

DOI: 10.20103/j.stxb.202401220188

龚金玉, 马致远, 胡琛, 何林轩, 李田, 雷静品. 综合生态系统管理的生态阈值理论研究进展. 生态学报, 2024, 44(22): 10499-10511.

Gong J Y, Ma Z Y, Hu C, He L X, Li T, Lei J P. Research and prospect of ecological threshold theory for integrated ecosystem management. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(22): 10499-10511.

综合生态系统管理的生态阈值理论研究进展

龚金玉¹, 马致远¹, 胡琛¹, 何林轩¹, 李田¹, 雷静品^{1,2,*}

1 中国林业科学研究院林业研究所 国家林业和草原局林木培育重点实验室, 北京 100091

2 南京林业大学 南方现代林业协同创新中心, 南京 210037

摘要:生态阈值是指生态系统结构、属性或功能在一定时间或空间尺度上从一个稳定状态向另一个稳定状态发生转变的突变点, 常作为综合生态系统管理的关键性指标。深入了解其概念原理, 对生态系统综合管理、生态安全预警具有重要作用。系统阐述了生态阈值的概念、生态系统转换的概念模型、生态阈值类型的划分及生态阈值的研究方法, 分析并总结了不同生态阈值研究模型的适宜应用条件和优缺点, 并对未来生态阈值研究提出建议: (1) 加强生态系统阈值定量化评估方法的探索, 旨在减小阈值量化的误差; (2) 探究空间尺度转化、多驱动因素交互作用对生态阈值的影响, 建立不同时空尺度、不同生态系统类型阈值转换数据库; (3) 在未来将生态阈值应用到实际综合生态系统管理中, 并从管理者及科研工作者角度提出相应实施建议。

关键词:生态阈值; 气候变化; 人类活动; 综合生态系统管理; 生态安全预警

Research and prospect of ecological threshold theory for integrated ecosystem management

GONG Jinyu¹, MA Zhiyuan¹, HU Chen¹, HE Linxuan¹, LI Tian¹, LEI Jingpin^{1,2,*}

1 Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Key Laboratory of Forest Silviculture of the State Forestry and Grassland Administration, Beijing 100091, China

2 Co-Innovation Center of Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China

Abstract: Ecological threshold refers to the abrupt point at which the structure, attribute or function of an ecosystem changes from one stable state to another stable state on a certain time or spatial scale. Due to the limitation of climate, geography and other conditions, the environment in our country is fragile. At present, the degradation of ecosystem has become the main problem of sustainable economic and social development in our country. As a key index reflecting the steady-state transformation of ecosystem, ecological threshold can reflect the inflection point of the ecosystem from one stable state to another, and in-depth understanding of its concept and principle is of great importance for ecosystem integrated management and ecological security early warning. This paper elaborated the concept of ecological threshold and the conceptual model of ecosystem transformation, further discussed the classification of ecological threshold types by different scholars, summarized the relevant research methods of ecological threshold and the driving factors of ecological threshold, and also discussed the suitable application conditions, advantages and disadvantages of different ecological threshold research models. Relevant suggestions for future ecological threshold research were put forward: 1) To strengthen the quantitative assessment of ecosystem threshold, mainly exploring quantitative methods, that is, to improve the quantitative assessment model of ecological threshold, narrow the prediction error of the model, and timely warn the steady-state transformation of the ecosystem; 2) Explore the impact of spatial scale transformation on ecological threshold and the response threshold of ecosystem under the interaction of multiple driving factors, and establish the threshold transformation database of different spatial and temporal scales and different ecosystem types; 3) Apply the ecological threshold value to

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFE0112804)

收稿日期: 2024-01-22; 网络出版日期: 2024-08-22

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: leijp@caf.ac.cn

the actual integrated ecosystem management in the future, and put forward corresponding implementation suggestions from the perspective of managers and scientific researchers. At the managerial level, strict laws and policies should be formulated and enforced to ensure the sustainable use of resources and the effective protection of the environment. At the same time, it will play a leading role in establishing a multi-party cooperation platform to promote cooperation and communication among various stakeholders, jointly develop and implement sustainable development plans and projects, and achieve the goal of collaborative optimization and sustainable use of ecosystem services. At the level of scientific researchers, cooperation in interdisciplinary fields should be strengthened on the basis of relevant researches on ecological thresholds, so as to have a deep understanding of the function and stability of the ecosystem, and to develop new quantitative models of threshold values in order to provide scientific theoretical basis and data support for managers' decision-making.

Key Words: ecological threshold; climate change; human activity; integrated ecosystem management; ecological security early warning

生态阈值是指生态系统承载力的极限与临界点,是生态系统从一个稳定状态转换到另一个稳定状态的拐点^[1-3]。生态系统的结构和功能,在驱动因子作用下发生变化,当驱动因子强度处于生态系统能承受的范围以内时,随着驱动力的衰退或消失,生态系统会逐渐恢复到之前的稳定状态^[4]。但是当驱动因子强度超出生态系统能承受的范围后,生态系统会转变为另一个新的稳定状态^[5]。在新稳态下,生态系统的结构组成及功能均不同于以前的稳态,甚至提供生态系统服务的能力大幅度衰退^[6]。生态系统对驱动因素的响应过程是复杂的,因此在实际生态管理实践中必须将干预程度控制在一个合理的范围内进行^[7]。Future Earth initial design^[8]在2013年时基于环境面临的问题提出探究地球生命承载力的极限与临界点,以对全球环境以及人类需求变化进行早期预警,而生态阈值可作为生态预警的关键性因子。目前,全球气候变化及人类活动对生态系统结构、功能产生了巨大影响,同时,人类在开发和利用自然生态系统的过程中,追求的是满足当前的经济利益而忽视了生态系统的可持续发展,致使生态系统提供服务的能力下降^[9-12]。资源过度开发是我国面临的重要生态问题之一,生态系统过度的开发与不当管理可能会引发生态安全问题。例如:在流域尺度上,大面积造林会导致产水量的减少^[13-16]。因此,利用生态阈值来制定合理的综合生态系统管理对策是实现生态系统有效管理的重要前提。

生态阈值相关研究已广泛存在于湿地、森林、草地、海洋等生态系统中,涉及的阈值包括:植被退化阈值、物种多样性保护阈值、水土保持阈值以及土壤安全阈值等,研究发现在不同时空尺度上定量阈值存在差异^[1,17]。在实际研究中首先要确定关键性阈值指标才能进行相对应的生态阈值量化,例如栖息地丧失是能够反映生物灭绝的关键阈值指标(在生境衰退及破碎的情况下,栖息地减少和景观日益孤立的相互作用,难以维持其本土物种的更新)^[18-21]。对生态阈值的定量化研究能反映生态系统对驱动因子在时间或空间上的承载极限值^[22]。因此基于生态阈值理论对生态系统进行管理和资源环境承载力评价,能够科学有效地进行生态系统管理及其安全监测预警,从而及时地在生态系统发生不可逆变化之前对其进行恢复或修复^[23-25]。目前关于生态阈值的研究多集中于探究在单一因素驱动下生态阈值的定量化评估,然而生态系统转换通常是多种因素共同作用的结果。因此,本文系统地阐述了生态阈值的概念、生态系统转变的概念模型、生态阈值的划分及各类驱动因子等,并对未来研究方向进行了展望,以期综合生态系统管理及生态安全预警提供参考。

