productivity in temperate steppes [J]. Functional Ecology, 2022, 36(12): 2917-2928.

[11] HE M, PAN Y H, ZHOU G Y, et al. Grazing and global change factors differentially affect biodiversity-ecosystem functioning relationships in grassland ecosystems [J]. Global Change Biology, 2022, 28(18): 5492-5504.

[12] BENGTSSON J, BULLOCK J M, EGOH B, et al. Grasslands: more important for ecosystem services than you might think [J]. Ecosphere, 2019, 10(2): e02582.

[13] WANG Y F, LÜ W W, XUE K, et al. Grassland changes and adaptive management on the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2022, 3(10): 668-683.

[14] MCKINNEY M L, LOCKWOOD J L. Biotic homogenization: a few winners replacing many losers in the next mass extinction [J]. Trends in Ecology & Evolution, 1999, 14(11): 450-453.

[15] DORNELAS M, GOTELLI N J, SHIMADZU H, et al. A balance of winners and losers in the anthropocene [J]. Ecology Letters, 2019, 22(5): 847-854.

[16] TILMAN D, ISBELL F, COWLES J M. Biodiversity and ecosystem functioning [J]. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 2014, 45: 471-493.

[17] MA Z Y, LIU H Y, MI Z R, et al. Climate warming reduces the temporal stability of plant community biomass production [J]. Nature Communications, 2017, 8: 15378.

[18] LIU P P, LÜ W W, SUN J P, et al. Ambient climate determines the directional trend of community stability under warming and grazing [J]. Global Change Biology, 2021, 27(20): 5198-5210.

[19] DEE L E, FERRARO P J, SEVEREN C N, et al. Clarifying the effect of biodiversity on productivity in natural ecosystems with longitudinal data and methods for causal inference [J]. Nature Communications, 2023, 14(1): 2607.

[20] WARDLE D A. Do experiments exploring plant diversity-ecosystem functioning relationships inform how biodiversity loss impacts natural ecosystems? [J]. Journal of Vegetation Science, 2016, 27(3): 646-653.

[21] PAN Q M, SYMSTAD A J, BAI Y F, et al. Biodiversity-productivity relationships in a natural grassland community vary under diversity loss scenarios [J]. Journal of Ecology, 2022, 110(1): 210-220.

[22] XU Q N, YANG X, YAN Y, et al. Consistently positive effect of species diversity on ecosystem, but not population, temporal stability [J]. Ecology Letters, 2021, 24(10): 2256-2266.

[23] WAGG C, ROSCHER C, WEIGELT A, et al. Biodiversity-stability relationships strengthen over time in a long-term grassland experiment [J]. Nature Communications, 2022, 13(1): 7752.

[24] WANG Y F, XUE K, HU R H, et al. Vegetation structural shift tells environmental changes on the Tibetan Plateau over 40 years [J]. Science Bulletin, 2023, 68(17): 1928-1937.

[25] LÜ X T, HU Y Y, WOLF A A, et al. Species richness mediates within-species nutrient resorption: implications for the biodiversity-productivity relationship [J]. Journal of Ecology, 2019, 107(5): 2346-2352.

[26] TILMAN D, REICH P B, ISBELL F. Biodiversity impacts ecosystem productivity as much as resources, disturbance, or herbivory [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2012, 109(26): 10394-10397.

[27] HUSTON M A. Hidden treatments in ecological experiments: re-evaluating the ecosystem function of biodiversity [J]. Oecologia, 1997, 110(4): 449-460.

[28] LOREAU M, HECTOR A. Partitioning selection and complementarity in biodiversity experiments [J]. Nature, 2001, 412(6842): 72-76.

[29] CAVIERES L A, BROOKER R W, BUTTERFIELD B J, et al. Facilitative plant interactions and climate simultaneously drive alpine plant diversity [J]. Ecology Letters, 2014, 17(2): 193-202.

[30] WANG H, LIU H Y, CAO G M, et al. Alpine grassland plants grow earlier and faster but biomass remains unchanged over 35 years of climate change [J]. Ecology Letters, 2020, 23(4): 701-710.

[31] FORNARA D A, TILMAN D. Plant functional composition influences rates of soil carbon and nitrogen accumulation [J]. Journal of Ecology, 2008, 96(2): 314-322.

[32] LIANG M X, LIU X B, PARKER I M, et al. Soil microbes drive phylogenetic diversity-productivity relationships in a subtropical forest [J]. Science Advances, 2019, 5(10): eaax5088.

