

DOI: 10.11686/cyxb2024389

http://cyxb.magtech.com.cn

高兵兵, 刘晓曼, 熊锦芳. 生态阈值的研究综述与展望. 草业学报, 2025, 34(7): 210—218.

GAO Bing-bing, LIU Xiao-man, XIONG Jin-fang. A review and prospect of ecological threshold. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(7): 210—218.

生态阈值的研究综述与展望

高兵兵¹, 刘晓曼^{2*}, 熊锦芳¹

(1. 中国环境科学研究院, 北京 100012; 2. 生态环境部卫星环境应用中心, 北京 100094)

摘要:生态阈值存在于生态系统的非线性变化过程中, 提前探究可能突破生态环境限制条件的阈值, 从而做好预防措施具有十分重要的意义。本研究综述了国内外生态阈值研究文献, 梳理了生态阈值的概念与发展, 阐明了目前生态阈值识别方法的优缺点, 总结了生态阈值在生态系统保护与修复、应对全球气候变化、生物多样性保护以及灾害防治这4个热点研究领域中的应用, 最后提出了生态阈值研究在理论与应用方面的不足, 并在此基础上展望了中国生态阈值未来的研究重点, 以期为中国生态系统保护、修复和可持续发展提供思路借鉴。

关键词:生态阈值; 内涵; 应用; 方法; 展望

A review and prospect of ecological threshold

GAO Bing-bing¹, LIU Xiao-man^{2*}, XIONG Jin-fang¹

1. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. Satellite Application Center for Ecology and Environment, Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, Beijing 100094, China

Abstract: Ecological threshold is integral to the nonlinear dynamics of ecosystems. It is of great significance to explore the potential ecological threshold that can be breached to implement effective preventative strategies. Here, we review recent domestic and international research on ecological threshold, dissect the concept and development of ecological threshold, and discuss the advantages and disadvantages of the current ecological threshold identification methods. The application of ecological threshold is delineated to four main research domains: ecosystem conservation and restoration, global climate change mitigation, biodiversity conservation, and disaster prevention. The results of recent studies have revealed deficiencies in both theoretical and applied aspects of ecological threshold research. Building on this foundation, we propose priorities for further research on ecological threshold in China. This review offers insights and references for the conservation, restoration, and sustainable development of China's ecosystems.

Key words: ecological threshold; concept; application; method; prospect

随着社会经济高速发展, 不合理的开发与建设对生态系统的不良影响日益明显。然而生态系统对人类活动干扰的承受能力有限, 如果干扰超出了生态系统自身的修复能力, 生态系统的结构、质量和功能就会受到不同程度的紊乱^[1], 面对这种威胁, 迫切需要定量探测生态系统的承受能力。已有研究表明, 生态系统存在非线性变化, 表现为人类干扰造成的轻微变化能引起生态系统的突变^[2], 生态系统在变化过程中存在着阈值规律。生态阈值

收稿日期: 2024-10-12; 改回日期: 2024-11-11

基金项目: 国家“十四五”重点研发计划课题“风电场的土地立体化利用及生态效益评估技术”(2022YFF1303403)资助。

作者简介: 高兵兵(2000—), 女, 河南南阳人, 在读硕士。E-mail: bing9713@126.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: showma79@163.com

对生态环境管理具有非常重要的理论价值和指导意义,其研究结果能直接服务于管理决策。Future Earth Transition Team^[3] 研究计划的重点任务是探究人类如何在地球系统边界条件以内维持可持续发展,阈值成为其中一个关键因子。生态阈值的概念最早是在20世纪70年代被提出来,用来解释生态系统从一种状态转变为另一种状态的节点或者范围^[4]。生态阈值研究是可持续性科学研究的关键问题之一,不仅对了解生态环境快速变化或不可逆变化突破限制条件的阈值具有十分重要的作用,而且可以为生态系统管理决策提供科学支撑^[5],其研究逐步受到广泛重视,成为学术研究的热点和难点^[6]。

近几十年来,我国生态系统发生状态突变的生态退化时有发生,如盲目植树造林(草)引起的土壤干化,以及湿地旱化、湖泊富营养化等^[7]。因此,开展生态阈值研究是中国生态保护修复的重要课题,有助于人们认识生态系统的临界状态,进而提前采取措施,避免生态破坏,从而为应对气候变化、实现区域可持续发展提供依据,对我国生态保护修复进程的科学调控具有重要意义^[8]。鉴于此,本研究在综合国内外有关生态阈值研究的基础上,对生态阈值的研究进展进行了论述,在此基础上,分析了生态阈值研究面临的挑战和未来展望,以期为中国生态环境管理决策提供借鉴。