1 生态阈值的概念及发展趋势

生态阈值是指生态系统承载力的极限与临界点,是生态系统从一个稳定状态转换到另一个稳定状态的拐点,能够反映生态系统的敏感性和恢复力^[1-3]。“阈值”一词首先出现于物理学,指的是两个不同稳定状态之间的交集,以及越过这个界限后,系统将从一个状态到另一个状态的转变^[26]。1962年出版的《Silent Spring》中警示了化学农药过量使用对环境的潜在危害和对生态系统平衡的破坏,强调了生态系统的脆弱性,奠定了生态阈值相关研究的基础。Holling^[27]于1973年在文献中指出生态系统具有抵抗力和稳定性,是生态系统在

遭受外界干扰时具有保持或恢复自身结构的能力。May^[2] 1977 年在论文中提出生态系统存在多个稳态,且在两个相邻稳态间存在“阈值(Thresholds)或断点(Breakpoints)”,由此进入了生态阈值理论研究的萌芽期。在此阶段之前,国内外相关文献数量较少,主要是集中在植物生态学和土壤学方面,目的是探讨植物和土壤特定因子的极限值^[28]。随后,Friedel^[29]指出生态阈值是生态系统不同稳定状态之间的时空边界,强调了在时空尺度上生态系统状态的改变,并首次明确提出生态阈值的概念。自二十一世纪以来,有关生态阈值的英文文章呈指数增加,相关研究方法逐渐增多,生态阈值概念逐渐完善,该研究方向进入飞速发展阶段,但此时国内才开始出现生态阈值相关研究文献(图 1)^[1]。骆有庆等^[30]对杨树天牛生态阈值的相关研究,开启了国内文献对生态阈值的探索,并首次提出了防护林生态阈值的概念。

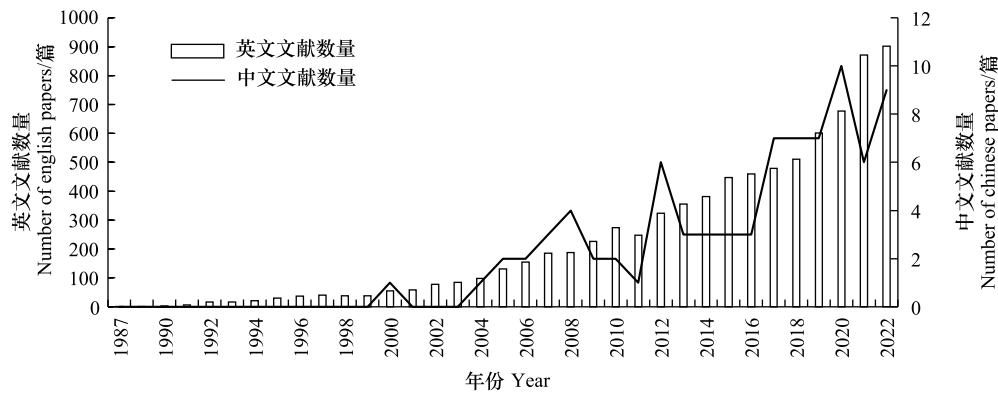


图 1 生态阈值研究发文量的时间分布

Fig.1 The temporal distribution of the published papers in ecological threshold research

赵慧霞等^[31]对生态阈值的相关研究发现,由于驱动因子相互作用的复杂性,导致生态阈值的性质以及在不同空间尺度上的联系仍存在很大的不确定性。随着生态阈值相关研究的不断深入,生态阈值的概念内涵逐渐发生转变(表 1)。早期学者们用生态阈值来描述生态系统稳态发生突变的界限^[25,27,29],但在之后对生态系统变化的研究中发现,生态系统对驱动因子的非线性响应是产生阈值的主要原因。Groffman^[26]指出驱动因子在阈值处的细微变化就会引起生态系统的剧烈转变,因此对生态阈值的研究对于维持生态系统稳定具有重要意义。

表 1 生态阈值相关的概念

Table 1 Concepts related to ecological thresholds

相关概念 Concept	参考文献 Reference
生态阈值为系统中当跨越两个可选状态时,引起系统“快速变化”到另一个不同状态的分歧点 The ecological threshold is the point of divergence in a system that causes a “rapid change” of the system to a different state when crossing two alternative states	[1,3]
两个稳定系统之间的断点代表了生态阈值 The break point between two stable systems represents an ecological threshold	[2]
阈值是环境条件微小变化产生实质性改变的一些区域 Thresholds are areas where small changes in environmental conditions produce substantial changes	[22]
生态阈值是生态的不连续的特性,暗示系统从一个稳定状态向另一个稳定状态转变的关键值 Ecological thresholds are key values of ecological discontinuity that indicate the transition of a system from one stable state to another	[26]
两个不同生态状态之间的时空边界 The space-time boundary between two different ecological states	[29]
生态阈值为生态环境资源存量的最低水平 The ecological threshold is the lowest level of ecological environment resource stock	[32]
生态阈值代表了生态过程或参数发生突变的一个点,此突变点响应于驱动力的相对较小的变化 An ecological threshold represents a point at which an ecological process or parameter is mutated in response to a relatively small change in driving force	[33]

2 生态响应关系中潜在的阈值概念模型

由于生态系统变化的复杂性及多样性,仅用概念来描述生态阈值难以充分反映生态系统对驱动因子响应的多样性。因此,生态学者们总结了多种生态响应关系模型以呈现生态阈值的变化特征。生态响应模型的提出,有助于人们对生态阈值的理解,促进后期生态阈值的定量化评估。在早期的研究中,May^[2]首先绘制出生态阈值轨迹,即生态系统在驱动因子干扰下的响应模型。Francesco Ficetola 等^[28]在研究物种数量和生境质量之间的关系时将生态阈值类型总结为突变阈值与平滑阈值。Hilderbrand 等^[24]研究发现并非所有的系统都表现出突然的非线性响应。在此基础上,Foley 等^[34]将生态系统对驱动因子的响应总结为线性阈值(平滑)、连续阈值(突然)或不连续阈值(滞后)三种响应类型。唐海萍等^[1]指出主要是由于生态系统结构和功能的复杂性,以及结构和功能特性在不同的研究尺度上存在差异,所以稳态的转换存在突变性或滞后性。王世金等^[35]在前人的研究基础上总结了生态系统与环境压力的三种概念模型,第一种是线性关系,即生态系统在环境压力下呈线性状态变化(图 2);后两种则呈现出非线性变化,一种是环境压力消失后,生态系统按照退化过程(时间)逐渐恢复到初始状态,另一种是当环境压力消失后,生态系统需要漫长的时间才能恢复到初始状态,即具有滞后效应(图 2)。现有研究表明,人类干扰是影响生态系统状态转变最直接的因素^[36]。侯利萍等^[37]在对国内外生态阈值相关案例的研究中,将生态系统响应模型总结为 S 型曲线、补给压力式和跃迁式三种概念模型(图 2),模型特征描述见表 2。

表 2 生态响应模型分类总结
Table 2 Classification summary of ecological response models

生态响应模型 Ecological response model	特征描述 Description	应用场景 Application scenarios	参考文献 References
S 型曲线阈值 S-curve threshold	驱动因子对生态系统的影响由慢到快再到慢的过程	主要应用于多种外界干扰复合作用下引起的生态系统稳态转变类型,例如:栖息地面积越大,生物多样性越高,但种群之间的竞争,导致种群密度稳定	[38]
补给压力式阈值 Recharge pressure type threshold	驱动因子对生态系统的影响存在最适值。在到达最适值之前,驱动因子与相应的生态变化之间呈现正相关关系,当驱动因子超过最适值后,驱动因子与对应生态变化之间呈现负相关关系	主要适用于生态因子对生态系统的影响存在正反两方面场景,例如:土壤含水量较低时,植物出现干旱胁迫,生长受抑制,随着土壤含水量的增加,植物光合作用增加,生长适宜,但当土壤含水量超出一定的范围是,植物根系的呼吸作用受限,生长受阻	[39]
跃迁式阈值 Threshold of transition type	驱动因子引起生态系统在某个点或区间突然从一种状态跃迁至另一种状态	大强度的外力干扰导致生态系统骤变,例如:大型水库的修建,导致下游河流量骤降,生态系统状态剧烈改变	[40]