[33] WANG G Z, BURRILL H M, PODZIKOWSKI L Y, et al. Dilution of specialist pathogens drives productivity benefits from diversity in plant mixtures [J]. Nature Communications, 2023, 14(1): 8417.

[34] ISBELL F,CRAVEN D,CONNOLLY J,et al. Biodiversity increases the resistance of ecosystem productivity to climate extremes[J]. Nature,2015,526(7574):574-577.

[35] HILLEBRAND H,BENNETT D M,CADOTTE M W. Consequences of dominance:a review of evenness effects on local and regional ecosystem processes[J]. Ecology,2008,89(6):1510-1520.

[36] HECTOR A,HAUTIER Y,SANER P,et al. General stabilizing effects of plant diversity on grassland productivity through population asynchrony and overyielding[J]. Ecology,2010,91(8):2213-2220.

[37] MACARTHUR R. Fluctuations of animal populations and a measure of community stability[J]. Ecology,1955,36(3):533-536.

[38] HUANG Y Y,STEIN G,KOLLE O,et al. Enhanced stability of grassland soil temperature by plant diversity[J]. Nature Geoscience,2024,17:44-50.

[39] HOULAHAN J E,CURRIE D J,COTTENIE K,et al. Negative relationships between species richness and temporal variability are common but weak in natural systems[J]. Ecology,2018,99(11):2592-2604.

[40] MENG Y N,LI S P,WANG S P,et al. Scale-dependent changes in ecosystem temporal stability over six decades of succession[J]. Science Advances,2023,9(40):eadi1279.

[41] MURAINA T O,XU C,YU Q,et al. Species asynchrony stabilises productivity under extreme drought across Northern China grasslands[J]. Journal of Ecology,2021,109(4):1665-1675.

[42] 李周园,叶小洲,王少鹏. 生态系统稳定性及其与生物多样性的关系[J]. 植物生态学报,2021,45(10):1127-1139.
LI Z Y,YE X Z,WANG S P. Ecosystem stability and its relationship with biodiversity[J]. Chinese Journal of Plant Ecology,2021,45(10):1127-1139.

[43] LOREAU M,DE MAZANCOURT C. Biodiversity and ecosystem stability:a synthesis of underlying mechanisms[J]. Ecology Letters,2013,16:106-115.

[44] SHI Z,SHERRY R,XU X,et al. Evidence for long-term shift in plant community composition under decadal experimental warming[J]. Journal of Ecology,2015,103(5):1131-1140.

[45] XU Y,CHEN X,DING L,et al. Allelopathy and allelochemicals in grasslands and forests[J]. Forests,2023,14(3):562.

[46] YANG Y,HALBRITTER A H,KLANDERUD K,et al. Transplants,open top chambers (OTCs) and gradient studies ask different questions in climate change effects studies[J]. Frontiers in Plant Science,2018,9:1574.

[47] PISEDDU F,BELLOCCHI G,PICON-COCHARD C. Mowing and warming effects on grassland species richness and harvested biomass:meta-analyses[J]. Agronomy for Sustainable Development,2021,41(6):74.

[48] 朴世龙,张宪洲,汪涛,等. 青藏高原生态系统对气候变化的响应及其反馈[J]. 科学通报,2019,64(27):2842-2855.
PIAO S L,ZHANG X Z,WANG T,et al. Responses and feedback of the Tibetan Plateau's alpine ecosystem to climate change[J]. Chinese Science Bulletin,2019,64(27):2842-2855.

[49] WANG N,QUESADA B,XIA L L,et al. Effects of climate warming on carbon fluxes in grasslands:a global meta-analysis[J]. Global Change Biology,2019,25(5):1839-1851.

[50] MELILLO J M,STEUDLER P A,ABER J D,et al. Soil warming and carbon-cycle feedbacks to the climate system[J]. Science,2002,298(5601):2173-2176.

[51] ELMENDORF S C,HENRY G H R,HOLLISTER R D,et al. Experiment,monitoring,and gradient methods used to infer climate change effects on plant communities yield consistent patterns[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,2015,112(2):448-452.

[52] FEELEY K J,BRAVO-AVILA C,FADRIQUE B,et al. Climate-driven changes in the composition of New World plant communities[J]. Nature Climate Change,2020,10:965-970.