1 生态阈值研究进展

1.1 对生态阈值的理解越来越深刻,生态阈值的内涵越来越清晰

“阈值”是指系统的状态发生跃变的临界值或区间,其在生态系统中的应用就是生态阈值。早期生态阈值的概念与系统稳态息息相关,生态学家认为生态阈值为两个或多个稳态之间突然变化的点或区域^[9]。随后一系列针对生态系统变化的研究发现,生态系统中普遍存在一些非线性变化,这些变化表现为生态系统对驱动力的微小变化做出剧烈响应,因此生态阈值所指的对象从稳态的边界扩展到任何造成系统突然变化的驱动因素。May^[10]认为生态阈值反映生态系统状态发生改变的临界点,Bennett等^[11]认为生态阈值是生态系统从一种状态转变为另一种状态的点或区间。另有学者扩大其内涵范围,将其内涵从简单的表观状态上升至内部结构、属性层面^[12],Wissel^[13]指出,生态阈值是促使生态系统发生剧烈改变的关键值,Groffman等^[5]指出生态阈值是生态系统呈现2种不同状态的分界值,这种状态变化可以从原状态转变为退化状态或者进化状态。随着认识的加深,学者们认为生态阈值不仅仅是两种状态的临界点,也可以是生物/生态系统生存或死亡的阈值带^[14],带内点的变化速率明显高于阈值带外的点,且变化速率相对一致^[15]。生态阈值带的存在对于生态保护和修复具有重要意义,使得人类能够通过持续监测物种或修复过程,并在适当的时候采取措施进行干预,以预防不可逆转情形的发生。在前人对生态阈值定义的基础上,作者认为,生态阈值是生态系统在受到外界压力或干扰时,从一种稳定状态转变到另一种稳定或者非稳定状态的关键点或区间,其涵盖种群、群落、生态系统以及环境等多个层次,反映生物或生态系统、环境在面临变化时的适应和响应极限。

总体来说,目前学者们虽然对生态阈值的定义还有争议,但随着生态实验和观测手段的改进,生态阈值研究不断受到生态学界的关注,学者们对生态阈值的现象和本质有了更深刻的认识,其内涵越来越清晰,对其定义的理解越来越接近。

1.2 生态阈值的理论研究不断深化,并逐步应用到生态环境管理实践

从20世纪70年代提出生态阈值概念以来,生态阈值的理论研究不断深入。80年代,学者们对生态系统的多稳态现象开展研究,有学者指出生态系统的特性、功能等具有多个稳态^[10],还有学者在此基础上研究了接近生态阈值时的生态系统特征。90年代,发达国家重点关注到生态环境健康和可持续发展等问题,生态阈值相关理论研究开始完善,这期间有关生态阈值的出版物数量迅速增加,学者们相继证实多稳态现象在生态系统中存在而且是一个比较普遍的特性^[16-17]。进入21世纪以来,西方发达国家众多环境监管机构^[8,18]和环境保护组织^[19]一致建议将生态阈值作为制定生态环境管理标准的重要依据,以评估、预测阈值变化及其带来的风险,以减少生态环境损失、维持生态系统稳定。我国学者逐渐意识到自然生态系统被人类活动破坏带来的后果,随即就生态系统稳定性开始了一系列研究,但局限于生态系统稳定性理论分析层面^[20]。到了21世纪,众多学者将生态阈值应用到生态环境实践管理当中,诸如生态系统保护与修复、气候变化、生物多样性保护、灾害防治等领域。学者纷纷对森

林、草原、湿地等生态系统的保护和修复阈值展开了研究^[21-22]。还有一些研究将生态阈值引入农业生产活动中,如利用天敌阈值进行生物防治等^[23]。另外,生态阈值研究也广泛应用于生物多样性研究^[24],同时定量探测并厘清阈值是否存在及其变化范围也成为气候变化研究的重要议题^[25-26]。国内学者相继研究了湖沼湿地生态过程水体盐度的生态阈值^[27]、草原和森林病虫害的生态阈值^[28]、影响生态系统服务的植被覆盖度阈值^[29]。李代魁等^[2]开发了“中国生态阈值与稳态转换案例数据库”,展示了生态阈值在实际环境中的应用,极大地推动了生态阈值理论与方法在中国的发展。总之,随着生态阈值研究的不断深入,其理论不断应用到生态环境管理实践当中,应用领域也逐步扩大到更多生态系统研究领域和不同研究尺度。

1.3 研究方法不断丰富,逐步从统计分析方法向模型分析方法转变

生态阈值的定量化探测是生态保护修复领域学术研究和实践管理共同的需求,更是生态恢复研究从理论走向实践的难点和关键。自生态阈值概念被提出以来,国内外学者们高度重视生态阈值定量检测方法的探究。早期的阈值确定主要依据野外观测和实验等方法,通过分析生态系统对环境变化响应的规律来检测阈值。随着技术的不断进步,生态阈值探测发展到统计分析方法^[30],该方法是基于生态阈值为生态系统非线性变化的拐点这一重要认知发展起来的,通过分析数据之间的内在数量规律,从而选择符合生态学规律的统计模型^[31],常用方法有频率分析法^[32]、局部加权回归法^[33]、高斯模型^[34]、分段线性回归法^[35]等。特别值得注意的是,不同统计模型可能导致不同的阈值估计,因此在定量检测生态阈值时,需要根据样本量、潜在的阈值类型以及生态环境与驱动因素的压力-响应关系,选择最合适的分析方法,如局部加权回归散点平滑法适用于难以用具体函数描述关系的数据拟合,分段回归适用于连续阈值的统计推断,高斯模型适用于物种和环境胁迫因子的阈值分析,跃迁式阈值检测软件适用于跃迁式阈值概念模型,指示种阈值分析适用于水生生态群落。随着计算机技术和空间科学技术的迅速发展,生态阈值的分析方法逐步从统计分析向模型模拟深化^[36],该方法适用于更大时空尺度、更复杂生态系统阈值的定量检测,可以充分评估地球生态系统变化的阈值和风险。