生态系统在稳态间的转换是生物、非生物或多种干扰事件之间相互作用的结果,因此生态系统中存在多种阈值类型,在实际研究中不同生态系统中具有不同的阈值类型。如:过度放牧引起草原生态系统的退化,显著降低草原植被的地上生物量和地下生物量^[41]、人类过度干扰引起水体富营养化导致湖泊生态系统的崩溃^[42—43]。21 世纪以来,确定生态阈值是否存在以及对其进行定量化评估,一直是生态学研究的重点和难点^[26,44—45]。

3 生态阈值的类型

总结以往关于生态阈值的研究,可以按照生态系统状态改变的速率分为生态阈值点和生态阈值带^[27,31]。也可以按照生态系统状态改变的过程将生态阈值划分为结构阈值(Structural Threshold)、物种丧失阈值(Species Threshold)、功能阈值(Functional Threshold)和生态性能消失阈值(Properly Extinction Threshold)^[46]。或者从生态阈值的胁迫对象分析,分为自身要素胁迫阈值、气候变化胁迫阈值、生源要素胁迫阈值、人类活动胁迫阈值以及多源要素胁迫阈值^[35]。阈值分类的意义在于能够帮助科学家和决策者更好地理解生态系统的响应机制,有针对性地采取保护和管理措施,以维持生态系统的稳定性和健康性。通过划分并识别不同类型

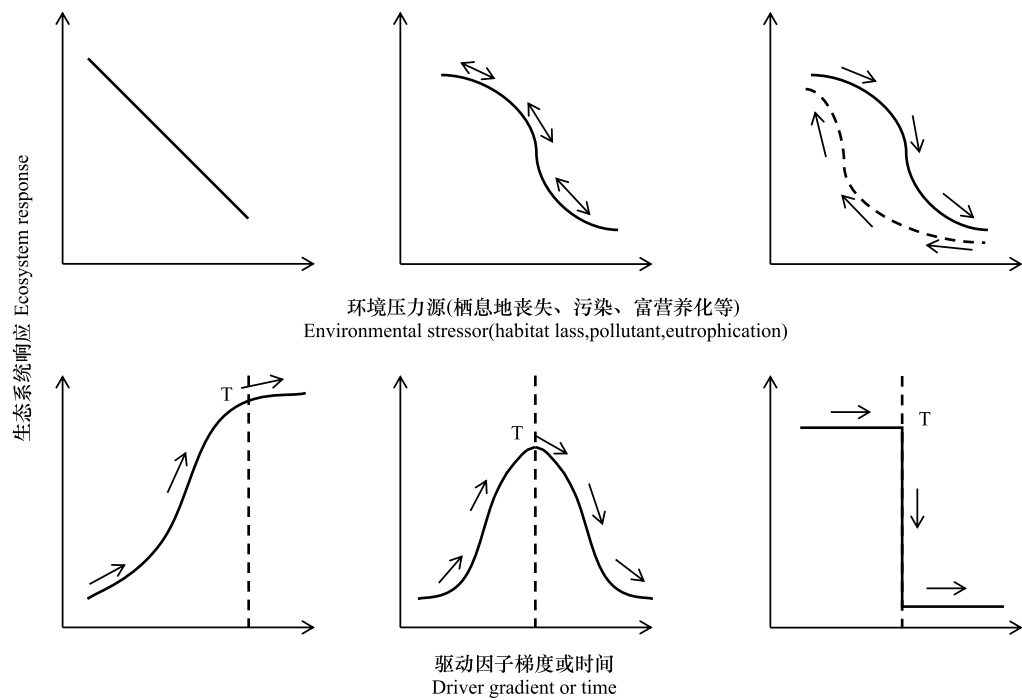


图 2 生态系统在驱动力影响下的变化轨迹^[35,37]
Fig.2 The trajectory of ecosystem changes under the influence of driving forces
T: 生态阈值

的阈值,可以提前预警生态系统可能面临的危机,采取相应的措施来减轻或避免生态环境的恶化,促进人类与自然的和谐共生(表 3)。

表 3 生态阈值的划分标准及相关特征

划分标准 Classification standard	评价 Evaluate	阈值类型 Threshold Types	特征 Feature	参考文献 References
生态系统状态改变的快慢 How quickly the state of the ecosystem changes	按照生态系统转变速率来划分阈值类型,可以更精细的识别生态系统的脆弱性	生态阈值点	生态系统状态在某个时间点发生剧烈改变,导致阈值存在于某个关键转折点	[27,31]
根据阈值发生时生态系统状态改变的过程 According to the process of changing the state of the ecosystem when the threshold occurs	该标准依靠生态系统结构或功能等属性的转变,来划分阈值类型,该划分标准考虑了生态系统的结构、功能以及生物多样性等属性,这种综合性的划分标准有助于全面理解生态系统的稳定性及复杂性	生态阈值带	生态系统状态在某个时间段发生转变,能反映阈值变化的潜在范围	[46—49]
		结构阈值	生态系统结构的改变达到的阈值,例如栖息地的物理结构或者生态系统中物种的数量和分布。一旦生态结构发生显著改变,可能会导致生态系统功能的丧失或者物种多样性的减少	
		物种丧失阈值	当生态系统内的物种多样性下降到一定程度时,会触发这个阈值。物种多样性对于生态系统的稳定性和功能有着重要的影响,因此,当物种丧失超过某个临界点时,生态系统可能会失去重要的生态服务功能	
		功能阈值	生态功能是指生态系统执行的各种生态服务和过程,如水循环、土壤形成、气候调节等。当生态系统的功能发生变化,超过了一定的阈值时,就会影响到生态系统的稳定性和可持续性,此时若想恢复生态系统的功能,则需要投入巨大的成本	

续表

划分标准 Classification standard	评价 Evaluate	阈值类型 Threshold Types	特征 Feature	参考文献 References
从生态阈值的胁迫对象分析 Analysis of stress objects from ecological threshold value	从胁迫对象的不同来源划分生态阈值,有助于更好地理解生态系统面临的各 种压力和挑战,但在实际的应用中要注意不同胁迫对象之间的相互作用	生态性能丧失阈值	是指生态系统中某些关键属性或生态服务丧失的阈值。当生态系统中的某些重要性能或属性消失时,可能会引发生态系统的崩溃或者转变为另一种稳态	[21,35,50—51]
		自身要素胁迫阈值	由生态系统自身群落结构、物种丰富度、生物多样性等结构改变而引起生态系统稳态转换的阈值	
		气候变化胁迫阈值	由气候变化引起生态系统稳态发生转变的阈值	
		生源要素胁迫阈值	生态系统的生源要素包括水、光、风以及各种微量元素等资源,由此类要素引起的生态系统稳态转变	
		人类活动胁迫阈值	人类活动能够对生态系统功能和结构进行调整,人类活动强度较大时能够引起生态系统稳态的改变	
		多源要素胁迫阈值	由多种因素综合作用引起的生态系统稳态转换,是现实生态系统转换的主要类型	