[53] PIAO S L,LIU Q,CHEN A P,et al. Plant phenology and global climate change:current progresses and challenges[J]. Global Change Biology,2019,25(6):1922-1940.

[54] ZHAO J X,LUO T X,WEI H X,et al. Increased precipitation offsets the negative effect of warming on plant biomass and ecosystem respiration in a Tibetan alpine steppe[J]. Agricultural and Forest Meteorology,2019,279:107761.

[55] LIU H Y,MI Z R,LIN L,et al. Shifting plant species composition in response to climate change stabilizes grassland primary production[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,2018,115(16):4051-4056.

[56] SHI Z,LIN Y,WILCOX K R,et al. Successional change in species composition alters climate sensitivity of grassland productivity[J]. Global Change Biology,2018,24(10):4993-5003.

[57] WANG Q,ZHANG Z H,DU R,et al. Richness of plant communities plays a larger role than climate in determining responses of species richness to climate change[J]. Journal of Ecology,2019,107(4):1944-1955.

[58] PILOTTO F,KÜHN I,ADRIAN R,et al. Meta-analysis of multidecadal biodiversity trends in Europe[J]. Nature Communications,2020,11(1):3486.

[59] ZHANG C H,WILLIS C G,KLEIN J A,et al. Recovery of plant species diversity during long-term experimental warming of a species-rich alpine meadow community on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Biological Conservation,2017,213:218-224.

[60] HAUTIER Y,SEABLOOM E W,BORER E T,et al. Eutrophication weakens stabilizing effects of diversity in natural grasslands[J]. Nature,2014,508(7497):521-525.

[61] TILMAN D. The ecological consequences of changes in biodiversity:a search for general principles[J]. Ecology,1999,80(5):1455.

[62] STEINBAUER M J,GRYTNES J A,JURASINSKI G,et al. Accelerated increase in plant species richness on mountain

summits is linked to warming[J]. Nature, 2018, 556(7700): 231-234.

[63] QUAN Q, ZHANG F Y, JIANG L, et al. High-level rather than low-level warming destabilizes plant community biomass production[J]. Journal of Ecology, 2021, 109(4): 1607-1617.

[64] SHI Z, XU X, SOUZA L, et al. Dual mechanisms regulate ecosystem stability under decade-long warming and hay harvest[J]. Nature Communications, 2016, 7: 11973.

[65] SU J S, ZHAO Y J, XU F W, et al. Multiple global changes drive grassland productivity and stability: a meta-analysis[J]. Journal of Ecology, 2022, 110(12): 2850-2869.

[66] ODUM E P. The strategy of ecosystem development[J]. Science, 1969, 164(3877): 262-270.

[67] ZHANG Y H, JIN B C, ZHANG X L, et al. Grazing alters the relationships between species diversity and biomass during community succession in a semiarid grassland[J]. Science of the Total Environment, 2023, 887: 164155.

[68] HOU G, SHI P L, ZHOU T C, et al. Dominant species play a leading role in shaping community stability in the northern Tibetan grasslands[J]. Journal of Plant Ecology, 2023, 16(3): rtac110.

[69] ESKELINEN A, HARPOLE W S, JESSEN M T, et al. Light competition drives herbivore and nutrient effects on plant diversity[J]. Nature, 2022, 611(7935): 301-305.

[70] YAN Y J, MA F F, WANG J S, et al. Warming stabilizes alpine ecosystem facing extreme rainfall events by changing plant species composition[J]. Journal of Ecology, 2023, 111(9): 2064-2076.

[71] SCHWALM C R, ANDEREGG W R L, MICHALAK A M, et al. Global patterns of drought recovery[J]. Nature, 2017, 548(7666): 202-205.

[72] POLLEY H W, ISBELL F I, WILSEY B J. Plant functional traits improve diversity-based predictions of temporal stability of grassland productivity[J]. Oikos, 2013, 122(9): 1275-1282.

[73] MÁJEKOVÁ M, DE BELLO F, DOLEŽAL J, et al. Plant functional traits as determinants of population stability[J]. Ecology, 2014, 95(9): 2369-2374.

[74] CRAINE J M, OCHELTREE T W, NIPPERT J B, et al. Global diversity of drought tolerance and grassland climate-change resilience[J]. Nature Climate Change, 2013, 3: 63-67.

[75] XU Z W, REN H Y, CAI J P, et al. Effects of experimentally-enhanced precipitation and nitrogen on resistance, recovery and resilience of a semi-arid grassland after drought[J]. Oecologia, 2014, 176(4): 1187-1197.