2 生态阈值的主要应用方向

已有的理论和实验证据表明生态阈值的确存在,而且普遍存在于自然系统中,在生态系统保护与修复、气候变化、生物多样性保护、灾害防治等领域中具有重要的实践意义。

2.1 生态系统的保护与修复

2.1.1 森林生态系统的保护与修复 森林是防止水土流失、提高生态系统碳汇能力、提升水源涵养能力的主要因素,为了保证森林生态系统服务功能的发挥,就必须保证植被的有效盖度。然而,受水分有效性等生态承载力所限,植被覆盖度不可能永远是越高愈好,植被覆盖度与各项生态系统服务功能之间存在阈值现象^[37],实质是用较少的林草地面积,获取最大的生态系统服务效益,这一水平将长期维持树木生长,同时确保森林群落的长期稳定和生态系统服务的持续稳定发挥。国内外学者重点识别了森林覆盖面积这一主导因子与生态系统服务关系的约束效应和影响阈值,发现在地中海地区,植被减少风蚀的作用基本在植被覆盖度达到40%及以上时最大^[38];中国黄土高原,随着植被盖度从10%增加到40%,土壤流失量急剧减少,但当植被盖度超过40%时,侵蚀速率稳定且轻微^[39];中国南方长汀县在样地尺度上,植被覆盖度在30%到70%时,土壤侵蚀效应发生转变^[40]。植树造林恢复背景下研究一个合适的植被覆盖度修复阈值是中国生态修复管理的关键,对我国生态修复进程的科学调控具有重要意义。

2.1.2 草地生态系统的保护与修复 人类过度放牧会造成草地面积急剧缩小,从而导致草原生态系统退化。草地生态系统存在自我修复、可持续发展的覆盖度阈值。研究发现,外蒙古荒漠草原植被覆盖度低于30%生态系统就会出现持续退化,此时自然修复已经不能阻止退化,必须依靠人工措施进行修复^[41]。学者们针对草地植被对土壤水分、土壤盐分、虫害等胁迫因子的响应也开展了阈值定量研究。其中土壤湿度与含水量降低促使草本植物的数量和多样性减少是草地生态系统一个重要的稳态转换类型。尤其是干旱区灌木根系季节动态明显受到土壤水分含量的影响^[42]。研究表明,当土壤有效磷含量超过 $55 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,土壤中的水溶性磷和磷释放潜力会显著增加^[43]。

2.1.3 湿地生态系统的保护与修复 探讨湿地生态环境演化规律,识别稳态转换关键驱动因子并确定其阈值,可以为湿地生态修复提供指导。对于湿地生态系统,水位水量、土壤养分、水体营养盐浓度及湿地面积大小是维持湿地生态系统的重要生态阈值。国内外学者对典型河流湖泊的生态阈值开展了一系列研究,得到了重要的研究结论。研究表明盐地植物对土壤水分和盐分存在一个最适生态阈值区间^[44];磷是营养物质中主要的限制元素^[45],通过降低水体磷浓度,可以有效控制藻类密度,降低湖泊水华暴发风险^[46];一些敏感性水生动物植物可以作为水质检测的生物指标,有学者计算了入海口或湿地处水生植物、大型底栖动物受到显著影响时的水体盐浓度阈值^[47-48];湿地水量在湿地保护中也是一个重要参考指标,可以通过计算湿地在不同状态下水面的面积,得到湿地生态环境需水量的阈值,可为流域生态用水调度提供科学依据^[49]。

2.2 应对全球气候变化

自工业革命以来,温室气体CO₂排放量极速增加,带来全球变暖问题。当气候变化在短时间内产生强烈干扰,或者环境压力持续时间过长、影响程度过深时,生态系统将面临超出其自然恢复能力的挑战。在这种情况下,生态系统可能会经历生产力的急剧下降,内部结构遭受破坏,整体质量降低,生态功能逐渐衰退,甚至可能发生逆向的生态演替过程^[26],这个临界限度就是气候变化对生态系统产生影响的阈值。全球气候变化在近些年已成为主要热点问题之一,因此定量探测并厘清阈值是否存在及其变化范围是气候变化研究的重要议题。

CO₂浓度的提高在一定程度上会提高植物引起生理活性衰变的阈值,同时不同气候状态会引起寒带生物群落巨大的非线性变化。张伟等^[25]根据城市生态系统在健康与风险状态之间的转换情况,通过仿真模型确定城市各子系统的临界阈值,提出了北京城市适应气候变化的基本策略。但由于环境压力因素的多样性和复杂性,以及这些因素之间错综复杂的相互作用和相互制约关系,气候变化对生态系统产生影响的临界点成为一个极为复杂的科学难题。这并非仅仅是通过单一的温度上升数值或温室气体排放量的阈值就能轻易界定的问题。因此,科学家们需要开发更为精细和动态的模型,以更准确地预测气候变化对生态系统的影响阈值,从而为制定有效的生态保护和适应策略提供科学依据。

