

附件 3

《区域生态系统稳定性评价技术指南
(征求意见稿)》编制说明

《区域生态系统稳定性评价技术指南》编制组

二〇二四年六月

目 录

1 项目背景.....	1
1.1 任务来源.....	1
1.2 主要工作过程.....	1
2 标准制定的必要性分析.....	2
3 生态系统稳定性评价研究进展与相关标准.....	3
3.1 生态系统稳定性的概念内涵.....	3
3.2 生态系统稳定性主要决定因素.....	5
3.3 生态系统稳定性评价指标与方法.....	7
3.4 法律法规及政策制度相关要求.....	11
4 基本原则和技术路线.....	16
4.1 制定目的.....	16
4.2 基本原则.....	16
4.3 技术路线.....	17
5 主要技术内容及确定依据.....	17
5.1 适用范围.....	17
5.2 标准结构框架.....	18
5.3 规范性引用文件.....	18
5.4 术语和定义.....	19
5.5 评价原则.....	19
5.6 评价流程.....	20
5.7 算法和指标说明.....	21
6 实施本标准的管理措施、技术措施、实施方案建议.....	26
7 实施本标准的环境效益及经济效益分析.....	26
8 主要参考文献.....	27
附图一 2000-2020 年全国县域生态系统稳定性指数空间分布图.....	31
附图二 2000-2020 年全国县域生态系统稳定性等级空间分布图.....	33

1 项目背景

1.1 任务来源

近年来，中共中央、国务院对提升生态系统稳定性作出一系列决策部署，《关于全面加强生态环境保护 坚决打好污染防治攻坚战的意见》《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》《关于全面推进美丽中国建设的意见》等均对提升生态系统稳定性提出了具体要求。开展生态系统稳定性评价，是落实中共中央、国务院决策部署的重要支撑和具体体现。

2021年，中共中央、国务院印发了《国家标准化发展纲要》，提出要完善绿色发展标准化保障，持续优化生态系统建设和保护标准。2022年，为贯彻实施《国家标准化发展纲要》，更好发挥标准化在推进国家治理体系和治理能力现代化中的基础性、引领性作用，市场监管总局等16个部门联合印发《贯彻实施〈国家标准化发展纲要〉行动计划》（国市监标技发〔2022〕64号），在生态领域提出要完善生态系统保护与修复标准体系，明确指出要开展生态系统稳定性评价标准制定。同年5月，生态环境部印发《关于开展2022年度第二批国家生态环境标准项目实施工作的通知》（环办法规函〔2022〕205号），将《生态系统稳定性评价技术指南》列入2022年第二批国家生态环境标准项目。项目由中国环境科学研究院牵头起草完成，协作单位为生态环境部南京环境科学研究所。

1.2 主要工作过程

2022年6-7月，开展广泛的文献和资料查阅，梳理新时期制定生态系统稳定性评价技术指南的客观要求和必要性，对比目前法律法规有关要求和相关标准的规定。

2022年8-10月，对国内外生态系统稳定性的概念、内涵、研究历史、现状、存在的问题等进行综合研究，明确生态系统稳定性评价的相关技术方法，编制形成《生态系统稳定性评价技术指南（草案初稿）》和开题论证报告。

2022年11-12月，编制组邀请生态环境部环境规划院、生态环境部卫星环境应用中心、中国科学院地理科学与资源研究所、北京师范大学、湖南省环境保护科学研究院等单位相关领域专家组织开展专家研讨会，与会专家就《生态系统稳定性评价技术指南（草案初稿）》进行讨论并形成了意见。编制组根据专家意见进行修改，形成了《生态系统稳定性评价技术指南（草案）》和开题论证报告。

2023年2月，生态环境部环境标准研究所组织召开《生态系统稳定性评价技术指南》国家生态环境标准开题论证会，经专家讨论评审，项目通过专家开题论证。

2023年3-7月，编制组多次开展内部讨论会，围绕《生态系统稳定性评价技术指南（草案）》中生态系统稳定性评价的评价范围、评价目的、评价指标和评价方法等展开讨论，结合开题专家意见，对《生态系统稳定性评价技术指南（草案）》进行修改和完善。

2023年8月，编制组组织收集和处理相关指标数据，对全国县级行政单元开展生态系统稳定性试评价，基于指标数据和评价结果，确定本标准文件的关键参数，形成《生态系统稳定性评价技术指南（征求意见稿）》和编制说明。

2023年9-10月，生态环境部环境标准研究所组织召开《生态系统稳定性评价技术指南（征

征求意见稿)》国家环境标准技术审查会,原则上通过了标准文件征求意见稿。会后编制组开展内部技术研讨,根据专家意见,针对本标准征求意见稿中评价流程、评价指标、评价方法等关键部分进行了修改完善,形成《区域生态系统稳定性评价技术指南(征求意见稿)》和编制说明。

2 标准制定的必要性分析

(1) 全面落实中共中央、国务院关于生态保护决策部署的具体体现

中共中央、国务院高度重视生态系统质量和稳定性。2018年,中共中央、国务院印发的《关于全面加强生态环境保护 坚决打好污染防治攻坚战的意见》提出了“坚持自然恢复为主,统筹开展全国生态保护与修复,全面划定并严守生态保护红线,提升生态系统质量和稳定性”的战略部署。2021年,《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》明确了“提升生态系统质量和稳定性”的具体任务,要求“坚持山水林田湖草系统治理,着力提高生态系统自我修复能力和稳定性,守住自然生态安全边界,促进自然生态系统质量整体改善”。2022年10月,党的二十大报告中将提升生态系统多样性、稳定性、持续性确定为推动绿色发展,促进人与自然和谐共生的重要内容,明确要求“提升生态系统多样性、稳定性、持续性,加快实施重要生态系统保护和修复重大工程,实施生物多样性保护重大工程,推行草原森林河流湖泊湿地休养生息,实施好长江十年禁渔,健全耕地休耕轮作制度,防治外来物种侵害”。同年,市场监管总局等16个部门联合印发的《贯彻实施〈国家标准化发展纲要〉行动计划》中,提出要完善生态系统保护与修复标准体系,开展生态系统稳定性评价标准制定。2023年,习近平总书记在全国生态环境保护大会上发表重要讲话,指出要着力提升生态系统多样性、稳定性、持续性,加大生态系统保护力度,切实加强生态保护修复监管,拓宽绿水青山转化金山银山的路径,为子孙后代留下山清水秀的生态空间。2024年,中共中央、国务院印发了《关于全面推进美丽中国建设的意见》,部署了提升生态系统多样性稳定性持续性的重点任务,并提出了到2035年实现生态系统多样性稳定性持续性显著提升的主要目标。

(2) 维护区域生态安全和生态系统稳定性的客观需要

稳定性是生态系统的基本特征之一。近年来,虽然我国生态系统保护修复工作持续推进,生态环境质量有所改善,但我国生态环境保护结构性、根源性、趋势性压力尚未根本缓解,生态系统整体质量和稳定性状况不容乐观,比如人多地少水缺,河流、湖泊、森林、草原、湿地等资源分布不均,加之历史上长期过度开发索取,生态系统总体比较脆弱;河道断流、湖泊萎缩、水质污染等问题仍然存在;全国森林覆盖率远低于全球平均水平,草原中度和重度退化面积占1/3以上;生物多样性指数下降,一些珍稀特有物种极度濒危。这些问题已成为我国经济高质量发展和满足人民美好生活需要的突出制约因素,全面掌握生态系统的稳定性,对维护生态安全和实现社会经济持续健康发展具有重要意义。

(3) 建立健全生态保护监管标准规范体系的必然要求

生态环境部负有指导协调和监督生态保护修复工作的职责,开展生态系统稳定性评价是生态保护监管工作的重要任务。生态环境部发布的《关于加强生态保护监管工作的意见》《“十四五”生态保护监管规划》都将生态系统质量和稳定性进一步提升列为主要工作目标。生态系统稳定性评价作为生态保护监管的一项基础性工作,是联系生态系统监测与管理决策

的关键环节。建立生态系统稳定性评价标准可避免或减少管理中的决策失误，引导各地加强生态保护监管，提升生态保护监管能力。目前，针对生态系统稳定性评价相关标准规范尚未制定，亟需开展相关标准规范研究制定工作，指导推进生态保护监管工作，提高生态保护监管效率。

3 生态系统稳定性评价研究进展与相关标准

3.1 生态系统稳定性的概念内涵

系统稳定性的概念。生态系统稳定性的概念来自于系统控制论，由于内涵和外延的不同，不同学者对稳定性的概念也有不同的理解，具体的包括恒定性、持久性、惯性、弹性、恢复性、局部稳定性、全局稳定性等。生态系统稳定性是理论生态学的焦点问题之一，也是生态研究的热点和难点。针对生态系统稳定性的产生机制，国内外众多专家提出了不同的观点。以模型研究为起点的复杂性理论派认为生态系统的稳定性与其自身的物种多样性有着或多或少的联系；一些学者以自动控制系统可靠性为基础提出了冗余理论，经过大量的研究得出结论——自然界大到一个生态系统、小到植物的某个器官的稳定性都与相应水平的冗余密切相关。