3.1 按照生态系统状态改变的速率分类

按照生态系统状态改变的快慢,生态阈值可以划分为两种类型:生态阈值点(Ecological Threshold Point)和生态阈值带(Ecological Threshold Zone)(图3)^[27,31]。其中生态阈值点是一个临界值,代表了生态系统两种稳态的剧烈转变,在这个临界点的前后呈现的是两种不同的系统状态,而且这种改变即使在外界干扰停止后也很难再恢复到原始状态^[31]。唐海萍等^[1]利用哲学上的量变与质变来类比生态阈值点和生态阈值带的关系,其中生态阈值点即为状态发生质变的点。典型的例子如:栖息地丧失是指自然栖息地丧失、衰退或破碎难以维持本土物种的过程。在栖息地完全丧失后导致物种灭绝,之后即使人为增加栖息地面积或改善栖息地质量,物种多样性也很难恢复到初始水平^[52—54]。

生态阈值带是生态系统在两种稳态间转换的过程,不同于生态阈值点的剧烈改变,而是一种逐渐转换的过程^[55]。生态阈值带现象主要依赖于生态系统的抵抗力稳定性,当生态系统的抵抗力越强,其生态阈值带幅度越大,恢复到原始状态的可能性越高。例如干旱的发生使得植物生长受限,植物群落结构或物种组成有可能转变为过度类型,在干旱停止后重新形成新的植被群落^[56]。

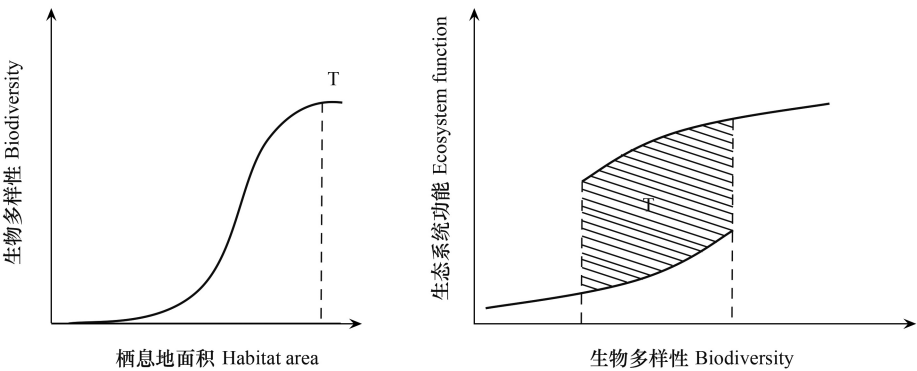


图3 生态阈值点与生态阈值带(以生物多样性为例)^[31]

Fig.3 Ecological threshold point and ecological threshold zone (Take biodiversity as an example)

生态系统变化过程中普遍存在的是生态阈值带,主要是因为生态系统对环境胁迫因子复杂的响应机制。生态阈值点与生态阈值带的最大区别是所描述的生态系统状态变化的特征和范围,前者强调临界点的突变性质,后者强调过渡区域的渐变性质。当环境胁迫因子处于生态阈值带区间时,生态系统状态还有恢复的潜力,当胁迫因子完全超出生态阈值带的区间后,生态系统状态将发生不可逆变化。

3.2 按照阈值发生的生态过程分类

Briske 等^[46]根据阈值发生的生态过程将生态阈值划分为结构阈值、物种丧失阈值、功能阈值和生态性能消失阈值。其中结构阈值是指胁迫因子的强度到达一定的限度时,引起生态系统结构的变化,主要是物种组成和物种分布格局的改变。(例如:过度放牧导致草原生态系统退化为灌丛,植被群落结构变化)^[47—49]。物种丧失阈值与生态系统的结构阈值相关,是指生态系统中物种丰富度和遗传多样性不足以维持生物种群的更新及延续。功能阈值主要针对的是生态系统恢复功能的各种生态过程(如:生产力、养分循环等)的变化,当胁迫因子的强度达到功能阈值后,整个生态系统功能会出现明显的变化^[46,47]。例如当放牧强度过大超出草原生态系统的结构时,首先引起植被群落开始逐渐退化,若放牧强度仍进一步增加,原生植物群落的结构将逐渐改变甚至形成新的植物群落,但若放牧强度仍进一步增加超过了生态性能阈值后,草原生态系统类型彻底转变为其他类型生态系统^[57—59]。由此可见,当生态系统受到剧烈的胁迫后首先达到结构阈值、物种丧失阈值、功能阈值最终生态系统生态性能丧失,生态系统彻底转变为另一种状态^[36,60]。

3.3 按照生态阈值的胁迫对象分类

王世金等^[35]从生态阈值的胁迫对象分析,将生态阈值分为自身要素胁迫阈值、气候变化胁迫阈值、生源要素胁迫阈值、人类活动胁迫阈值和多源要素胁迫阈值(表4)。其中气候变化是影响生态系统改变的直接胁迫因子,而人类活动主要是通过改变土地利用结构等方式间接影响生态系统,实际上生态系统稳态转换是多因素胁迫的结果。

表 4 生态阈值的相关分类
Table 4 Related categories of ecological thresholds

胁迫对象 Object of stress	描述 Description	相关案例 Relevant case	参考文献 References
自身要素胁迫阈值 Self factor stress threshold	生态系统的群落特征、物种丰富度、生物多样性等结构与生态系统服务功能之间具有不可分割的关系,生态系统自身结构越完整,其受外界胁迫影响越小	栖息地的面积、斑块的连通性以及生态系统的食物链关系等都是支持生物多样性的主要原因	[54,61—62]
气候变化胁迫阈值 Climate change stress threshold	气候变化对生态系统的影响早已被相关研究进行论证。其中气温、降水和干旱是影响生态系统阈值的主要胁迫因子	降水、温度等胁迫因子限制着植被的空间分布及海拔高度	[63—65]
生源要素胁迫阈值 Stress threshold of biogenic elements	生态系统的生源要素主要包括水、光、风、氮、磷、钾营养元素及其他资源等	土壤含水量与草原生态系统生产力之间存在着非线性关系;过量的氮磷等营养元素进入水体,导致藻类过量繁殖,引起水华现象	[43,66]
人类活动胁迫阈值 Human activity stress threshold	人类活动能够适当的调整生态系统的结构,但是当人类活动的强度过大时,同样会引起生态系统结构和功能的不可逆转的改变	旱地自然生境脆弱,易受城市扩张等人类因素的影响,威胁生态系统的完整性	[41,67—68]
多源要素胁迫阈值 Multi-source factor stress threshold	由于生态系统结构和功能的复杂性,生态系统的稳态转换有可能是多个因素综合作用的结果	放牧强度的增加降低了大多数生态系统的干旱阈值,且放牧和干旱的共同作用会导致生态系统生产力、土壤肥力和植物多样性降低	[64]

由于生态系统结构和功能的复杂性,生态系统发生剧烈转变通常是多个因子共同驱动的结果,但某些系统的转变可能某一种或某一类因子起主导作用。如气候变化被认为是影响生态系统转变的直接因素,极端干

旱、极端降雨、地震或火山爆发等的发生可以迅速的影响植物群落的结构,进而影响生态系统结构和功能^[50]。在旱地生态系统中植被覆盖丧失是影响生态系统发生突变的重要因素^[69],全球干旱化会驱动植物生产力、植被盖度以及土壤肥力的阈值变化,研究表明当干旱值达到 0.54、0.7 和 0.8 时,生态系统要经历植被衰退、土壤退化和整个系统的衰退^[63]。极端降雨事件通常会引发洪灾、泥石流等与水有关的自然灾害,对生态系统及城市安全等带来严重危害^[51]。Srivastava 等^[70]研究发现,热带地区的极端降水能改变当地无脊椎动物功能群的组成和生物量,其中无脊椎动物的物种组成对降水极其敏感。全球升温是气候变化的主要趋势,温度的升高对植物的物候期^[71]、土壤微生物结构^[72]及土壤呼吸^[73]等生理生态过程均有明显的影响。