2.3 生物多样性保护

在某一特定地区或生态系统中,为了维持生物多样性的健康状态,生物多样性变化必须保持在某一阈值水平之下,当跨越这个阈值时,生态系统质量与服务将面临严重的破坏和不可逆转的损失。有学者为维持生物的可持续发展,设置了潮间带褐藻的人为破坏管理阈值^[50]。可见,生态阈值的理论和方法对生物多样性保护具有重要意义,生物多样性阈值研究可以为管理者确定敏感种提供依据,还能应用于自然保护区的选址、面积的确定、功能分区以及保护地之间的连通性等,可以利用生态阈值评估在生物多样性热点地区进行保护的成本和效益^[24],为有效管理生物多样性保护和生产力之间的权衡提供科学依据。

动物或植物存在一个最小种群,相应栖息地即存在着最小面积,以保证物种的生存、繁衍。栖息地丧失阈值受到种群规模、物种生态位、生境连通性以及栖息地的健康状况等多个因素的影响,当该阈值达到某一水平时,种群的灭绝概率极大提高。栖息地面积大小是生态保护的一项重要指标,研究证明了生物多样性阈值的存在,即物种丰富度在栖息地丧失的情况下可能会突然下降^[51]。但由于不同物种在不同生境中的适应性不同,生境面积阈值存在偏差。在进行生态保护时,管理者尽可能保留20%~50%的原生景观作为生态栖息地。有学者识别了特定物种类群在不同适宜生境中受影响的环境变量,分析了在各环境梯度下响应阈值的差异,从而探讨栖息地景观结构恢复的措施和方法,维护生物多样性^[52]。

2.4 灾害防治

生态阈值对于虫(鼠)害等灾害的防御具有重要意义。关于蝗虫的防治阈值,美国农业部及动植物健康检验局认为蝗虫种群大于等于阈值9.6头·m⁻²时,蝗虫爆发。还有学者对国内外有关害虫防治经济阈值和生态阈值的概念、理论及研究进展进行概述整理^[53]。关于林中或草原鼠害的防治阈值,有研究分析估计了鼠害防治的鼠洞数目与鼠数目生态阈值^[28]。

此外,生态阈值在火灾防治中也能发挥很大的作用。利用长期数据,通过分析干扰与响应变量间的非线性变

化,确定干扰变量的危险阈值,可以预防重大负面性环境突变。在大尺度上,通过野外实验研究或者林火生态学模型,植物群落预防火灾的生态阈值可以被识别出,还有研究以稳态转换和生态弹性理论为指导,初步推定了扎龙湿地发生火灾的驱动因子和表征因子的临界条件^[54]。在个体尺度上,在热带草原生态系统中,某些树种通过积累一定厚度的树皮,来有效地抵御干旱条件,从而达到对火灾的耐受阈值^[55]。

3 研究不足

虽然生态阈值受到了各国学者们的高度重视,研究取得了阶段性成果,但由于生态阈值涉及领域众多,生态因子相互作用复杂,其研究的不确定性依然存在,无论是理论研究还是应用都面临挑战。

3.1 概念尚未统一,缺乏科学的生态阈值理论范式

国内外学者对生态阈值的概念在经历了数十年的讨论和探索后理解日趋相近,但由于生态阈值涉及的学科众多,其内涵和外延十分复杂,目前尚无统一公认的定义,因此难以避免在正确辨识、检测并应用阈值等方面造成混乱。同时缺乏大量成功的研究案例,这也阻碍了生态阈值概念的完善和理论的发展^[56]。而且现有案例尚无统一理论的指导,案例间未形成紧密关联,无法进行规律总结与归纳,限制了对生态阈值深层次的理解与管理应用。因此,通过大量案例研究建立生态阈值理论范式是推动生态阈值发展的必经之路,对于推动复杂生态系统的阈值定量化研究十分重要。

3.2 生态阈值研究尚存在不确定性

生态系统典型的非线性特征决定了生态阈值广泛存在于各种生态系统中,但由于各种生态因子相互作用的复杂性和随机性,生态阈值研究存在很大不确定性,将阈值应用于管理实践存在较大局限性。首先,生态系统具有抗性、扰性和弹性,对外界的干扰存在滞后性,这为阈值压力—响应关系的分析增加了难度。其次,生态阈值的确定很大程度上取决于选择的干扰因子和研究对象,而生态阈值的研究对象存在很大差异,不同生态系统不同生态因子相互作用复杂,这就导致生态系统临界值或者拐点的不确定性,因此应用生态阈值理论时必须谨慎。另外,生态阈值和生态系统稳定性有着紧密联系,而生态系统的稳定性是生态学中最模糊的概念之一,存在众多的争议。鉴于此,阈值研究成果应用于生态保护与环境管理实践存在着不确定性,一直受到高度关注。