生态系统稳定性研究的发展历程。生态系统稳定性理论自20世纪50年代由现代生态学之父Odum（1953）、植物生态学家MacArthur（1955）和动物生态学家Elton（1958）提出后，便成为理论生态学的焦点问题之一（柳新伟等, 2004）。从此之后各国生态学家针对生物多样性关系与稳定性理论等问题开展了激烈的争论，并从不同角度对生态系统稳定性概念化，但由于问题比较复杂，一直未能达成一致。由于涉及群落平衡状态、生态系统的功能与组成和其他干扰因素，一般认为，稳定性的定义仅有在基于非平衡范式的初始态水平上的稳定才具有研究意义（邬建国, 1996）。尽管如此，生态系统稳定性研究始终是生态学研究的热点问题，学者们对生态系统稳定性的研究最初集中在生态系统结构上，包括物种的空间格局和组成等，逐渐深入到20世纪70年代以来的以生态系统功能为主导的研究（姚秀粉, 2013）。直到20世纪90年代，生态学家开始通过观察和实验系统地探索多样性与稳定性之间的关系。

生态系统稳定性反馈机制。生态系统的稳定性主要通过反馈调节来完成。生态系统反馈条件又分为正反馈和负反馈两种。负反馈对生态系统达到和保持平衡是必不可少的。正负反馈的相互作用和转化，保证了生态系统可以达到一定的稳态。例如，如果草原上的食草动物因为迁入而增加，植物就会因为受到过度啃食而减少；而植物数量减少以后，反过来就会抑制动物的数量，从而保证了草原生态系统中的生产者和消费者之间的平衡。自然生态系统中正反馈的例子不多，但也客观存在着。例如，有一个湖泊受到了水生植物入侵，大量枯落物加速湖泊富营养化，增加的营养让陆地植物更容易生长，最终乔木物种进入，原来的湖泊变成了森林。

生态系统稳定性的定义。经典的生态系统稳定性定义，包括生态系统受到外界干扰后，抵抗离开初始状态的能力，即抵抗力；和干扰去除后生态系统恢复到初始状态的能力，即恢复力（黄建辉等, 1995）。生态系统稳定性及其相关概念的定义如下表所示（韩博平, 1994）。

表1 生态系统稳定性及其相关概念的定义

相关概念	概念	定义
抵抗力相关概念	抵抗	干扰作用下，系统抵抗离开初态的能力。
	不变性	系统某些性质的变化。
	持久性	系统及其组分的生存时间。
恢复力相关概念	恢复力	干扰消除后，系统恢复到初态的能力。
	幅度	系统可以恢复到初态的范围。
	滞变性	恢复路径不同于退化路径的程度。

生态系统稳定性的相关概念，也可以从不同的内涵和外延进行解释（刘增文等, 1997）：

表2 不同内涵和外延的稳定性概念

类型	指标	定义
不同内涵的稳定性概念	恒定性	指生态系统的物种数量、群落生活型或环境的物理特征等参数不发生变化。这是一种绝对稳定的概念，这种稳定在自然界几乎是不可能的。
	持久性	指生态系统在一定边界范围内保持恒定或维持某一特定状态的历时长度。这是一种相对稳定概念，且根据研究对象不同，稳定水平也不同。
	惯性	生态系统在风、火、病虫害以及食草动物数量剧增等扰动因子出现时保持恒定或持久的能力。
	弹性（回复性）	指生态系统缓冲干扰并仍保持在一定阀限之内的能力，即对扰动的缓冲能力。
	抗性	描述系统在给予扰动后产生变化的大小，即衡量其对扰动的敏感性。
	变异性	描述系统在给予扰动后种群密度随时间变化的大小。
不同外延的稳定性概念	变幅	生态系统可被改变并能迅速恢复原来状态的程度，即强调其可恢复的受扰范围。
	局部稳定性	系统受较小的扰动后仍能回复到原来的平衡点，而受到较大的扰动后则无法回复到原来的平衡点，则称该平衡点的稳定为局部稳定，或邻域稳定。
	全局稳定性	系统受到较大的扰动后远离平衡点，但最终仍能回复到原来的平衡点，则该系统具有全局稳定性。处于演替末期的群落常常如此。
	结构稳定	在系统状态方程里，参数的变化（扰动引起）可通过转移矩阵的传递，在解空间里反映出来，当数学解在空间的变化小到可以忽略时，便说明该系统的传递矩阵性能较好，因而称该系统为结构稳定。
	循环稳定性	生态系统经过一系列变化后仍能恢复原来的状态的特性，是具循环演替的生态系统的另一种稳定形式。
	轨道稳定性	生态系统在其原有状态被扰动并改变成各种不同的新状态后复归至某一最终状态的倾向，是具逆行演替的生态系统的特殊稳定形式。

目前,生态学界公认的生态系统稳定性是指生态系统保持正常动态的能力,主要包括抵抗力稳定性和恢复力稳定性。长期以来,人们认为抵抗力稳定性与恢复力稳定性是相关的,抵抗力稳定性高的生态系统,其恢复力稳定性低。例如,热带雨林大都具有很强的抵抗力稳定性,因为它们的物种组成十分丰富,结构比较复杂;在热带雨林受到一定强度的破坏后,恢复时间会十分漫长。相反,对于极地苔原(冻原),由于其物种组分单一、结构简单,它的抵抗力稳定性很低,在遭到过度放牧、火灾等干扰后,很快就会恢复。

通过对生态系统稳定性相关概念、发展历程、反馈机制等进行研究,本标准文件认为,生态系统稳定性是指生态系统所具有的保持或恢复自身结构和功能相对稳定的能力,是能够反映生态系统动态特征的静态属性,其概念内涵包括抵抗力稳定性和恢复力稳定性。

3.2 生态系统稳定性主要决定因素

(1) 生态系统稳定性决定因素

生态系统稳定性影响因素的复杂性。生态系统的稳定性不仅与生态系统的结构、功能和进化特征相关,同时与外界干扰的强度和特征也存在较大的关联性。从生态系统内部来看,稳定性可以通过生态系统的总体特征或系统结构和组成特征来衡量;从生态系统外部来看,稳定性可以用影响生态系统结构和动态的生物和非生物环境改变来理解。对于一个真实的生态系统,其结构以及外界干扰的多样性是稳定性研究中复杂的根源。稳定性研究的一个巨大挑战是它包括许多方面,诸如渐近稳定性、恢复力、抵抗力、持久性和可变性等。因此,稳定性被认为是一个具有多因子的复杂概念,稳定性定义之间的差距影响了不同研究之间的可比性,并进一步阻碍了该领域的发展。

生物多样性在生态系统中发挥着至关重要的作用。来自理论、观测和实验研究的证据表明,面对不断变化的环境,较高的生物多样性倾向于促进生态系统的功能和稳定性(Craven et al., 2018; Garcia-Palacios et al., 2018; Gilbert et al., 2020; Hautier et al., 2015; Oehri et al., 2017; Tilman et al., 2006),且越来越多的研究证据表明了多样性与稳定性的正向关系(Ives A R & Carpenter, 2007),生物多样性的增加提升了生态系统过程和特性在时间、空间或两者上的稳定性(Wang et al., 2019)。

物种多样性有两个主要组成部分,即物种丰富度(当地群落中物种的数量)和物种组成(群落中物种的特性)。虽然大多数关于生态系统多样性与稳定性之间关系的研究都集中在物种丰富度上,但物种组成的变化才是解释物种丰富度与生态系统功能之间关系的机理基础。物种之间在资源利用、环境耐受性以及与其他物种的相互作用方面存在差异,因此物种组成对生态系统的功能和稳定性有着重大影响。当来自不同功能类群的物种同时出现时,它们会表现出资源利用的互补性,这意味着它们会利用不同的资源或在不同的时间利用相同的资源。例如,对动物而言,两种动物捕食者可能会捕食不同的猎物,因此它们不太可能相互竞争,从而使系统中捕食者的总生物量增加;对植物而言,所有物种都可能利用同一套资源(空间、光照、水分、土壤养分等),但可以因植物生长季节的不同而在不同时间利用资源,例如草原上的早熟禾和晚熟禾。因此增加物种多样性可以提高物种利用互补资源的可能性,从而影响生态系统的功能,提高生态系统总生产率,还可以提高群落中出现高产或高效物种的可能性(Cleland, 2011)。

相关实证研究表明 (McGrady-Steed et al., 1997; Naeem & Li, 1997), 物种多样性赋予了若干生态系统功能在空间和时间上的稳定性。在功能群内部和功能群之间, 物种丰富度都会带来稳定性 (Wardle et al., 2000)。当一个系统中具有多种类似生态功能的物种时, 它们有时会被认为是“功能冗余”。但实验表明, 当单个物种因气候变化等环境变化而消失时, 功能冗余物种在确保生态系统稳定性方面可能发挥重要作用。如Tilman等 (2006) 建立了168个样方地块并开展了长时间序列的观测研究, 结果发现物种多样性更高的地块的生产力更稳定, 即物种多样性的增加与生态系统稳定性的增加呈正相关。Bai等 (2004) 对内蒙古草原植被的自然组合进行了长达24年的研究, 一种物种丰度的降低会得到另一种物种丰度增加的补偿, 这种补偿稳定了整个群落在波动环境中的生物量生产力。因此, 不同空间尺度和时间尺度的研究证明, 在自然形成的群落中, 当地物种的丰富度 (包括功能群内部和功能群之间的丰富度) 赋予生态系统过程以稳定性。