人为因素驱动是指由人类活动引起的外部因素(如:毁林、农业化种植等)的变化而最终引起生态阈值的变化,被认为是影响生态系统变化的间接驱动因素^[21]。受人为因素影响的阈值主要包括:收获、土地/海洋利用变化、物种入侵、污染和气候变化^[74]。当种群的收获速度大于其自然恢复速度时,就会出现过度开发,当种群规模降到临界阈值以下时,种群将面临在当地灭绝的风险^[75]。驱动土地/海洋利用变化最主要的因素就是农业发展及城市化扩张,导致大量的栖息地破碎及丧失,当栖息地丧失达到生态系统阈值时,由于生存资源的减少或原始栖息地板块间连通性的降低,导致种群无法正常繁殖生存^[76]。其次是河岸植被的丧失会影响淡水资源的质量,进而影响淡水景观中的生物多样性^[77]。人类生产生活排放的各类污染物包括工业排放的各种有毒有害物质,以及人类生产生活中过量排放的氮(N)和磷(P)等营养元素,破坏了湖泊生态系统营养元素平衡导致蓝藻等有害藻类的过度增殖,对饮用水的供应、淡水生态系统的可持续利用造成严重危害^[78-79]。人为引起的生物入侵也是生态系统状态改变的主要因素之一,外来生物入侵会影响当地生态系统的生物多样性和生态系统功能^[80]。

4 生态阈值的评估方法

生态阈值量化评估是生态阈值从理论范式到案例实证的重要桥梁,同时也是生态阈值研究中的重难点^[44],而阈值量化分析实际上是通过寻找驱动因素对胁迫因子非线性响应关系的拐点^[81]。现有文章对生态系统结构、功能等生态指标的探究,均要基于一定的时间或空间尺度才有意义,对于生态阈值的评估亦是如此^[82-83]。早期生态阈值的相关研究方法主要是通过野外实验、野外长期观测调查以及空间沉积梯度实验等获取生态系统对环境变量响应的数据,但这些方法需要大量的人力、物力和时间^[29]。但随着研究尺度的增大,近年来学者们开发了一系列模型或者专门的阈值评估软件,探究生态系统驱动力梯度渐变过程中结构、性质和功能等生态系统变量的变化特征,更方便地探究生态系统的阈值,但在实际的应用中也存在一定的问题^[84]。目前存在一些统计学模型能够基于概率对生态阈值进行预测,包括广义加性混合模型(Generalized additive mixed model)和物种敏感性分布模型(Species sensitivity distributions model)等,这些模型是估算生态阈值较为有效的研究工具^[85-86],但不同方法也存在优缺点(表 5)。在实际研究过程中需结合研究区域的实际气候条件、地理因素或参数的可获得性等,选择合适的方法或者将多个方法结合使用。

5 生态阈值研究展望

5.1 加强生态阈值定量研究

鉴于生态阈值对生态系统状态具有重要的指示作用,在实际生态管理过程中将驱动因子的强度限制在安全阈值之内,能避免生态系统的突变和崩溃。但随着气候变化及人为干扰的加剧,使得生态系统承载力降低,较小的驱动力就能轻易触发阈值。对于生态阈值的探究存在极大的不确定性,模型预测通常会和实际存在较大的偏差,而且空间尺度越大,模型预测带来的误差越大^[40]。例如 Arroyo-Rodríguez 等^[97]的研究表明,为了在景观尺度上维持生态系统服务及生物多样性,至少需要保持 40% 的森林覆盖率,但在更小尺度上森林覆盖率则小于该值。因此在未来的研究中必须要加强生态阈值量化方法学的研究,完善生态系统阈值估算的模型,即考虑如何缩小模型预测的偏差,使预测结果更接近实际。同时还要强化在不同时空尺度下、不同生态系

统类型下的生态阈值监测体系,建立充分的数据库来支撑生态阈值理论体系,以更加合理、可持续的方式对生态系统进行人工管理。

表 5 生态阈值主要研究方法
Table 5 The main research methods of ecological threshold value

方法 Method	方法简介 Method introduction	优缺点 Advantages and disadvantages	参考文献 References
局部加权回归散点平滑法 Local weighted regression scatter smoothing method	通过数据拟合绘制平滑曲线图直观估测 阈值	优点:需要的数据量较少($n>13$ 即可) 缺点:适用于数据集的初步估计,对于阈值 带的范围估测有较大的误差	[37]
系统动力学方法 system dynamics method	能在以确定的系统边界内,利用计算机程序 建立真实系统模型,并通过模拟能反映出系 统随时间的变化规律或系统的特性	优点:利用系统动力学模型能计算生态系统 内的多个阈值 缺点:模型模拟值与实际误差较大	[32,87—88]
Logistic 函数模型 Logistic functional model	运用对数运算将时间发生概率与影响因子 间的非线性关系转变为线性关系	优点:对变量要求低,可以接受非正态分布 的数据,总体预测准确率较高 缺点:临界点值的选择将影响模型的预测 结果	[89]
梯度森林 Gradient forest	该方法能分析量化每种环境或驱动因子对 多个生态系统状态时间序列变化的预测 能力	缺点:方法的使用受指标数据完整性的影响	[90]
广义加性混合模型 Generalized additive mixed model	是混合效应和相加模型的结合,能引进随机 效应,对重复测量的自变量及其他因变量进 行曲线拟合	优点:与梯度森林相比可以合理的处理指标 数据的缺失值	[66]
最优分割法 Optimal segmentation method	将实验数据按顺序排序,并进行分割,使得 各段内样品之间的差异最小,而各段之间的 差异最大	缺点:只考虑了数据的离差平方和,忽略了 曲线在形态两端可能存在的显著差异	[91]
高斯模型 Gaussian model	通过一元二次拟合曲线与高斯模型之间的 转换关系求解高斯回归方程参数	优点:能根据生物指标与环境因子之间的拟 合程度求解,当生物指标最大的环境因子 值,可以求得生态阈值区间和最适生态阈值 区间 缺点:仅适用于补给压力式阈值,在阈值测 定前首要进行阈值的判断	[92]
分段回归模型分析 Piecewise regression model analysis	由两条连接阈值点的回归线组成,能直接评 估回归线的断点	优点:能表明自变量和因变量之间的显著关 系,也能反映多个自变量对一个因变量的影 响强度	[93]
非参数异常反证法 Bayesian point of change method	通过检测系统响应变量的突变位置,从而反 溯引起生态系统突变的环境因子	优点:适用于监测数据有限时的阈值检测 缺点:常用于检测造成物种结构发生变化的 环境阈值	[94]
物种敏感性分布模型 Species sensitivity distributions model	基于不同物种对于污染物的敏感性差异 提出	优点:能充分考虑生物多样性和生态系统的 完整性,结果更为科学合理	[95—96]

5.2 探究尺度转换对生态阈值的影响

众所周知生态系统是一个复杂的综合系统,生态系统结构与功能是多种复杂因素共同作用的结果,在不同的空间尺度下影响生态系统结构与功能的主导因子不同,因此导致生态系统呈现出不同的阈值。现有关于生态阈值的研究大多数是基于单一或双因子胁迫变化下,生态系统的响应变化^[98]。但在较大的空间尺度上,生态系统的功能受多种驱动因子的影响,而且多因子交互作用使得生态系统的变化更加复杂、难以预料,且在气候变化和人类活动的影响下,生态系统抵御风险的能力降低,未来的变化也更加不确定^[36]。因此在未来应加强关于在不同空间尺度多种胁迫因子的复合作用下,生态系统对相关胁迫因子响应阈值的研究。