3.3 生态阈值的时空研究尺度存在局限性

生态阈值的研究对象空间尺度差异非常大,小到物种与群落,大到区域修复乃至全球变化等。同一对象在群落、区域和全球尺度上,表现出不同的生态阈值,目前还无法将个体生物的成果推广至生态系统的尺度上。另外,大尺度生态阈值的确定应当考虑小尺度的特异性变化,原因在于大尺度上生态阈值的确定需要考虑小尺度上的量变积累。然而令人遗憾的是,我国生态阈值研究多侧重在样地尺度,更多地揭示了样地或小流域尺度上的生态阈值,且研究多通过观测单一生态要素来开展,主要集中于特定物种、特定生态功能和特定生态参数等指标。通过模型模拟将局地尺度的生态阈值研究成果推广至全球或区域等大尺度层面的研究相对较少,难以满足大尺度生态保护修复监管的决策需求。生态阈值的研究在时间尺度上同样面临着显著的局限性,主要是探测生态阈值通常需要大量的野外数据,这些数据在长时间尺度上可能难以获取,这在一定程度上限制了对生态阈值长期变化的监测和理解。

3.4 生态阈值的精准量化方法难度较大

生态阈值研究的实践价值在于精准探测生态系统非线性变化前后存在差异的状态,从而为生态系统管理和决策提供科学依据。然而生态系统干扰因素复杂、外界生境变化快,动态预测难度较大,这些特性使得生态阈值的确定方法和模型难以统一,同时生态阈值的确定因量化方法不同而导致结果存在很大的不确定性。此外,已有生态阈值多参照相关标准值或直接依据现状值进行估算,存在一定主观性,且目前大部分生态阈值的试验观测都局限于对已发生稳态转换的分析,难以准确对预期发生的生态系统稳态转换进一步变化做出判定和预警。

3.5 生态阈值融入实际管理需求还有很大差距

生态阈值研究是生态系统精准监测、早期预警和有效修复的重要依据,能提高管理和决策行为的可预测性。虽然当前生态阈值的理论研究成果不断丰富,但生态系统的变化复杂多样,增加了生态阈值应用于实践管理中的

难度。而且现有的阈值研究大多针对生态退化阈值,但对于生态系统管理而言,更有效的阈值应当是预防阈值,在系统出现重大变化(质变)之前,预测并采取有效的管理手段干预退化进程。同时针对我国重大生态环境问题建立生态阈值研究的理论方法体系和基础研究欠缺,引领构建不同类型、不同尺度生态系统的预警和管控标准不足,利用生态阈值理论科学支撑国家“生态安全”“美丽中国”“生态修复”“生态承载力”“生态保护红线”等重大需求和管理决策的力度不够。

4 研究展望

为更好地服务于中国生态系统保护修复的管理决策,未来应建立生态阈值科学理论范式,开展生态阈值案例分析,重视生态阈值确定性研究,加强生态阈值的尺度转换,科学寻找生态阈值的量化方法,将生态阈值理论研究成果积极融入国家生态环境保护实践和环境管理。

4.1 加强生态阈值内涵研究,建立生态阈值科学理论范式

未来需要进一步加强生态阈值内涵的研究,统一生态阈值定义,并把对生态阈值的理解准确妥善运用于生态系统管理,促使生态系统健康发展。对大量已发表的论文进行汇集筛选和分类梳理,开展复杂的生态系统生态阈值案例分析。在此基础上,强化案例的关联性和共性特征研究,加强生态系统跨越阈值的过程机理分析,建立生态阈值和稳态转换的理论范式,促进其在中国生态环境保护修复管理决策中的应用。

4.2 重视生态阈值基础支撑,强化生态阈值确定性研究

生态阈值的准确性和科学性依赖于大量的基础实验数据或者长期定位观测数据,这是科学探测生态阈值的基础。因此,未来需要通过野外观测、遥感监测和大尺度观测网络等多种手段综合获取生态阈值观测数据,加强长时间序列多空间尺度生态参数和观测数据的积累和分析。在此基础上,强化控制实验、样带设置、综合观测等研究,构建生态系统多个状态间转变的非线性数学预测模型,提高对生态系统阈值研究的确定性,并在系统接近阈值、即将发生稳态转换时提供早期预警,不断改进管理策略。

4.3 加强生态阈值的尺度转换研究,将小尺度研究成果推广到大尺度

在注重小尺度研究的同时,加强大、中尺度野外生态实验和观测,为统计分析与模型模拟提供准确而科学的数据支持,从而满足大尺度生态保护修复决策需求。加强生态阈值在时间、空间尺度等方面的局限性原因分析,重视不同尺度间生态阈值定量转换的方法研究,强调不同尺度生态阈值的综合集成,通过模型模拟将局地尺度的生态阈值研究成果推广至全球或区域等大尺度层面。在国家重大科研项目中,融合不同时空尺度环境保护、管理决策与科技支撑的需求,科学设置生态阈值相关研究项目,通过加强基础生态阈值研究提升实践应用价值。

4.4 科学寻找生态阈值的量化方法,提升生态阈值确定方法的科学性与客观性

在定量检测生态阈值时,须依据自变量和响应变量内在的逻辑联系及其对应的生态压力—响应关系来筛选出最合适的方法。要加强干扰因子对不同尺度生态系统的影响机制研究,以及生态系统对干扰因子的响应机理过程,以提高模型的模拟精度与普适性。发挥大数据、大模型等现代新技术具备的优势,加强系统动力学仿真等模型模拟的研究,以科学模拟预测生态系统内部的复杂响应及其阈值。