人们普遍认为, 资源供给对于控制土壤生物多样性和地下生物相互作用至关重要。土壤生物多样性在促进分解和养分循环的生态过程、促进植物养分获取及其对胁迫因子的耐受性方面发挥着重要作用, 从而影响植物的表现和陆地生态系统的功能 (Bardgett & van der Putten 2014; Delgado-Baquerizo et al., 2020; Jing et al., 2015; Wagg et al., 2014a, 2019b), 土壤生物多样性通过植物-土壤反馈作用成为植物种群和群落特性的主要驱动力之一 (Bardgett & van der Putten 2014; Bradford et al., 2002; De Deyn et al., 2003; Tedersoo et al., 2020; Teste et al., 2017; van der Heijden et al., 1998), 土壤生物多样性通过土壤养分供应或植物物种丰富度等多种直接或间接途径影响生态系统的稳定性。基于土壤生物多样性以及土壤生物过程对生态系统稳定性的影响, 相关研究提出了土壤生物多样性影响生态系统稳定性的潜在机制途径 (Powell & Rillig, 2018; van der Heijden et al., 2008; Yang et al., 2018), 例如土壤生物区系可能通过直接或间接调节植物多样性和群落组成、以植物水分和养分吸收为媒介的地上净初级生产力、土壤养分供应以及物种在时间变化的环境条件下的补偿动态来影响生态系统的稳定性 (Yang et al., 2018); Zhu等 (2023) 利用连续耕作超过25年的5个典型农业生态实验站采集了土壤样本数据进行对照实验, 评估密集型农业生态系统土壤潜在功能稳定性的大小, 研究表明, 资源可获得性通过地下生物多样性和潜在的多营养体相互作用来控制土壤功能性状的稳定性。当资源可获得性较低时, 潜在的营养体内部相互作用和土壤生物多样性共同决定了功能性状的稳定性。高资源可获得性增加了潜在的跨营养体相互作用, 从而极大地支持了功能特征的稳定性。Chen等 (2021) 在青藏高原54个高原草地生态系统开展长时间序列生物多样性调查与生态系统生产力的关系研究, 发现地上和地下生物多样性均与生态系统稳定性呈正相关。因此, 地下生物多样性不仅直接影响生态系统稳定性, 而且通过植物多样性和土壤肥力间接影响生态系统稳定性。

(2) 生态系统稳定性干扰因素

生态系统稳定性的干扰因素。从系统外部来看, 扰动或干扰是指影响生态系统结构和动态的生物和非生物环境改变, 不同扰动方式可以从强度、时序特征、空间分布、作用方式、来源等方面理解。在不同干扰模式下生态系统的响应模式也不同, 因此要理解某一稳定性指标需要理解其背后的干扰模式。从系统内部讲, 生态系统对扰动的响应是一个多层次、多尺度的过程, 度量生态系统稳定性在实际操作中反映为量化特定层次和尺度的响应方式。具体

来说, 度量生态系统稳定性的指标既可以是生态系统总体的特征, 例如物种丰富度、生产力等群落层面的指标, 也可以更精细的生态系统结构和组成特征, 例如均匀度、种群大小等物种层面的指标 (李周园, 2021)。

(3) 生态系统稳定性尺度依赖性

目前, 在样点、区域和全球范围内有关生态系统稳定性对气候变化和物种变化的响应机制已经涌现了大量研究。大多数样地及站点尺度的研究表明, 生物因素是影响生态系统稳定性的主要因素, 目前已逐渐拓展到植被-土壤-微生物生态系统不同组分的稳定性研究, 而土壤性质等其它非生物因素通过影响生物因素进而改变生态系统稳定性, 属于生态系统稳定性的直接影响因素。例如, Carroll (2022) 等通过对34个草地进行7年以上的实验研究, 发现氮、磷等土壤养分的添加可以影响群落生产力的稳定性和年际变率。在区域甚至更大尺度的研究表明, 大空间尺度上降水、辐射和温度等气候因素对生态系统稳定性的作用更大, 区域尺度上生态系统的生产力主要由气候变量驱动 (陈集景等, 2021)。相较于局地尺度物种丰富度的变化, 在景观尺度上气候因素的变化对于生态系统稳定性的影响更显著, 因此, 在景观尺度上采取综合的生态系统管理方法更能提升区域的生态系统稳定性 (White et al., 2022)。但目前相关研究并未证实气候因素与生态系统稳定性的关联性, 即使针对同一研究区域, 关于气候因素对生态系统稳定的影响结论也曾出现相悖的情况。

有研究表明, 从局地尺度到区域尺度, 生态系统的变动性逐渐降低, 生物多样性在各个尺度都会影响生态系统稳定性, 生物多样性和生物栖息地的丧失都会削弱区域生态系统的稳定性 (Wang et al., 2014)。目前国内外对于宏观尺度生态系统稳定性的研究才刚刚起步, 大多是从景观格局的角度进行研究, 但由于景观格局本质是对几何形态、状态以及复杂程度的特征的描述, 无法从系统机制的角度揭示生态系统稳定性 (冯海波, 2021)。

3.3 生态系统稳定性评价指标与方法

生态系统稳定性评价研究一般结合野外采样调查数据和遥感数据, 通过关键指标对区域生态系统稳定性进行衡量和判别。针对各种类别的生态系统, 不同的生态系统稳定性评价指标体系相继被提出。整体上, 生态系统稳定性评价指标体系是定性分析和定量研究的结合。生态系统稳定性评价中有些指标非常重要且难以被替代, 又无法直接通过实验等方法获得, 只能做定性分析研究, 但定性分析缺乏明确的测度方法, 没有明确且一致的量化模式或公式, 一般采用专家咨询法将其量化。定量研究是通过一系列实验及检验, 使指标体系更加科学和合理的过程。生态系统稳定性的定量评价方法可细分为综合评价方法 (包括层次分析法、模糊数学法、熵权法、加权综合平均法、综合指数评估方法等)、灰色信息分析 (包括灰色关联度分析、灰色系统评价法等)、生态模型 (包括生态系统服务功能、生物多样性指标等)、景观生态学方法 (如NDVI等) 及其他方法 (包括压力-状态-响应模型、能值方法等)。根据指标数量的不同, 生态系统稳定性评价方法可分为综合指标评价法和单一指标评价法。

(1) 综合指标评价法

综合指标评价法通常基于研究对象特征选取关键指标构建评价指标体系, 通过综合指数反映生态系统稳定性, 并将生态系统稳定性划分为若干等级。在评价生态系统稳定性时, 首先要选取具有代表性且能够表征生态系统稳定性特征的典型参数; 其次要在对选取的这些典

型特征参数归类区分的基础上,进一步分析各个特征参数的生态意义;再次要对这些典型特征因子进行度量,确定每个典型特征因子在评价中的权重系数;最后确定生态系统稳定性评价方法,建立具有代表性且容易取值的生态系统稳定性评价指标体系。综合指标评价法多用于针对单一生态要素或单一生态系统的生态系统稳定性评价。

早期的森林群落稳定性评价指标主要包括生物量或生产力等功能指标和群落组成、多样性等结构指标,近年来,土壤、地形等环境因子和人类活动等也逐步被纳入生态系统稳定性评价指标体系(见表3)。森林生态系统稳定性的影响因素主要有物种多样性、群落结构、物种组成、土壤肥力、年龄结构、抚育间伐、森林病虫害、林火干扰等。森林生态系统稳定性评价方法应用较多的主要有改进的层次分析法、主成分分析法、模糊综合评价以及综合指数法等,研究者通常运用一种或结合多种方法对森林群落或生态系统稳定性作出评价(宋文璐等, 2022)。如张梦弢等(2015)等选择反映群落基本特征的种群更新潜力、土壤肥力(土壤水分和土壤养分)、林地生产力、物种多样性5项共22个因子,运用模糊综合评价中隶属函数法对长白山云冷杉林不同演替阶段森林群落的稳定性进行评价;张明霞等(2015)选择物种丰富度、Shannon-Wiener指数、郁闭度、林分密度、土壤容重等28项表征群落结构和环境特征的森林群落调查指标,采用主成分分析法对秦岭不同典型森林群落的稳定性进行了评价。

表3 森林生态系统稳定性评价常用指标

序号	常用指标	参考文献
1	土壤质地、土壤厚度、枯落物厚度、坡位、坡度、海拔、郁闭度、群落蓄积量、群落多样性、群落更新、净化大气、涵养水源、保持水土、固碳释氧、群落结构、砍伐采挖、林区道路、野营游憩、土壤侵蚀、病虫害侵袭、林火危险。	(罗恒春等, 2017)
2	群落树种组成、径级结构、物种多样性、群落结构、生物多样性、植物多样性、物种组成、林地生产力、土壤肥力、种间联结、年龄结构、抚育间伐、森林病虫害、林火干扰。	(宋文璐等, 2022)
3	立地因子、人为干扰、自然干扰、极端气候、病虫害、外来物种、生物多样性、目标树种的稳定性、生物量、病虫害状况、自我更新能力、系统生产力、郁闭度、土壤恢复程度等。	(梁燕等, 2018)
4	幼苗比例、土壤容重、饱和持水量、毛管持水量、非毛管持水量、自然含水量、土壤通气度、碱解氮、速效磷、速效钾、全氮、全磷、全钾、有机质含量、乔木蓄积量、灌木生物量、草本生物量、Gleason 物种丰富度指数、物种多样性指数(Shannon 指数和 Simpson 指数)和均匀性指数(Pielou 指数和 Alatado 指数)。	(张梦弢等, 2015)
5	乔木层、灌木层、草本层物种丰富度、Shannon-Wiener 指数、Simpson 指数、Pielou 均匀度指数、郁闭度、更新幼苗数量、林分密度、优势树种平均胸径和树高、立木蓄积量、林龄、海拔、坡度、坡向、土壤容重、最大水量、最小持水量、毛管持水量、毛管孔隙度、非毛管孔隙度等。	(张明霞等, 2015)