5.3 提升生态阈值在生态系统综合管理中的应用

对于生态系统阈值的研究有利于确定生态系统管理的安全界限。人类有目的的对生态系统进行管理,追求的是利益最大化,但这种方式不利于生态系统的可持续发展^[99]。同时,生态系统服务间存在着协同与权衡关系,而人类对生态系统服务间的权衡管理会导致生态系统的不均衡发展,最终将导致生态系统提供服务的能力下降。因此在未来管理中应将生态系统服务间的权衡关系限制在一定的阈值内,在此安全阈值范围内进行生态系统服务管理,限制人类开发、管理生态系统的强度。对于管理者来说,应制定并执行严格的法律和政策,以确保资源的可持续利用和环境的有效保护。同时发挥牵头作用,建立多方合作平台,促进各利益攸关方之间的合作与沟通,共同制定和实施可持续发展的计划和项目^[99],达到生态系统服务间的协同优化和可持续利用的目标。对科研工作者来说,主要是在开展生态阈值相关研究的基础上同时加强跨学科领域的合作研究,深入了解生态系统的功能和稳定性,开发新的阈值定量模型,从而为管理者决策提供科学的数据支持。

参考文献 (References):

- [1] 唐海萍, 陈姣, 薛海丽. 生态阈值: 概念、方法与研究展望. 植物生态学报, 2015, 39(9): 932-940.
- [2] May R M. Thresholds and breakpoints in ecosystems with a multiplicity of stable states. *Nature*, 1977, 269(5628): 471-477.
- [3] 柳新伟, 周厚诚, 李萍, 彭少麟. 生态系统稳定性定义剖析. 生态学报, 2004, 24(11): 2635-2640.
- [4] 白晓航, 赵文武, 尹彩春. 稳态转换视角下生态系统服务变化过程与作用机制. 生态学报, 2022, 42(15): 6054-6065.
- [5] Scheffer M, Jeppesen E. Regime shifts in shallow lakes. *Ecosystems*, 2007, 10(1): 1-3.
- [6] Hobbs R J, Higgs E, Harris J A. Novel ecosystems: implications for conservation and restoration. *Trends in Ecology & Evolution*, 2009, 24(11): 599-605.
- [7] Folke C, Carpenter S, Walker B, Scheffer M, Elmqvist T, Gunderson L, Holling C S. Regime shifts, resilience, and biodiversity in ecosystem management. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2004, 35(1): 557-581.
- [8] Future Earth. Future Earth initial design: Report of the transition team. FRA: International Council for Science (ICSU), 2013.
- [9] 杨玉盛. 全球环境变化对典型生态系统的影响研究: 现状、挑战与发展趋势. 生态学报, 2017, 37(1): 1-11.
- [10] 尹彩春, 赵文武. 应对气候和生态环境危机 促进全球可持续发展——UNEP 与自然和谐共处报告简述. 生态学报, 2021, 41(23): 9536-9542.
- [11] 田慧颖, 陈利顶, 吕一河, 傅伯杰. 生态系统管理的多目标体系和方法. 生态学杂志, 2006, 25(9): 1147-1152.
- [12] 彭建, 胡晓旭, 赵明月, 刘焱序, 田璐. 生态系统服务权衡研究进展: 从认知到决策. 地理学报, 2017, 72(6): 960-973.
- [13] Feng X M, Fu B J, Piao S L, Wang S, Ciais P, Zeng Z Z, Lü Y H, Zeng Y, Li Y, Jiang X H, Wu B F. Revegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits. *Nature Climate Change*, 2016, 6(11): 1019-1022.
- [14] Schwärzel K, Zhang L L, Montanarella L, Wang Y H, Sun G. How afforestation affects the water cycle in drylands: a process-based comparative analysis. *Global Change Biology*, 2020, 26(2): 944-959.
- [15] Li R N, Zheng H, O'Connor P, Xu H S, Li Y K, Lu F, Robinson B E, Ouyang Z Y, Hai Y, Daily G C. Time and space catch up with restoration programs that ignore ecosystem service trade-offs. *Science Advances*, 2021, 7(14): eabf8650.
- [16] 苏伯儒, 刘某承. 基于生态系统服务权衡的生态系统管理策略研究进展. 自然资源学报, 2023, 38(7): 1848-1862.
- [17] 李代魁, 何萍, 徐杰, 侯利萍. 我国生态系统生态阈值研究基础. 应用生态学报, 2020, 31(6): 2015-2028.
- [18] Fahrig L. Rethinking patch size and isolation effects: the habitat amount hypothesis. *Journal of Biogeography*, 2013, 40(9): 1649-1663.
- [19] Estavillo C, Pardini R, da Rocha P L B. Forest loss and the biodiversity threshold: an evaluation considering species habitat requirements and the use of matrix habitats. *PLoS One*, 2013, 8(12): e82369.
- [20] Pinto Leite C M, Mariano-Neto E, Rocha P L B D. Biodiversity thresholds in invertebrate communities: the responses of dung beetle subgroups to forest loss. *PLoS One*, 2018, 13(8): e0201368.
- [21] Spake R, Barajas-Barbosa M P, Blowes S A, Bowler D E, Callaghan C T, Garbowski M, Jurburg S D, van Klink R, Korell L, Ladouceur E, Rozzi R, Viana D S, Xu W B, Chase J M. Detecting thresholds of ecological change in the anthropocene. *Annual Review of Environment and Resources*, 2022, 47(1): 797-821.
- [22] Bestelmeyer B T. Threshold concepts and their use in rangeland management and restoration: the good, the bad, and the insidious. *Restoration Ecology*, 2006, 14(3): 325-329.
- [23] 杨荣金, 傅伯杰, 刘国华, 马克明. 生态系统可持续管理的原理和方法. 生态学杂志, 2004, 23(3): 103-108.
- [24] Hilderbrand R H, Utz R M, Stranko S A, Raesly R L. Applying thresholds to forecast potential biodiversity loss from human development. *Journal*