4.5 将生态阈值理论研究成果积极融入国家生态保护实践和环境管理

在我国未来的重大生态工程实施过程中,可以依据长期、系统的监测数据,识别促使生态系统发生稳态转换的特殊生态因子及其阈值,为中国生态保护和修复策略提供依据,如在我国干旱半干旱地区由于受到降水的限制,植树造林(草)并非越多越好,确定一个合适的植被覆盖度修复阈值是恢复管理的关键,实质是如何用较少的林草地面积,获取最大的生态系统服务效益,这一水平将长期维持树木生长,同时确保植物群落的长期稳定和生态系统服务的持续稳定发挥。通过提前预测生态阈值,尽快形成并转化为资源环境承载力和生态安全预警的定量管理手段,推动已有成果的深化研究及其在生态安全风险管控领域的有效应用。在城市土地开发研究中,以生态承载力为依据,通过确定合理、适宜的产业规模和结构阈值,促进经济健康持续发展,并维持自然—经济—社会复合生态系统平衡。在重要生态功能区的管理实践中,通过生态阈值监测与评估,明确重点保护区域与保护目

标,确定一些特别敏感和脆弱的生态功能区域。针对“分区管控”“生态保护红线”等政策亟须生态阈值研究成果支撑,开展区域性生态阈值的判别和认知,切实提升生态阈值研究对环境管理的技术支撑价值。

参考文献 References:

- [1] Li K R, Cao M K, Yu L, *et al.* Assessment of vulnerability of natural ecosystems in China under the changing climate. *Geographical Research*, 2005, 24(5): 653–663.
李克让, 曹明奎, 於琨, 等. 中国自然生态系统对气候变化的脆弱性评估. *地理研究*, 2005, 24(5): 653–663.
- [2] Li D K, He P, Xu J, *et al.* Research basis of ecological thresholds and regime shifts in China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(6): 2015–2028.
李代魁, 何萍, 徐杰, 等. 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.
- [3] Future Earth Transition Team. *Future earth initial design: Report of the transition team*. Paris, France: International Council for Science (ICSU), 2013.
- [4] Huggett A. The concept and utility of ‘ecological thresholds’ in biodiversity conservation. *Biological Conservation*, 2005, 124(3): 301–310.
- [5] Groffman P M, Baron J S, Blett T, *et al.* Ecological thresholds: The key to successful environmental management or an important concept with no practical application. *Ecosystems*, 2006, 9(1): 1–13.
- [6] Hou L P, He P, Fan X S, *et al.* A review on the methods of determining ecological thresholds. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(2): 711–718.
侯利萍, 何萍, 范小杉, 等. 生态阈值确定方法综述. *应用生态学报*, 2021, 32(2): 711–718.
- [7] Anurag H, Crystal N G, Tipping R, *et al.* Modeling the impact of spatiotemporal vegetation dynamics on groundwater recharge. *Journal of Hydrology*, 2021, 601: 126584.
- [8] Johnson C J. Identifying ecological thresholds for regulating human activity: Effective conservation or wishful thinking. *Biological Conservation*, 2013, 168: 57–65.
- [9] Holling C S. Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecological Systems*, 1973, 4: 1–23.
- [10] May R M. Thresholds and breakpoints in ecosystems with a multiplicity of stable states. *Nature*, 1977, 269(5628): 471–477.
- [11] Bennett A F, Radford J Q. *Know your ecological thresholds*. Canberra, Australia: Thinking Bush, 2003.
- [12] Dakos V, Carpenter S R, Van Nes E H, *et al.* Resilience indicators: prospects and limitations for early warnings of regime shifts. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2015, 370(1659): 1–10.
- [13] Wissel C. A universal law of the characteristics return time near thresholds. *Oecologia*, 1984, 65(1): 101–107.
- [14] Li H P, Shi H B, Guo Y Y, *et al.* Study on sustainable utilization of water-grass resources and ecological threshold of pastoral area. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2005, 36(6): 694–700.
李和平, 史海滨, 郭元裕, 等. 牧区水草资源持续利用与生态系统阈值研究. *水利学报*, 2005, 36(6): 694–700.
- [15] Chen M. *The study on the threshold of ecological impact assessment for cascade hydropower development*. Chengdu: Sichuan University, 2011.
陈敏. 水能梯级开发生态影响评价阈值研究. 成都: 四川大学, 2011.
- [16] Janse J H. A model of nutrient dynamics in shallow lakes in relation to multiple stable states. *Hydrobiologia*, 1997, 342(1): 1–8.
- [17] Scheffer M. Multiplicity of stable states in fresh-water systems. *Hydrobiologia*, 1990, 200(61): 475–486.
- [18] Boyko A, Cudmore B, Doherty A, *et al.* Recovery strategy for the eastern sand darter (*Ammocrypta pellucida*) in Canada. Ottawa, Canada: Fisheries and Oceans Canada, 2012.
- [19] Kennedy C M, Balch J K, Wilkinson J. *Conservation thresholds for land use planners*. Washington D. C., America: Environmental Law Institute, 2003.
- [20] Li W C. Multiplicity of stable states in shallow lakes and its application. *Journal of Lake Sciences*, 1997, 9(2): 97–104.
李文朝. 浅水湖泊生态系统的多稳态理论及其应用. *湖泊科学*, 1997, 9(2): 97–104.
- [21] Cao S, Lu C, Yue H. Optimal tree canopy cover during ecological restoration: A case study of possible ecological thresholds in Changting, China. *BioScience*, 2017, 67(3): 221–232.
- [22] Dail Y J, Hitt N, Smith D, *et al.* Experimental and environmental factors affect spurious detection of ecological thresholds. *Ecology*, 2012, 93(1): 17–23.