序号	常用指标	参考文献
6	角尺度、混交度、大小比数、郁闭度、林分密度、蓄积量、草本层物种丰富度、草本 Shannon-Wiener 指数、灌木层物种丰富度、灌木 Shannon-Wiener 指数、土壤动物丰富度、土壤动物 Shannon-Wiener 指数、土壤有机质含量、土壤速效氮含量、土壤速效磷含量、土壤速效钾含量、凋落物重量、土壤容重。	(张磊等, 2020)

对草原生态系统稳定性的研究, 早期大多集中于植物特征方面, 即降水、土壤理化性质等对物种多样性和生物量变化的影响(高江平, 2021)。草地植物因采食时间、部位和次数等因素的不同, 对草原造成的危害也不同, 因此放牧方式和强度也是影响草原生态系统稳定性的重要因素(王忠武, 2009)。在近些年的研究中, 地上净初级生产力/地上生物量常被作为草原生态系统稳定性评价的关键指标(见表4)。如莫莉(2019)通过对同一生态系统中经过不同时期干扰后恢复的样地与原生样地进行生物多样性与稳定性的差异分析, 来探究草原生态系统稳定性与生物多样性的关系。

表4 草原生态系统稳定性评价常用指标

序号	常用指标	参考文献
1	滞尘量、土壤含水量、容重、渗透率、物种丰富度、生物量、株高变异系数。	(莫莉, 2019)
2	地上净初级生产力。	(高贝, 2022)
3	群落地上生物量。	(高江平, 2021)
4	地上生物量、植株高度、叶面积、叶片长度等。	(康萨如拉等, 2020)

对湿地生态系统稳定性评价的指标主要分为湿地结构指标、湿地功能指标、外部环境指标、人为影响指标等(见表5)。如Zhang等(2013)采用压力-状态-响应模型, 基于湿地的功能价值、环境约束和社会经济方面选取11个评价指标构建了湿地生态系统稳定性评价指标体系, 并结合层次分析法评价了中国银川平原生态系统稳定性。姚晓寒(2021)基于层次分析法, 选取物种丰富度、Shannon-Wiener指数、NDVI指数、年降水量变化等20个指标, 构建了金川泥炭沼泽湿地生态系统稳定性评价指标体系; 张型东(2016)通过湿地功能指标、自然因素指标、人为因素指标3方面分析, 遴选水质净化功能、水文条件、景观多样性、人口密度等14项指标, 基于层次分析法构建了鄱阳湖湿地生态系统稳定性评价指标体系, 将鄱阳湖湿地生态系统稳定性划分为稳定、较稳定、一般稳定、较不稳定、不稳定5个等级层次。

表5 湿地生态系统稳定性评价常用指标

序号	常用指标	参考文献
1	滩涂湿地退化、外来物种入侵、区域开发强度、化肥施用强度、城镇化率、工业废水排放量、渔业养殖规模、人口密度、公路密度、有机质、速效磷、速效钾、pH 值、优势种覆盖度、生物多样性、景观破碎度、景观干扰度等。	(田鹏, 2020)

序号	常用指标	参考文献
2	湿地调蓄功能、水质净化功能、气候调节功能、景观多样性、森林覆盖率、城镇化水平、人口密度、农药施用量、化肥施用量等。	(张型东, 2016)
3	降水量、蒸发量、景观多样性变化、景观均匀度指数、湿地蓄水功能、湿地净化功能、物质生产功能、人口密度、人口自然增长率、农药施用强度等。	(廖玉静, 2009)
4	物种数、生物多样性指数、土壤微生物群落、土壤酶、生物量、土壤容重、总孔隙度、土壤有机质、人口活动强度等。	(姚秀粉, 2013)
5	物种丰富度、Shannon-Wiener 指数、Simpson 指数、Pielou 指数、植被覆盖度、土壤容重、有机碳、碳氮比、NDVI 指数、年降水量等。	(姚晓寒, 2021)

(2) 单一指标评价法

相较于综合指标评价法,单一指标评价法通常以单一指标的时间稳定性来表征生态系统稳定性。多数研究表明,植物丰富度或土壤生物多样性可以解释长期生态系统的稳定性,因此,生态系统稳定性评价通常选取能够表征地表生产力或生物量的指标,并通过指标值的变异系数,即一定时间尺度内归一化指标的时间平均值与其时间标准差的比率进行评价(Wu et al., 2023),这种生态系统稳定性测量方法是无量纲的,评价结果可直接在不同研究和不同生产力水平的群落之间进行比较(Isbell et al., 2015)。而在大空间尺度范围内,难以获得连续时间序列植物生产力数据,遥感技术则为大时空尺度的生态系统稳定性评价提供了一种潜在的方法支持。在区域或全球尺度上,相关研究中通常选取归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)、增强植被指数(Enhanced Vegetation Index, EVI)、总初级生产力(Gross Primary Productivity, GPP)、净初级生产力(Net Primary Production, NPP)等作为表征生态系统稳定性的关键指标。

研究表明,生物多样性的恢复主要通过改变生态系统生产力对气候事件的抵抗力来提高生态系统的稳定性(Isbell, 2015),因此生产力是衡量生态系统稳定性的常用指标。Zhang等(2022)通过构建指标体系评估了1990-2015年中国各县和国家重点生态功能区的生态系统质量改善状况,其中生态系统稳定性作为衡量国家重点生态功能区生态系统质量的关键指标之一,作者选取待评价时间点前10年去除时间趋势后的NPP的时间稳定指数表征区域生态系统稳定性。Liu等(2022)选取NPP作为衡量农田生态系统稳定性的替代指标,利用趋势分析法在像元尺度上建立线性回归模型,进而计算每个像元的NPP变化趋势。

同时NDVI与生物量或年地上净初级生产力(Aboveground Net Primary Production, ANPP)之间存在正相关关系(Paruelo, 1997; Jobb gy, 2002),如Wu等(2023)通过实地调查研究,验证NDVI作为ANPP替代指标的可靠性,证明了两者之间存在极高的相关性,认为每年的年生长季NDVI值可以作为ANPP的替代指标,因此也有学者选择NDVI作为地上植物生物量的替代值来评估区域生态系统稳定性(Liu et al., 2022; Wu et al., 2023)。如Niu等(2018)基于研究区的生态环境特征,使用植被覆盖度的时间稳定性对群落总覆盖率和单个物种覆盖

度的时间稳定性进行评估，分别计算了研究区域的植物群落稳定性和种群稳定性。Chen等（2021）选择了与NDVI相似的EVI作为地上净初级生产力的替代指标，通过使用MOD13Q1产品数据获取每个调查样例区域的EVI值，通过EVI的变异系数评价了2001-2016年青藏高原生态系统稳定性，进而发现植物物种丰富度可促进生态系统稳定性。

3.4 法律法规及政策制度相关要求

（1）相关制度要求

在《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》的第十一篇“推动绿色发展 促进人与自然和谐共生”中以一个章节的内容对我国“十四五”期间生态系统质量和稳定性提出了新的要求，即“坚持山水林田湖草系统治理，着力提高生态系统自我修复能力和稳定性，守住自然生态安全边界，促进自然生态系统质量整体改善。”在2022年10月16日召开的中国共产党第二十次全国代表大会上，习近平总书记对提升生态系统稳定性做了进一步阐述，强调必须牢固树立和践行“绿水青山就是金山银山”的理念，站在人与自然和谐共生的高度谋划发展。要加快发展方式绿色转型，深入推进污染防治，提升生态系统多样性、稳定性、持续性，积极稳妥推进碳达峰碳中和。

近年来，生态保护红线、耕地草原河湖休养生息、天然林保护、以国家公园为主体的自然保护地体系等一系列制度得到建立健全，新一轮退耕还林还草、重点防护林体系建设、青海三江源、祁连山等重点区域综合治理等一系列重点生态工程持续推进，基本遏制了我国自然生态系统恶化趋势，生态环境质量持续好转，但成效并不稳固。各类相关制度要求对持续提升生态系统质量和稳定性具有良好的支撑作用，为巩固生态环境基础提供了坚实的制度保障。如《生态环境部关于实施“三线一单”生态环境分区管控的指导意见（试行）》通过划定落实生态保护红线、永久基本农田和城镇开发边界以及各类海域保护线，强化了国土空间规划和用途管制，维持了区域空间格局的基本稳定。中共中央办公厅、国务院办公厅印发的《关于全面推行林长制的意见》，通过全面推行林长制，坚持生态优先、保护为主，全面落实森林法、草原法等法律法规，建立健全最严格的森林草原资源保护制度，加强生态保护修复，保护生物多样性，增强森林和草原等生态系统稳定性。中共中央办公厅、国务院办公厅印发的《党政领导干部生态环境损害责任追究办法（试行）》将资源消耗、环境保护、生态效益等情况作为党委及其组织部门在地方党政领导班子成员选拔任用考核评价的重要内容，通过强化领导干部生态环境和资源保护的主要责任维护区域生态环境。中共中央办公厅、国务院办公厅印发的《领导干部自然资源资产离任审计规定（试行）》规定了领导干部在自然资源管理开发利用、环境保护与改善、生态系统保护与修复等方面的主要责任，推动领导干部切实履行自然资源资产管理和生态环境保护责任。