- of the North American Benthological Society, 2010, 29(3): 1009-1016.
- [25] de Oliveira Roque F, Menezes J F S, Northfield T, Ochoa-Quintero J M, Campbell M J, Laurance W F. Warning signals of biodiversity collapse across gradients of tropical forest loss. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 1622.
- [26] Groffman P M, Baron J S, Blett T, Gold A J, Goodman I, Gunderson L H, Levinson B M, Palmer M A, Paerl H W, Peterson G D, Poff N L, Rejeski D W, Reynolds J F, Turner M G, Weathers K C, Wiens J. Ecological thresholds: the key to successful environmental management or an important concept with no practical application? *Ecosystems*, 2006, 9(1): 1-13.
- [27] Holling C S. Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1973, 4: 1-23.
- [28] Francesco Ficetola G, Denoël M. Ecological thresholds: an assessment of methods to identify abrupt changes in species-habitat relationships. *Ecography*, 2009, 32(6): 1075-1084.
- [29] Friedel M H. Range condition assessment and the concept of thresholds: a viewpoint. *Journal of Range Management*, 1991, 44(5): 422.
- [30] 骆有庆, 宋广巍, 刘荣光, 李建光. 杨树天牛生态阈值的初步研究. *北京林业大学学报*, 1999, 21(6): 49-55.
- [31] 赵慧霞, 吴绍洪, 姜鲁光. 生态阈值研究进展. *生态学报*, 2007, 27(1): 338-345.
- [32] Uehara T. Ecological threshold and ecological economic threshold: implications from an ecological economic model with adaptation. *Ecological Economics*, 2013, 93: 374-384.
- [33] Larsen S, Alp M. Ecological thresholds and riparian wetlands: an overview for environmental managers. *Limnology*, 2015, 16(1): 1-9.
- [34] Foley M M, Martone R G, Fox M D, Kappel C V, Mease L A, Erickson A L, Halpern B S, Selkoe K A, Taylor P, Scarborough C. Using ecological thresholds to inform resource management: current options and future possibilities. *Frontiers in Marine Science*, 2015, 2: 95.
- [35] 王世金, 魏彦强. 生态安全阈值研究述评与展望. *草业学报*, 2017, 26(1): 195-205.
- [36] Sasaki T, Furukawa T, Iwasaki Y, Seto M, Mori A S. Perspectives for ecosystem management based on ecosystem resilience and ecological thresholds against multiple and stochastic disturbances. *Ecological Indicators*, 2015, 57: 395-408.
- [37] 侯利萍, 何萍, 范小杉, 徐杰, 任颖, 李代魁. 生态阈值确定方法综述. *应用生态学报*, 2021, 32(2): 711-718.
- [38] 田新民, 陈红, 钟林强, 黄海娇, 刘小慧, 张子栋, 杨孟平, 周绍春. 黑龙江省老爷岭南部穆棱林区马鹿种群分布数量及生境适宜性评价. *生态学报*, 2022, 42(14): 5980-5989.
- [39] 李新荣, 张志山, 黄磊, 王新平. 我国沙区人工植被系统生态-水文过程和互馈机理研究评述. *科学通报*, 2013, 58(Z1): 397-410.
- [40] Fahrig L. How much habitat is enough? *Biological Conservation*, 2001, 100(1): 65-74.
- [41] 吕广一, 徐学宝, 高翠萍, 于志慧, 王新雅, 王成杰. 放牧对内蒙古不同类型草原植物和土壤总氮与稳定氮同位素的影响. *草业学报*, 2021, 30(3): 208-214.
- [42] Scheffer M, Carpenter S R. Catastrophic regime shifts in ecosystems: linking theory to observation. *Trends in Ecology & Evolution*, 2003, 18(12): 648-656.
- [43] 秦伯强, 杨桂军, 马健荣, 邓建明, 李未, 吴挺峰, 刘丽贞, 高光, 朱广伟, 张运林. 太湖蓝藻水华“暴发”的动态特征及其机制. *科学通报*, 2016, 61(7): 759-770.
- [44] Zhang J Z, Luo M T, Yue H, Chen X Y, Feng C. Critical thresholds in ecological restoration to achieve optimal ecosystem services: an analysis based on forest ecosystem restoration projects in China. *Land Use Policy*, 2018, 76: 675-678.
- [45] Hillebrand H, Donohue I, Harpole W S, Hodapp D, Kucera M, Lewandowska A M, Merder J, Montoya J M, Freund J A. Thresholds for ecological responses to global change do not emerge from empirical data. *Nature Ecology & Evolution*, 2020, 4(11): 1502-1509.
- [46] Briske D D, Fuhlendorf S D, Smeins F E. A unified framework for assessment and application of ecological thresholds. *Rangeland Ecology & Management*, 2006, 59(3): 225-236.
- [47] Briske D D, Fuhlendorf S D, Smeins F E, Management S F R. State-and-transition models, thresholds, and rangeland health: a synthesis of ecological concepts and perspectives. *Rangeland Ecology & Management*, 2005, 58(1): 1-10.
- [48] Beisner B E, Haydon D T, Cuddington K. Alternative stable states in ecology. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2003, 1(7): 376-382.
- [49] 吴精华. 中国草原退化的分析及防治对策. *生态经济*, 1995, 11(5): 1-6.
- [50] Walther G R, Post E, Convey P, Menzel A, Parmesan C, Beebee T J C, Fromentin J M, Hoegh-Guldberg O, Bairlein F. Ecological responses to recent climate change. *Nature*, 2002, 416(6879): 389-395.
- [51] Shook K R. Floods in a changing climate: extreme precipitation. *Revue Canadienne Des Ressources Hydriques*, 2014, 39(3): 372.
- [52] 武晶, 刘志民. 生境破碎化对生物多样性的影响研究综述. *生态学杂志*, 2014, 33(7): 1946-1952.
- [53] 魏辅文, 聂永刚, 苗海霞, 路浩, 胡义波. 生物多样性丧失机制研究进展. *科学通报*, 2014, 59(6): 430-437.
- [54] Boesing A L, Nichols E, Metzger J P. Biodiversity extinction thresholds are modulated by matrix type. *Ecography*, 2018, 41(9): 1520-1533.
- [55] 谢永, 张仁陟. 基于生态阈值带理论的废渣地稳态转换研究. *环境与可持续发展*, 2008, 33(2): 30-32.
- [56] Berdugo M, Vidiella B, Solé R V, Maestre F T. Ecological mechanisms underlying aridity thresholds in global drylands. *Functional Ecology*, 2022,