[76] XU Z W, REN H Y, LI M H, et al. Environmental changes drive the temporal stability of semi-arid natural grasslands through altering species asynchrony[J]. Journal of Ecology, 2015, 103(5): 1308-1316.

[77] HUANG W J, WANG W, CAO M, et al. Local climate and biodiversity affect the stability of China's grasslands in response to drought[J]. Science of the Total Environment, 2021, 768: 145482.

[78] 杜忠毓，安慧，文志林，等. 荒漠草原植物群落结构及其稳定性对增水和增氮的响应[J]. 生态学报，2021，41(6)：2359-2371.
DU Z Y, AN H, WEN Z L, et al. Response of plant community structure and its stability to water and nitrogen addition in desert grassland[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(6): 2359-2371.

[79] LIU D J, ZHANG C, OGAYA R, et al. Increasing climatic sensitivity of global grassland vegetation biomass and species diversity correlates with water availability[J]. New Phytologist, 2021, 230(5): 1761-1771.

[80] ZHONG M X, SONG J, ZHOU Z X, et al. Asymmetric responses of plant community structure and composition to precipitation variabilities in a semi-arid steppe[J]. Oecologia, 2019, 191(3): 697-708.

[81] DEMALACH N, ZAADY E, KADMON R. Contrasting effects of water and nutrient additions on grassland communities: a global meta-analysis[J]. Global Ecology and Biogeography, 2017, 26(8): 983-992.

[82] ZHANG K C, QIU Y P, ZHAO Y F, et al. Moderate precipitation reduction enhances nitrogen cycling and soil nitrous oxide emissions in a semi-arid grassland[J]. Global Change Biology, 2023, 29(11): 3114-3129.

[83] KNAPP A K, CIAIS P, SMITH M D. Reconciling inconsistencies in precipitation-productivity relationships: implications for climate change[J]. New Phytologist, 2017, 214(1): 41-47.

[84] ODDERSHEDE A, VIOLLE C, BAATTRUP-PEDERSEN A, et al. Early dynamics in plant community trait responses to a novel, more extreme hydrological gradient[J]. Journal of Plant Ecology, 2019, 12(2): 327-335.

[85] LIU X D, MA Q H, YU H Y, et al. Climate warming-induced drought constrains vegetation productivity by weakening the temporal stability of the plant community in an arid grassland ecosystem[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2021, 307: 108526.

[86] ZSCHEISCHLER J, MAHECHA M D, VON BUTTLAR J, et al. A few extreme events dominate global interannual variability in gross primary production[J]. Environmental Research Letters, 2014, 9(3): 35001.

[87] KRÖEL-DULAY G, MOJZES A, SZITÁR K, et al. Field experiments underestimate aboveground biomass response to drought[J]. Nature Ecology & Evolution, 2022, 6(6): 540-545.

[88] HARRISON S P, GORNISH E S, COPELAND S. Climate-driven diversity loss in a grassland community[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2015, 112(28): 8672-8677.

[89] DORJI T, TOTLAND O, MOE S R, et al. Plant functional traits mediate reproductive phenology and success in response to experimental warming and snow addition in Tibet[J]. Global Change Biology, 2013, 19(2): 459-472.

[90] HOOVER D L, KNAPP A K, SMITH M D. Resistance and resilience of a grassland ecosystem to climate extremes[J]. Ecology, 2014, 95(9): 2646-2656.

[91] LUO W T, MA W, SONG L, et al. Compensatory dynamics drive grassland recovery from drought [J]. Journal of Ecology, 2023, 111(6): 1281-1291.

[92] STAUDE I R, WEIGELT A, WIRTH C. Biodiversity change in light of succession theory [J]. Oikos, 2023, 2023(11): e09883.

[93] OLIVEIRA B F, MOORE F C, DONG X L. Biodiversity mediates ecosystem sensitivity to climate variability [J]. Communications Biology, 2022, 5(1): 628.

[94] HOPPING K A, KNAPP A K, DORJI T, et al. Warming and land use change concurrently erode ecosystem services in Tibet [J]. Global Change Biology, 2018, 24(11): 5534-5548.

[95] LIU P P, LÜ W W, SUN J P, et al. Increased frequency of extreme climatic events weakens the community stability of natural grassland under directional climate changes by reducing resilience [J]. Global Ecology and Biogeography, 2024, 33(6): e13824.