国家法律法规和地方性法规条例对生态系统稳定性也有相应要求，为维护生态系统稳定性提供了法律保障。2017年修订的《中华人民共和国森林法》中提出，县级以上人民政府应当落实国土空间开发保护要求，合理规划森林资源保护利用结构和布局，制定森林资源保护发展目标，提高森林覆盖率、森林蓄积量，提升森林生态系统质量和稳定性。地方性法规条例则在生态文明建设、区域资源开发、湿地与天然林保护、旅游景区开发与保护、美丽乡村建设等领域提出了增强生态系统稳定性的具体要求。其中北京市、鄂温克族自治旗、海口市、

郑州市等多地的湿地保护条例中均提出，在湿地保护范围划定时，应当维护湿地生态系统的整体性、连通性、稳定性；在《徐州市山林资源保护条例》《内蒙古自治区额济纳胡杨林保护条例》中则更注重强调提升天然林、胡杨林等森林生态系统的质量和稳定性。《南阳市生态文明建设促进条例》《云南省创建生态文明建设排头兵促进条例》等地方生态文明建设促进条例则在国家法律法规和区域专项保护条例的基础上对提升生态系统稳定性进行了进一步的强调，如《东莞市生态文明建设促进与保障条例》要求健全耕地湿地森林河流湖泊休养生息制度，优化生态安全屏障体系，构建生态廊道和生物多样性保护网络，提升生态系统质量和稳定性。安徽省、南京市、临汾市等地以及山东泰山、长春莲花山等风景名胜、生态旅游度假区发布施行的相关旅游条例和保护管理条例则从保护和合理利用旅游资源的角度提出了相关要求，以维护当地自然资源的区域整体性，保护生物多样性、生态系统稳定性。为了建设美丽乡村，推动乡村全面振兴，临沂市发布实施《临沂市美丽乡村条例》，其中第二十三条提出各级人民政府应当加强野生动植物保护，采取植被修复、水源涵养和改善动植物栖息地等措施，构建生态廊道和生物多样性保护网络，防止外来有害生物入侵，提升生态系统稳定性，维护生态安全。

（2）各相关部门工作部署安排

国家发展改革委和自然资源部印发的《全国重要生态系统保护和修复重大工程总体规划（2021-2035年）》指出要科学布局和组织实施重要生态系统保护和修复重大工程，着力提高生态系统自我修复能力，切实增强生态系统稳定性，显著提升生态系统功能。提出到2035年，通过大力实施重要生态系统保护和修复重大工程，全面加强生态保护和修复工作，全国森林、草原、荒漠、河湖、湿地、海洋等自然生态系统状况实现根本好转，生态系统质量明显改善，生态服务功能显著提高，生态稳定性明显增强，自然生态系统基本实现良性循环，国家生态安全屏障体系基本建成，优质生态产品供给能力基本满足人民群众需求，人与自然和谐共生的美丽画卷基本绘就。在“三区四带”的主攻方向中，进一步强调了要提升各地区不同生态系统类型的生态系统结构完整性和功能稳定性。

提升生态系统质量和稳定性是相关规划的基本出发点、基本原则和主要目标。《国务院办公厅关于加强草原保护修复的若干意见》《国务院办公厅关于科学绿化的指导意见》《关于全面推行林长制的意见》等政策文件在工作原则部分均提出要坚持尊重自然、保护优先，遵循顺应生态系统演替规律和内在机理，维护自然生态系统的安全稳定。中共中央、国务院印发的《关于深入打好污染防治攻坚战的意见》提出到2025年实现生态系统质量和稳定性持续提升，生态环境治理体系更加完善，生态文明建设实现新进步的主要目标。中共中央办公厅、国务院办公厅印发的《关于建立以国家公园为主体的自然保护地体系的指导意见》，通过建成中国特色的以国家公园为主体的自然保护地体系，推动各类自然保护地科学设置，建立自然生态系统保护的新体制新机制新模式，建设健康稳定高效的自然生态系统。2021年国务院发布的《中国生物多样性保护》白皮书则总结提炼了中国生物多样性保护的实践和经验，其中提到加大生态保护修复力度，提升生态系统质量和稳定性，对维护国家生态安全具有基础性、战略性作用，并指出我国以恢复退化生态系统、增强生态系统稳定性和提升生态系统质量为目标，持续开展多项生态保护修复工程，有效改善和恢复了重点区域野生动植物生境。

农业农村现代化建设、草原保护修复、长江水生生物保护、新型城镇化建设及黄河流域

生态保护等专项规划均结合其规划内容对提升生态系统稳定性提出了具体要求和工作部署，将维护和提升生态系统稳定性作为相关规划实施的落脚点。国务院印发的《“十四五”推进农业农村现代化规划》中提出要加强农村生态文明建设，建设绿色美丽乡村，以绿色发展引领乡村振兴，推进农村生产生活方式绿色低碳转型，实现资源利用更加高效、产地环境更加清洁、生态系统更加稳定，促进人与自然和谐共生。国务院办公厅印发的《关于加强草原保护修复的若干意见》中提出统筹推进林草生态治理，在干旱半干旱地区，坚持以水定绿，采取以草灌为主、林草结合方式恢复植被，增强生态系统稳定性。国务院办公厅印发的《关于加强长江水生生物保护工作的意见》提出在重要水生生物产卵场、索饵场、越冬场和洄游通道等关键生境实施一批重要生态系统保护和修复重大工程，构建生态廊道和生物多样性保护网络，优化生态安全屏障体系，消除已有不利影响，恢复原有生态功能，提升生态系统质量和稳定性，确保生态安全。国家发展改革委印发的《“十四五”新型城镇化实施方案》中提出加强生态修复和环境保护，坚持山水林田湖草沙一体化保护和系统治理，落实生态保护红线、环境质量底线、资源利用上线和生态环境准入清单要求，提升生态系统质量和稳定性。在生态环境部等四部门联合印发的《黄河流域生态环境保护规划》中，提出要完善流域水生生态保护格局，建设黄河流域清水廊道，提升生态系统稳定性，同时坚持山水林田湖草沙系统保护和修复，构建黄河流域生态保护格局，修复重要生态系统，治理生态脆弱区域，强化生态保护监管，提升生态系统质量和稳定性。全国绿化委员会、国家林业和草原局印发的《关于积极推进大规模国土绿化行动的意见》中提出要加快建设国家森林城市和森林城市群，稳步增加人均绿地面积，着力提升城市绿地总量，构建稳定的城市森林生态系统，并要求切实转变森林经营利用方式，推动采伐利用由轮伐、皆伐等向渐伐、择伐等转变，确保森林恒绿覆盖，提升森林生态系统的质量和稳定性。

提升生态系统质量和稳定性，需要以强有力的监管为保障。在生态环境部印发的《“十四五”生态保护监管规划》中，提出加强生态保护监管是提升生态系统质量和稳定性、守住自然生态安全边界、促进人与自然和谐共生的重要基础和保障，也是推进生态环境治理体系和治理能力现代化的重要任务，基于我国局部区域生态系统质量不高、稳定性弱等问题突出的现状，提出要推进重点区域生态系统格局、生态功能、生态系统质量和稳定性变化情况监测，同时加强生态保护监管平台的生态监测评估业务应用，完善森林、灌丛、草地、湿地和海洋等生态系统质量及变化监测、生态系统稳定性评估等功能，以达到提升生态系统质量和稳定性的主要目标。

（3）已有相关标准规范

近年来我国围绕生态环境状况、生态保护红线监管等开展了相关的国家标准、行业标准的研究和制定，其中部分标准中将生态系统稳定性作为评判相关生态指标等级水平的重要内容。2015年3月，生态环境部印发实施的《生态环境状况评价技术规范》（HJ 192—2015）规定了生态环境状况评价指标体系和各指标计算方法，用于评价我国县域、省域和生态区的生态环境状况及变化趋势。该标准通过利用生物丰度指数、植被覆盖指数、水网密度指数、土地胁迫指数、污染负荷指数五个分指数和一个环境限制指数等指标构建的生态环境状况指数（EI）来反映区域生态环境的整体状态。根据生态环境指数与基准值的变化情况，该标准将生态环境质量变化幅度分为了无明显变化、略有变化、明显变化和显著变化四个等级。如