- 36(1): 4-23.
- [57] Munson S M, Belnap J, Okin G S. Responses of wind erosion to climate-induced vegetation changes on the Colorado Plateau. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, 108(10): 3854-3859.
- [58] 王鑫厅, 柴静, 姜超, 邵阳, 迟延艳, 张维华, 刘芳, 李素英. 典型草原大针茅种群空间格局及对长期过度放牧的响应. *生物多样性*, 2020, 28(2): 128-134.
- [59] 张扬建, 朱军涛, 沈若楠, 王荔. 放牧对草地生态系统影响的研究进展. *植物生态学报*, 2020, 44(5): 553-564.
- [60] Suding K N, Hobbs R J. Threshold models in restoration and conservation: a developing framework. *Trends in Ecology & Evolution*, 2009, 24(5): 271-279.
- [61] Asaad I, Lundquist C J, Erdmann M V, Costello M J. Ecological criteria to identify areas for biodiversity conservation. *Biological Conservation*, 2017, 213: 309-316.
- [62] Shennan-Farpon Y, Visconti P, Norris K. Detecting ecological thresholds for biodiversity in tropical forests: knowledge gaps and future directions. *Biotropica*, 2021, 53(5): 1276-1289.
- [63] Berdugo M, Delgado-Baquerizo M, Soliveres S, Hernández-Clemente R, Zhao Y C, Gaitán J J, Gross N, Saiz H, Maire V, Lehmann A, Rillig M C, Solé R V, Maestre F T. Global ecosystem thresholds driven by aridity. *Science*, 2020, 367(6479): 787-790.
- [64] Li C J, Fu B J, Wang S, Stringer L C, Zhou W X, Ren Z B, Hu M Q, Zhang Y J, Rodriguez-Caballero E, Weber B, Maestre F. T. Climate-driven ecological thresholds in China's drylands modulated by grazing. *Nature Sustainability*, 2023, 6(11): 1-10.
- [65] Ma S, Wang L J, Jiang J, Chu L, Zhang J C. Threshold effect of ecosystem services in response to climate change and vegetation coverage change in the Qinghai-Tibet Plateau ecological shelter. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 318: 128592.
- [66] Li T T, Tian D S, He Y C, Zhang R Y, Wang J S, Wang F R, Niu S L. Threshold response of ecosystem water use efficiency to soil water in an alpine meadow. *The Science of the Total Environment*, 2024, 908: 168345.
- [67] Peng J, Tian L, Liu Y X, Zhao M Y, Hu Y N, Wu J S. Ecosystem services response to urbanization in metropolitan areas: Thresholds identification. *Science of the Total Environment*, 2017, 607/608: 706-714.
- [68] Ren Z B, Li C J, Fu B J, Wang S, Stringer L C. Effects of aridification on soil total carbon pools in China's drylands. *Global Change Biology*, 2024, 30(1): e17091.
- [69] Sasaki T, Koyama A, Okuro T. Coupling structural and functional thresholds for vegetation changes on a Mongolian shrubland. *Ecological Indicators*, 2018, 93: 1264-1275.
- [70] Srivastava D S, Céréghino R, Trzcinski M K, Marino N A C, Acosta Mercado D, Leroy C, Corbara B, Romero G Q, Farjalla V F, Barberis I M, Dézerald O, Hammill E, Atwood T B, Piccoli G C O, Ospina-Bautista F, Carrias J F, Leal J S, Montero G, Antiquera P A P, Freire R, Realpe E, Amundrud S L, de Omena P M, Campos A B A. Ecological response to altered rainfall differs across the Neotropics. *Ecology*, 2020, 101(4): e02984.
- [71] 杜军, 蒲桂娟, 索朗旺堆, 王挺, 巴桑. 气候变暖背景下西藏中南部苹果物候期变化及其气候影响因子分析. *中国农业气象*, 2023, 44(3): 171-181.
- [72] 李洪杰, 刘军伟, 杨林, 郑海峰, 刘洋, 杨万勤, 张健. 海拔梯度模拟气候变暖对高山森林土壤微生物生物量碳氮磷的影响. *应用与环境生物学报*, 2016, 22(4): 599-605.
- [73] 张智起, 张立旭, 徐炜, 汪浩, 王金洲, 王妮, 贺金生. 气候变暖背景下土壤呼吸研究的几个重要问题. *草业学报*, 2019, 28(9): 164-173.
- [74] Shelton A O, Samhouri J F, Stier A C, Levin P S. Assessing trade-offs to inform ecosystem-based fisheries management of forage fish. *Scientific Reports*, 2014, 4(1): 7110.
- [75] Hilker F M, Liz E. Threshold harvesting as a conservation or exploitation strategy in population management. *Theoretical Ecology*, 2020, 13(4): 519-536.
- [76] Fahrig L. Effects of habitat fragmentation on biodiversity. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2003, 34(1): 487-515.
- [77] Leal C G, Barlow J, Gardner T A, Hughes R M, Leitão R P, Mac Nally R, Kaufmann P R, Ferraz S F B, Zuanon J, de Paula F R, Ferreira J, Thomson J R, Lennox G D, Dary E P, Röpke C P, Pompeu P S. Is environmental legislation conserving tropical stream faunas? A large-scale assessment of local, riparian and catchment-scale influences on Amazonian fish. *Journal of Applied Ecology*, 2018, 55(3): 1312-1326.
- [78] Hughes B B, Eby R, Van Dyke E, Tinker M T, Marks C I, Johnson K S, Wasson K. Recovery of a top predator mediates negative eutrophic effects on seagrass. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110(38): 15313-15318.
- [79] Xu H, Paerl H W, Qin B, Zhu G, Hall N S, Wu Y. Determining critical nutrient thresholds needed to control harmful cyanobacterial blooms in eutrophic Lake Taihu, China. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(2): 1051-1059.
- [80] Vilà M, Espinar J L, Hejda M, Hulme P E, Jarošík V, Maron J L, Pergl J, Schaffner U, Sun Y, Pyšek P. Ecological impacts of invasive alien

- plants; a meta-analysis of their effects on species, communities and ecosystems. *Ecology Letters*, 2011, 14(7): 702-708.
- [81] Barry D, Hartigan J A. A Bayesian analysis for change point problems. *Journal of the American Statistical Association*, 1993, 88(421): 309-319.
- [82] 张宏锋, 欧阳志云, 郑华. 生态系统服务功能的空间尺度特征. *生态学杂志*, 2007, 26(9): 1432-1437.
- [83] 王志恒, 刘玲莉. 生态系统结构与功能: 前沿与展望. *植物生态学报*, 2021, 45(10): 1033-1035.
- [84] 范小杉, 何萍, 侯利萍, 孟晓杰. 国外生态阈值研究进展及启示. *环境科学研究*, 2020, 33(3): 691-699.
- [85] Wootton J T. Prediction in complex communities: analysis of empirically derived Markov models. *Ecology*, 2001, 82(2): 580.
- [86] Hemstrom M A, Wisdom M J, Hann W J, Rowland M M, Wales B C, Gravenmier R A. Sagebrush-steppe vegetation dynamics and restoration potential in the interior Columbia Basin, U.S.A. *Conservation Biology*, 2002, 16(5): 1243-1255.
- [87] Costanza R, Voinov A. Modeling ecological and economic systems with STELLA: part III. *Ecological Modelling*, 2001, 143(1/2): 1-7.
- [88] 李华, 蔡永立. 基于 SD 的生态安全指标阈值的确定及应用——以上海崇明岛为例. *生态学报*, 2010, 30(13): 3654-3664.
- [89] Taylor M S. Innis Lecture: environmental crises: past, present, and future. *Canadian Journal of Economics*, 2009, 42(4): 1240-1275.
- [90] Samhouri J F, Andrews K S, Fay G, Harvey C J, Hazen E L, Hennessey S M, Holsman K, Hunsicker M E, Large S I, Marshall K N, Stier A C, Tam J C, Zador S G. Defining ecosystem thresholds for human activities and environmental pressures in the California Current. *Ecosphere*, 2017, 8(6): e01860.
- [91] 王翠玲, 宁方贵, 张继权, 刘兴朋, 佟志军. 辽西北玉米不同生长阶段干旱灾害风险阈值的确定. *灾害学*, 2011, 26(1): 43-47.
- [92] 崔保山, 贺强, 赵欣胜. 水盐环境梯度下翅碱蓬 (*Suaeda salsa*) 的生态阈值. *生态学报*, 2008, 28(4): 1408-1418.
- [93] Toms J D, Villard M A. Threshold detection: matching statistical methodology to ecological questions and conservation planning objectives. *Avian Conservation and Ecology*, 2015, 10(1): art2.
- [94] Qian S S, King R S, Richardson C J. Two statistical methods for the detection of environmental thresholds. *Ecological Modelling*, 2003, 166(1/2): 87-97.
- [95] 王小庆, 韦东普, 黄占斌, 马义兵. 物种敏感性分布在土壤中镍生态阈值建立中的应用研究. *农业环境科学学报*, 2012, 31(1): 92-98.
- [96] 曾庆楠, 安毅, 秦莉, 林大松. 物种敏感性分布法在建立土壤生态阈值方面的研究进展. *安全与环境学报*, 2018, 18(3): 1220-1224.
- [97] Arroyo-Rodríguez V, Fahrig L, Tabarelli M, Watling J I, Tischendorf L, Benchimol M, Cazetta E, Faria D, Leal I R, Melo F P L, Morante-Filho J C, Santos B A, Arasa-Gisbert R, Arce-Pea N, Cervantes-López M J, Cudney-Valenzuela S, Galán-Acedo C, San-José M, Vieira I C G, Slik J W F, Nowakowski A J, Tscharntke T. Designing optimal human-modified landscapes for forest biodiversity conservation. *Ecology Letters*, 2020, 23(9): 1404-1420.
- [98] 王志恒, 刘玲莉. 生态系统结构与功能: 前沿与展望. *植物生态学报*, 2021, 45(10): 1033-1035.
- [99] 张碧天, 闵庆文, 焦雯珺, 何思源, 刘某承, 杨伦. 生态系统服务权衡研究进展. *生态学报*, 2021, 41(14): 5517-5532.