- [23] Giles K, Mccornack B, Royer T, *et al.* Incorporating biological control into IPM decision making. *Current Opinion in Insect Science*, 2012, 20(4): 84–89.
- [24] Banks-leite C, Pardini R, Tambosi L R, *et al.* Using ecological thresholds to evaluate the costs and benefits of set-asides in a biodiversity hotspot. *Science*, 2014, 345(6200): 1041–1045.
- [25] Zhang W, Xu L P, Cheng H H. Scenario analysis based on the ecological threshold assessment model and countermeasures for adaptation to global climate change in Beijing//Proceedings of the 2017 (12th) conference on urban development and planning. Haikou: Chinese Society for Urban Studies, 2017: 1482–1489.
张伟, 徐丽萍, 程红红. 基于生态阈值评估模型的北京城市发展情景分析与适应气候变化策略研究//(第十二届)城市发展与规划论文集. 海口: 中国城市科学研究会, 2017: 1482–1489.
- [26] Feng X Z, Wang M, Wu L. Research on coordination between combating climate change and conserving ecosystems. *Ecological Economy*, 2018, 34(1): 134–137.
冯相昭, 王敏, 吴良. 应对气候变化与生态系统保护工作协同性研究. *生态经济*, 2018, 34(1): 134–137.
- [27] Tang T, Ren Z, Tang T, *et al.* Total nitrogen and total phosphorus thresholds for epilithic diatom assemblages in inflow tributaries of the Three Gorges Reservoir, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(8): 2670–2678.
汤婷, 任泽, 唐涛, 等. 基于附石硅藻的三峡水库入库支流氮、磷阈值. *应用生态学报*, 2016, 27(8): 2670–2678.
- [28] Li Y N, Yuan S, Fu H P, *et al.* Relationship of rodent densities with forage loss in typical steppe. *Acta Theriologica Sinica*, 2018, 38(4): 369–376.
李燕妮, 袁帅, 付和平, 等. 典型草原啮齿动物密度与牧草损失量的关系. *兽类学报*, 2018, 38(4): 369–376.
- [29] Ma H. The analysis of ecological threshold of vegetation cover in forest lands of red soil region in China. Beijing: Beijing Forestry University, 2014.
马华. 红壤丘陵区林地生态修复植被覆盖度阈值分析. 北京: 北京林业大学, 2014.
- [30] Zhang L, Lin J N, Zhang Y, *et al.* Responses of the benthic diatom community to nutrients and the identification of nutrient thresholds in three aquatic ecoregions of the Huntai River, Northeast China. *Environmental Science*, 2017, 38(11): 4570–4579.
张莉, 林佳宁, 张远, 等. 浑太河不同水生态区营养盐对底栖硅藻的影响及阈值. *环境科学*, 2017, 38(11): 4570–4579.
- [31] Qian S S. Ecological threshold and environmental management: A note on statistical methods for detecting thresholds. *Ecological Indicators*, 2014, 38: 192–197.
- [32] Chen Q, Huo S L, Xi B D, *et al.* Study on establishing lake reference condition for nutrient. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(3): 544–549.
陈奇, 霍守亮, 席北斗, 等. 湖泊营养物参照状态建立方法研究. *生态环境学报*, 2010, 19(3): 544–549.
- [33] William S C. Robust locally weighted regression and smoothing scatter plots. *Journal of the American Statistical Association*, 1979, 74(368): 829–836.
- [34] Zhang J T. Quantitative ecology. Beijing: Science Press, 2004.
张金屯. 数量生态学. 北京: 科学出版社, 2004.
- [35] Toms J, Lesperance M. Piecewise regression: A tool for identifying ecological thresholds. *Ecology*, 2003, 84(8): 2034–2041.
- [36] Li Z L. Study on optimal allocation of water resources in Weiyunhe area based on system dynamics theory. Tianjin: Tianjin University, 2018.
李志林. 基于系统动力学的卫运河区域水资源优化配置研究. 天津: 天津大学, 2018.
- [37] Chen T T, Wang Y X, Zeng X L, *et al.* Characteristics and the constraint relationship between ecosystem services and vegetation coverage in the Southwest China. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(6): 2253–2270.
陈田田, 王钰茜, 曾兴兰, 等. 西南地区生态系统服务关系特征及其与植被覆盖的约束效应. *生态学报*, 2023, 43(6): 2253–2270.
- [38] Maetens W, Vanmaercke M, Poesen J, *et al.* Effects of land use on annual runoff and soil loss in Europe and the Mediterranean: A meta-analysis of plot data. *Progress in Physical Geography*, 2012, 36(5): 599–653.
- [39] Jiang C, Zhang H, Zhang Z, *et al.* Model-based assessment soil loss by wind and water erosion in China's Loess Plateau: dynamic change, conservation effectiveness, and strategies for sustainable restoration. *Global Planet Change*, 2019, 172: 396–413.
- [40] Gao Y, Zhong B, Yue H, *et al.* A degradation threshold for irreversible soil productivity loss in southeastern China: Results of a