果生态环境状况呈现波动变化的特征，则该区域生态环境敏感，根据生态环境质量波动变化幅度将生态环境变化状况分为了稳定、波动、较大波动和剧烈波动四个等级（见表6）。

表6 生态环境状况变化度及波动变化分级

变化值	$\Delta EI < 1$	$1 \leq \Delta EI < 3$	$3 \leq \Delta EI < 8$	$\Delta EI \geq 8$
EI 变化度分级	无明显变化	略微变化	明显变化	显著变化
描述	生态环境质量无明显变化。	如果 $1 \leq \Delta EI < 3$ ，则生态环境质量略微变好；如果 $-1 \geq \Delta E > -3$ ，则生态环境质量略微变差。	如果 $3 \leq \Delta EI < 8$ ，则生态环境质量明显变好；如果 $-3 \geq \Delta E > -8$ ，则生态环境质量明显变差；如果生态环境状况类型发生改变，则生态环境质量明显变化。	如果 $\Delta EI \geq 8$ ，则生态环境质量显著变好；如果 $\Delta EI \leq -8$ ，则生态环境质量显著变差。
EI 波动变化分级	稳定	波动	较大波动	剧烈波动
描述	生态环境质量状况稳定。	如果 $\Delta EI \geq 1$ ，并且 ΔEI 在 3 和 -3 之间波动变化，则生态环境状况呈现波动特征。	如果 $\Delta EI \geq 3$ ，并且 ΔEI 在 8 和 -8 之间波动变化，则生态环境状况呈现较大波动特征。	如果 $\Delta EI \geq 8$ ，并且 ΔEI 变化呈现正负波动特征，则生态环境状况呈现剧烈波动。

为贯彻落实《中华人民共和国环境保护法》《关于划定并严守生态保护红线的若干意见》，严守生态保护红线，维护国家生态安全，指导和规范生态保护红线监管工作，生态环境部于2020年印发了《生态保护红线监管技术规范 基础调查（试行）》等7项国家环境保护标准。其中《生态保护红线监管技术规范 生态状况监测（试行）》（HJ 1141—2020）给出了生态环境敏感脆弱区的定义，即生态系统稳定性差，容易受到外界活动影响而产生生态退化且难以自我修复的区域，包括土地沙化、水土流失、石漠化等敏感脆弱类型；《生态保护红线监管技术规范 保护成效评估（试行）》（HJ 1143—2020）则按照“面积不减少、性质不改变、功能不降低”和严格监督管理的要求，通过构建评价指标体系，采用定性定量相结合的方式评估县级及以上行政区生态保护红线成效，该标准基于保护面积指数、用地性质指数、生态功能指数、管理能力指数、特色指标指数和生态破坏与环境污染事件扣减分值，通过综合指数法计算生态保护红线保护成效指数（EPEI）。根据EPEI计算结果，以64分上下浮动4分作为分界值，将EPEI分为下降、稳定和好转3个等级（表7），反映生态保护红线保护成效情况。

表7 生态保护红线保护成效分析

状态	分值范围	分级	含义
下降	$0 \leq EPEI < 60$	$0 \leq EPEI < 40$	严重下降
		$40 \leq EPEI < 50$	中度下降
		$50 \leq EPEI < 60$	轻度下降
			表明生态保护红线内保护成效处于下降状态，或增量上生态保护小于生态退化。

状态	分值范围		分级	含义
稳定	$60 \leq EPEI \leq 68$	$60 \leq EPEI \leq 68$	维持稳定	表明生态保护红线内保护成效处于相对稳定状态，或处于生态保护与生态退化均衡对峙期。
好转	$68 < EPEI \leq 100$	$68 < EPEI \leq 80$	轻度好转	表明生态保护红线内保护成效处于好转状态，或增量上生态保护大于生态退化。
		$80 < EPEI \leq 90$	中度好转	
		$90 < EPEI \leq 100$	显著好转	

2021年11月15日生态环境部印发的《自然保护区生态环境保护成效评估标准（试行）》（HJ 1203—2021）规定了自然保护区生态环境保护成效评估的原则、周期、方法、流程、指标体系、评分标准。自然保护区生态环境状况采用定量评估与定性评估相结合的方法，通过主要保护对象变化、生态系统结构变化、生态系统服务变化、水环境质量变化、主要威胁因素变化和违法违规情况等六类指标评分值加和得到的生态环境变化评分（EC）用于自然保护区生态环境变化评估，根据计算结果，将生态环境变化分为了明显变好、变好、稳定、变差和明显变差共五个等级，其中稳定等级的EC值取值区间为50至65。

2022年生态环境部印发实施的《环境影响评价技术导则 生态影响》（HJ 19—2022）规定了生态影响评价的一般性原则、工作程序、内容、方法及技术要求，在工程分析的基础上筛选评价因子识别生态影响。该标准根据受影响对象（物种、生境、生物群落等）的不同给出了对应可考虑的评价因子及其影响性质和影响程度，其中生态影响因子的影响程度被分为了强、中、弱、无四个等级，并从生境破坏程度、水系连通度、生物多样性不同的角度给出了相应的判断原则，其中“强”指生物多样性显著下降，生态系统结构和功能受到严重损害，生态系统稳定性难以维持；“中”指生物多样性有所下降，生态系统结构和功能受到一定程度破坏，生态系统稳定性受到一定程度干扰；“弱”指生物多样性、生态系统结构、功能以及生态系统稳定性基本维持现状；“无”指生物多样性、生态系统结构、功能以及生态系统稳定性维持现状。

（4）相似定义辨析

在现有标准规范文件中，生态环境敏感性是与生态系统稳定性较为相似的概念，在2017年原环境保护部、国家发展改革委印发的《生态保护红线划定指南》中，将生态保护红线定义为“在生态空间范围内具有特殊重要生态功能、必须强制性严格保护的区域，是保障和维护国家生态安全的底线和生命线，通常包括具有重要水源涵养、生物多样性维护、水土保持、防风固沙、海岸生态稳定等功能的生态功能重要区域，以及水土流失、土地沙化、石漠化、盐渍化等生态环境敏感脆弱区域”，其中“生态环境敏感脆弱区”则被定义为是指生态系统稳定性差，容易受到外界活动影响而产生生态退化且难以自我修复的区域，生态系统稳定性是生态环境敏感脆弱区的重要衡量标准。可以看出，生态环境敏感脆弱性与生态系统稳定性的概念极为相似，是人们针对同一内容从不同方向给予生态系统的定义或属性。但由于当时国内尚无关于生态系统稳定性的标准规范文件支撑，可能存在定义交叉、使用混乱的情况。从定义和决定因素上来看，生态系统稳定性主要指面对内部和外部压力或胁迫作用后，生态系统维持结构和功能的能力，其主要与区域生物多样性呈正相关关系，是衡量生态系统的正

向指标；生态环境敏感脆弱性是指生态系统对外部干扰的敏感程度，是自然因素和人为因素共同造成的结果，是衡量生态系统的负向指标。即生态系统稳定性更加强调生态系统自身保持和恢复原有水平的能力（抵抗力与恢复力），是生态系统在受到干扰后恢复自身结构和功能稳定的能力，是能够体现生态系统动态特征的静态属性；而生态环境敏感脆弱性则强调生态系统对外部压力的敏感程度，它是生态系统自身属性在外界干扰后的具体表现（张学玲等，2018）。

综上所述可以看出，已经发布实施的相关标准规范主要通过生态系统是否稳定对相关指标评级进行描述，目前缺乏统一的生态系统稳定性评价方法和分级的技术标准，而如何定义和评价生态系统稳定性尚无定论，因此建立生态系统稳定性评价标准是迫切需要解决的科学问题。目前生态系统稳定性评价关键标准技术的缺失导致已有的相关评价标准结果定义模糊，也难以满足我国新时期推动绿色发展、促进人与自然和谐共生、开展系统生态保护修复的战略要求。

4 基本原则和技术路线

4.1 制定目的

2021年，中共中央、国务院印发《国家标准化发展纲要》，提出持续优化生态系统建设和保护标准；同年生态环境部印发《关于加强生态保护监管工作的意见》，提出要“守住自然生态安全边界，持续提升生态系统质量和稳定性，生态安全屏障更加牢固，生态文明建设实现新进步”。生态环境部具有组织拟订生态环境标准、制定生态环境基准和技术规范的重要职责，针对当前生态领域缺少生态系统稳定性评价标准规范文件的现状，生态环境部组织编制《区域生态系统稳定性评价技术指南》，为区域生态系统稳定性评价提供统一的评价方法和分级标准，用以弥补生态领域中生态系统稳定性评价标准的缺失，并为相关法律法规中关于提升生态系统稳定性的相关条例及其应用提供方法支撑，使“提升生态系统稳定性”的相关要求和目标的落实有据可依；同时满足“提升生态系统多样性、稳定性、持续性”的管理需求，为新时期生态保护监管工作提供重要支撑。

4.2 基本原则

本技术标准的制定符合以下原则：

（1）科学性原则

以管理需求为导向，以准确评价生态系统稳定性为目标，遵循生态系统生态学的基本原理，在对评价主体充分认识的基础上，深入分析生态系统的尺度特征、类型特征，科学确定生态系统稳定性评价内容和指标体系，客观反映生态系统稳定性水平。同时，所选评价指标必须具有可查性、可比性和定量性，能够完整地反映和描述生态系统稳定性所处的现状。

（2）可行性原则

一是所选取的指标应与现有的管理制度相一致；二是评价指标的数据能够通过现有的监测、统计或其它手段采集或获取；三是指标体系简明，指标目的明确，定义准确，同时能够代表和反映生态系统的本质特征；四是指标体系可操作性强，便于推广应用。通过该评价标准能够以可获取的真实数据为依据，客观公平地对生态系统稳定性进行评价和量化。