[96] MACKIE K A, ZEITER M, BLOOR J M G, et al. Plant functional groups mediate drought resistance and recovery in a multisite grassland experiment [J]. Journal of Ecology, 2019, 107(2): 937-949.

[97] XU Q N, YANG X, SONG J, et al. Nitrogen enrichment alters multiple dimensions of grassland functional stability via changing compositional stability [J]. Ecology Letters, 2022, 25(12): 2713-2725.

[98] CHEN L T, JIANG L, JING X, et al. Above- and belowground biodiversity jointly drive ecosystem stability in natural alpine grasslands on the Tibetan Plateau [J]. Global Ecology and Biogeography, 2021, 30(7): 1418-1429.

[99] ZHANG C, LEI S L, WU H Y, et al. Simplified microbial network reduced microbial structure stability and soil functionality in alpine grassland along a natural aridity gradient [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2024, 191: 109366.

[100] MA F F, YAN Y J, SVENNING J C, et al. Opposing effects of warming on the stability of above- and belowground productivity in facing an extreme drought event [J]. Ecology, 2024, 105(1): e4193.

[101] DELGADO-BAQUERIZO M, ELDRIDGE D J, OCHOA V, et al. Soil microbial communities drive the resistance of ecosystem multifunctionality to global change in drylands across the globe [J]. Ecology Letters, 2017, 20(10): 1295-1305.

(责任编辑:温晓平 刘茹)

(上接第84页)

[17] 蒋迎晓,焦海宏. 球虫感染后兔圆小囊病理组织学变化[J]. 塔里木大学学报,2011,23(3):19-23.
JIANG Y X, JIAO H H. Histopathology of sacculus rotundus of rabbits infected with coccidiosis [J]. Journal of Tarim University, 2011, 23(3): 19-23.

[18] GANESHAN K, CHAWLA A. Metabolic regulation of immune responses [J]. Annual Review of Immunology, 2014, 32: 609-634.

[19] LIU S Y, DENG Z H, CHEN K, et al. Cartilage tissue engineering: from proinflammatory and anti-inflammatory cytokines to osteoarthritis treatments (review) [J]. Molecular Medicine Reports, 2022, 25(3): 99.

[20] KAKNI P, TRUCKENMÜLLER R, HABIBOVIĆ P, et al. A microwell-based intestinal organoid-macrophage co-culture system to study intestinal inflammation [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2022, 23(23): 15364.

[21] OLINGY C E, DINH H Q, HEDRICK C C. Monocyte heterogeneity and functions in cancer [J]. Journal of Leukocyte Biology, 2019, 106(2): 309-322.

[22] GEISSMANN F, MANZ M G, JUNG S, et al. Development of monocytes, macrophages, and dendritic cells [J]. Science, 2010, 327(5966): 656-661.

[23] 周志彪. 博落回散对鸡柔嫩艾美耳球虫的作用效果研究[D]. 长沙:湖南农业大学 2022.
ZHOU Z B. Study on the effect of *Macleaya cordata* powder on *Eimeria tenella* in chickens [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2022.

[24] ABDEL-HALEEM H M, ABOELHADID S M, SAKRAN T, et al. Gene expression, oxidative stress and apoptotic changes in rabbit ileum experimentally infected with *Eimeria intestinalis* [J/OL]. Folia Parasitologica, 2017, 64: 2017. 012 [2017-04-19]. https://pubmed. ncbi. nlm. nih. gov/28443823/. DOI: 10. 14411/fp. 2017. 012.

[25] 蒲家艳. 大型艾美耳球虫表面抗原 SAG10、SAG11 的原核表达及其对兔的免疫保护效果初步评价[D]. 四川雅安:四川农业大学,2023.
PU J Y. Prokaryotic expression of surface antigens SAG10 and SAG11 of *Eimeria maxima* and preliminary evaluation of their immune protection effect on rabbits [D]. Ya'an, Sichuan: Sichuan Agricultural University, 2023.

[26] 王卉,林青,战美娜,等. 柔嫩艾美耳球虫杨凌株 SO7 基因的克隆表达与保护性试验[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2010,38(8):40-46.
WANG H, LIN Q, ZHAN M N, et al. Cloning, expression and protective test of SO7 gene of *Eimeria tenella* Yangling strain [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2010, 38(8): 40-46.

(责任编辑:马秋明)