- long-term case study in Changting County. *Journal of Applied Ecology*, 2011, 48(5): 1145–1154.
- [41] Lindenmayer D B, Fischer J, Cunningham R B. Native vegetation cover thresholds associated with species responses. *Biological Conservation*, 2005, 124(3): 311–316.
- [42] Li X R, Zhang Z S, Huang L, *et al.* Review of the ecohydrological processes and feedback mechanisms controlling sand-binding vegetation systems in sandy desert regions of China. *Chinese Scientific Bulletin*, 2013, 58(5/6): 397–410.
李新荣, 张志山, 黄磊, 等. 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(5/6): 397–410.
- [43] Li A F, Tao G C, Zhang M K. Study on soil phosphorus accumulation and leaching threshold in main tea producing areas of Zhejiang Province. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2014, 1(1): 31–33.
李艾芬, 陶国才, 章明奎. 浙江省茶叶主产区土壤磷的积累与淋失阈值研究. *浙江农业科学*, 2014, 1(1): 31–33.
- [44] Zhang H B, Liu H Y, Li Y F, *et al.* The studying of key ecological factors and threshold of landscape evolution in Yancheng coastal wetland. *Acta Ecology Sinica*, 2013, 33(21): 6975–6983.
张华兵, 刘红玉, 李玉凤, 等. 盐城海滨湿地景观演变关键土壤生态因子与阈值研究. *生态学报*, 2013, 33(21): 6975–6983.
- [45] Liu X, Li E H, Xu J, *et al.* Evolution mechanism of lake Honghu wetland ecosystem and regime shift crucial threshold. *Journal of Lake Sciences*, 2023, 35(3): 934–940.
刘昔, 厉恩华, 徐杰, 等. 洪湖湿地生态系统演变及稳态转换关键驱动因子阈值研究. *湖泊科学*, 2023, 35(3): 934–940.
- [46] Zhang J R, Zeng Y, Zhao Y W. Threshold analysis of water blooms in Baiyangdian wetlands. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(8): 1744–1750.
张家瑞, 曾勇, 赵彦伟. 白洋淀湿地水华暴发阈值分析. *生态学杂志*, 2011, 30(8): 1744–1750.
- [47] Liang Z, Soranno P, Wagner T. The role of phosphorus and nitrogen on chlorophyll a: Evidence from hundreds of lakes. *Water Research*, 2020, 185(15): 116236.
- [48] Liu L, Li Z P, Shen Y C, *et al.* Study of stress of four environmental factors on *Porites lutea* and *Goniopora stutchburyi*. *Journal of Tropical Oceanography*, 2013, 32(3): 72–77.
刘丽, 李泽鹏, 申玉春, 等. 四种环境因子对澄黄滨珊瑚和斯氏角孔珊瑚胁迫作用研究. *热带海洋学报*, 2013, 32(3): 72–77.
- [49] Wang Z Y, Qiao X Y, An Y T, *et al.* Exploration of ecological water demand thresholds for rivers in Gansu section of the Yellow River Basin. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2023, 34(2): 81–90.
王梓宇, 乔晓英, 安宇廷, 等. 黄河流域甘肃段河道生态需水阈值的探讨. *水资源与水工程学报*, 2023, 34(2): 81–90.
- [50] Addison P, Bie K, Rumpff L. Setting conservation management thresholds using a novel participatory modeling approach. *Conservation Biology*, 2015, 29(5): 1411–1422.
- [51] Estavillo C, Pardini R, Rocha P. Forest loss and the biodiversity threshold: an evaluation considering species habitat requirements and the use of matrix habitats. *PLoS One*, 2013, 8(12): e82369.
- [52] Wang C, Liu H Y, Li Y F, *et al.* A study on habitat suitability and ecological threshold of waterbird guilds in Yancheng coastal wetlands: Implications for habitat structure restoration. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2022, 38(7): 897–908.
王成, 刘红玉, 李玉凤, 等. 盐城滨海湿地水鸟类群生境适宜性及生态阈值研究: 对栖息地景观结构恢复的启示. *生态与农村环境学报*, 2022, 38(7): 897–908.
- [53] Tang H P, Chen J, Xue H L. Ecological thresholds: Concept, methods and research outlooks. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2015, 39(9): 932–940.
唐海萍, 陈皎, 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.
- [54] Xu N. Study on fire tipping point and ecological resilience of Zhalong wetland ecosystem. Lanzhou: Lanzhou University, 2022.
徐楠. 扎龙湿地生态系统的火灾临界点与生态弹性研究. 兰州: 兰州大学, 2022.
- [55] Hoffmann W, Geiger E, Gotsch S, *et al.* Ecological thresholds at the savanna-forest boundary: how plant traits, resources and fire govern the distribution of tropical biomes. *Ecological Letters*, 2012, 15(7): 759–768.
- [56] Wang S J, Wei Y Q. Overview and prospects for ecological safety threshold research. *Acta Prataculturae Sinica*, 2017, 26(1): 195–205.
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.