(3) 规范性原则

在综合考虑生态系统结构和功能与评价目标的基础上,明确生态系统稳定性评价技术流程,对评估内容、评估方法、数据来源、成果产出等统一标准,确保评价过程的规范性和评价结果的准确性。确保在统一的评价标准基础上,不同地区不同时相在同一空间尺度下的评价结果具有可比性,以便对生态系统稳定性现状和未来变化趋势进行对比分析。

4.3 技术路线

本标准文件的总体框架设计以及主要内容编制的技术路线如图1所示。

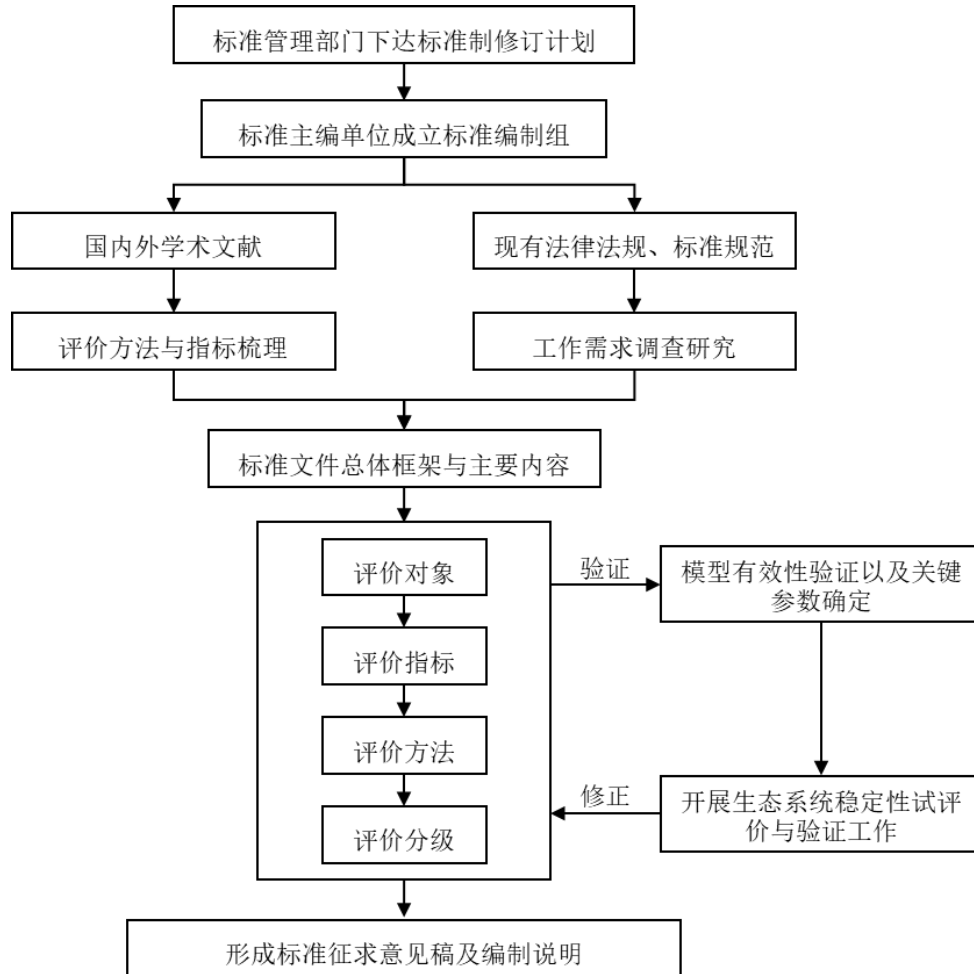


图1 区域生态系统稳定性评价技术指南制定技术路线

5 主要技术内容及确定依据

5.1 适用范围

本标准规定了区域生态系统稳定性评价的技术流程、评价指标、评价方法、稳定性分级等主要内容。针对本标准文件的适用范围,考虑到县级行政单元是我国行政管理、经济发展和社会治理的基础单元,且生态环境部印发实施的《区域生态质量评价办法(试行)》等同类型的标准规范文件均以县级行政区域作为评价基本单元,因此本标准主要适用于以县级及以上行政区域作为基本单元的区域陆域生态系统稳定性评价,其他一定地理空间范围内的陆

域生态系统稳定性评价可参照执行。

5.2 标准结构框架

《区域生态系统稳定性评价技术指南（征求意见稿）》主要内容包括适用范围、规范性引用文件、术语和定义、评价原则、评价流程、评价指标体系、计算方法和分级、成果形式、附录等9个部分。

（1）适用范围

规定了本标准的适用范围。

（2）规范性引用文件

明确了区域生态系统稳定性评价以及标准制定所依据的已有标准、技术规范等规范性文件。

（3）术语和定义

明确了本标准中涉及的相关术语定义，包括生态系统稳定性以及土壤养分指数、生物丰度指数、净初级生产力、归一化植被指数、叶面积指数等区域生态系统稳定性评价所使用的关键指标。

（4）评价原则

明确了区域生态系统稳定性评价的基本原则。

（5）评价流程

明确了区域生态系统稳定性评价的技术流程，包括分析区域特征、明确评价时间、准备与处理数据资料、计算区域生态系统稳定性指数、划分区域生态系统稳定性等级、编写评价报告等环节。

（6）评价指标体系

明确了区域生态系统稳定性评价的评价指标及其内涵。

（7）计算方法和分级

明确了区域生态系统稳定性评价的指标权重、计算过程、分级标准及等级描述。

（8）成果形式

明确了区域生态系统稳定性评价工作的频次以及评价成果的主要组织形式。

（9）附录

明确了区域生态系统稳定性评价中评价指标的含义、计算方法及数据来源和评价报告编写提纲，其中附录A为规范性附录，附录B为资料性附录。

5.3 规范性引用文件

本标准引用了下列文件或其中的条款。凡是注明日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本标准。凡是未注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本标准。

（1）《遥感影像平面图制作规范》（GB/T 15968）

（2）《植被生态质量气象评价指数》（GB/T 34815）

（3）《土壤环境监测技术规范》（HJ/T 166）

（4）《土壤 总磷的测定 碱熔-钼锑抗分光光度法》（HJ 632）

（5）《土壤质量 全氮的测定 凯氏法》（HJ 717）

（6）《全国生态状况调查评估技术规范——森林生态系统野外观测》（HJ 1167）

- (7) 《全国生态状况调查评估技术规范——草地生态系统野外观测》（HJ 1168）
- (8) 《全国生态状况调查评估技术规范——湿地生态系统野外观测》（HJ 1169）
- (9) 《全国生态状况调查评估技术规范——荒漠生态系统野外观测》（HJ 1170）
- (10) 《全国生态状况调查评估技术规范——生态系统质量评估》（HJ 1172）
- (11) 《土壤全钾测定法》（NY/T 87）
- (12) 《土壤检测 第6部分：土壤有机质的测定》（NY/T 1121.6）

5.4 术语和定义

术语定义来源于已有标准规范文件以及专业著作中关于相关术语的定义。

(1) 生态系统稳定性 ecosystem stability

本标准中的生态系统稳定性定义，参照2007年全国科学技术名词审定委员会编著、科学出版社出版的《生态学名词》和学术界对生态系统稳定性的经典定义及其内涵，主要指生态系统在受到外界干扰后保持或恢复自身结构和功能相对稳定的能力。

(2) 土壤养分指数 soil nutrition index, SNI

本标准中的土壤养分指数定义，参照1998年土壤学名词审定委员会编著、科学出版社出版的《土壤学名词（第二版）》以及2016年全国科学技术名词审定委员会编著、科学出版社出版的《林学名词（第二版）》中相关内容，主要是指土壤环境中提供植物生长发育所需物质和营养的元素含量。

(3) 生物丰度指数 biological richness index, BRI

本标准中的生物丰度指数定义，参照生态环境部印发的《生态环境状况评价技术规范（试行）》（HJ/T 192）中相关内容，主要是指单位面积上不同生态系统类型在生物物种数量上的差异。

(4) 净初级生产力 net primary productivity, NPP

本标准中的净初级生产力定义，参照2006年全国科学技术名词审定委员会编著、科学出版社出版的《地理学名词（第二版）》《生态学名词（2006）》以及中国气象局印发的《陆地植被气象与生态质量监测评价等级》（QX/T 494—2019）中相关内容，主要是指在单位时间和单位面积上，绿色植物通过光合作用所固定的有机质总量扣除自养呼吸后的剩余部分。

(5) 归一化植被指数 normalized difference vegetation index, NDVI

本标准中的归一化植被指数定义，参照2006年全国科学技术名词审定委员会编著、科学出版社出版的《生态学名词（2006）》以及中国气象局印发的《生态气象术语》（QX/T 2013）中相关内容，主要是指地物在近红外波段和红光波段反射率的差异。

(6) 叶面积指数 leaf area index, LAI

本标准中的叶面积指数定义，参照中国气象局印发的《生态气象术语》（QX/T 2013）、生态环境部印发的《全国生态状况调查评估技术规范——生态系统质量评估》（HJ 1172）以及2019年全国科学技术名词审定委员会编著、科学出版社出版的《植物学名词（第二版）》中相关内容，主要是指单位土地面积上植物叶片总面积与土地面积的比值。

5.5 评价原则

本标准规定的内容遵循科学性、可行性和规范性原则。

(1) 科学性原则

从生态系统的整体性出发,以准确评价生态系统稳定性为目标,建立具有科学性的生态系统稳定性评价技术指南,通过定量评估与定性判定相结合的方法开展评价,客观反映区域生态系统稳定性水平。

(2) 可行性原则

与现有国家标准和行业标准规范充分衔接,评价指标的数据能够通过遥感解译、生态系统长期监测或其它手段采集获取,计算方法容易实现,评价结果可量化,评价方法具备技术可行性和推广应用价值。

(3) 规范性原则

明确区域生态系统稳定性评价技术流程,对评价内容、评价方法、评价指标、数据来源、成果产出等统一标准,确保评价过程的规范性,使得不同地区不同时相的生态系统稳定性评价结果具有可比性。

5.6 评价流程

本标准规定了区域生态系统稳定性评价的评价流程,包括分析区域特征、明确评价时间、准备与处理数据资料、区域生态系统稳定性评价、编写评价报告等环节。其中,分析区域特征与明确评价时间主要是在开展生态系统稳定性评价前,明确评价对象并进行区域特征分析,同时明确生态系统稳定性评价的时间。准备与处理数据资料主要是针对评价区域,结合本评价技术指南所提出的指标体系,开展遥感监测、地面监测、统计数据等相关基础资料数据的收集、处理和计算工作。区域生态系统稳定性评价主要是根据评价指标的计算方法和评价数据,对各项指标以及生态系统稳定性指数进行定量计算,并根据结果进行分级。编写评价报告主要是结合区域生态系统稳定性评价结果,编制《区域生态系统稳定性评价报告》。

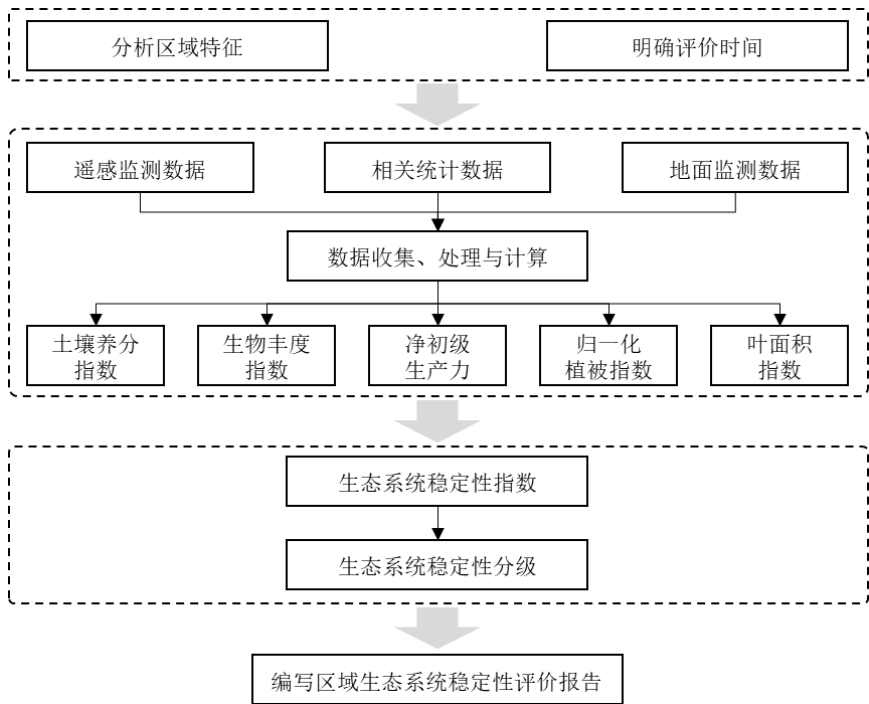


图2 区域生态系统稳定性评价总体技术流程图

5.7 算法和指标说明

(1) 生态系统稳定性评价指标选择与计算

相较于传统的人工地面调查和抽样调查,遥感技术可以实现大空间范围的监测和数据采集,能够确保监测信息和指标数据在时间上具有连续性,具有监测范围广、速度快、成本低,且便于进行长期动态监测等优点。因此本标准文件在指标体系构建过程中,尽可能在已有标准规范文件的基础上,选择可以通过遥感技术或地理信息技术获取的指标;同时本标准虽规定了适用范围为以县级及以上行政区域作为基本单元的区域陆域生态系统稳定性评价,但针对各项评价指标也提供了基于地面采样调查的数据获取方法,保证即使在较小空间评价尺度上,在缺乏高空间分辨率遥感数据支撑的情况下,也能够通过采样调查等方式获取评价指标数据,进而开展区域生态系统稳定性评价工作。

国内外相关研究表明,生态系统稳定性是生态系统内部特征决定的生态系统固有属性,气温、降水等环境因素以及人类活动是能够引起生态系统稳定性变化的驱动因素而非决定因素,生物多样性才是生态系统稳定性主要决定因素,相关研究多采用生物多样性(地上)、植被生产力等相关指标来解释生态系统稳定性,自然因素和人类活动可以通过影响生态系统内部特征而使生态系统稳定性发生改变,是区域生态系统稳定性水平的具体体现,因此在本标准文件中未将驱动因素作为区域生态系统稳定性评价的考虑因素。同时,多数研究只关注地上生物多样性(如植物多样性),忽视了地下生物多样性对生态系统稳定性的潜在重要作用,相关研究表明地下生物多样性可以通过植物多样性和土壤肥力直接或间接影响生态系统稳定性。因此在指标选取过程中考虑选择与生物多样性(地上与地下)与植被生产力相关的评价指标,本标准文件选取了土壤养分指数、生物丰度指数、净初级生产力、归一化植被指数和叶面积指数共五个具体评价指标。

1) 土壤养分指数

地下生物多样性或土壤动物群能够显著提高土壤肥力,可以通过土壤肥力和植物多样性等直接或间接途径影响生态系统稳定性(Chen et al., 2021),但地下生物多样性数据通常难以获取,而土壤有机质和氮(N)、磷(P)、钾(K)等养分能够为生物提供生长条件,可以直接影响植被的生长发育(张子琦等, 2022),是能够体现和反映土壤肥力的重要理化性质,其中土壤有机质是土壤的关键组成部分,对各种土壤过程起到启动和调节作用(潘根兴等, 2019); N是调节陆地生态系统生产量、结构和功能的关键元素(Agren G I, 2008); P是植物生长发育的必需元素(尹逊霄等, 2005); K是与植物体新陈代谢有关的重要元素(Venterink et al., 2001)。

因此本标准文件参考Zhu等(2023)研究成果,通过选择土壤有机质(SOM)、总磷(TP)、总氮(TN)、总钾(TK)等关键因子构建土壤养分指数表征土壤肥力,计算方法如下:

$$SNI = \frac{SOM + TN + TP + TK}{4}$$

式中, SNI——土壤养分指数;

SOM——土壤中的有机质含量;

TN——土壤中的总氮含量;

TP——土壤中的总磷含量;

TK——土壤中的总钾含量。

各计算参数可通过野外观测、土壤采样获取，样点布设、样本采集、样本处理方法可参照《土壤环境监测技术规范》（HJ/T 166），有机质、总氮、总磷和总钾含量测定可分别参照NY/T 1121.6、HJ 717、HJ 632和NY/T 87相关要求执行。由于在区域尺度上该指标值计算参数采样调查较为困难，难以满足长时间连续的评价需求，且指标值年际间较难发生显著变化，因此该指标值可采用遥感数据代替。根据《土壤环境监测技术规范》（HJ/T 166），一般监测采样表层土，采样深度为0~20cm，同时《中国土壤有机质数据集》（Dataset of soil properties for land surface modeling over China）提供了包括pH等在内的21个8层土壤性质数据，深度为2.3m（即0~0.045、0.045~0.091、0.091~0.166、0.166~0.289、0.289~0.493、0.493~0.829、0.829~1.383和1.383~2.296m）。因此各项计算参数建议采用《中国土壤有机质数据集》中的表层土相关数据进行计算，空间分辨率1000m，采样深度参考上述标准文件选取为0~28.9cm。

2) 生物丰度指数

生物多样性是生态系统稳定性的主要决定因素，为规范生物多样性调查与评估工作，我国先后制定了一系列相关标准规范文件。如在2011年，为指导和规范生物多样性调查工作，原环境保护部以《全国生物物种资源调查技术规定（试行）》（2010年第27号公告）为基础，制定发布了《县域生物多样性调查与评估技术规定》（2017年第84号公告），包括12项针对不同物种多样性调查与技术评估的标准文件；2012年，为规范生物多样性评价指标和方法，掌握并了解全国和各地生物多样性的现状、空间分布及变化趋势，明确全国和各地生物多样性保护重点，整体上提高我国生物多样性保护的管理能力，原环境保护部制定了《区域生物多样性评价标准》（HJ 623—2011）。为加强生物多样性保护和生物安全管理，生态环境部组织编制了《生物多样性（陆域生态系统）遥感调查技术指南》等八项生物多样性相关的国家生态环境标准。

而相关标准规范文件中多采用实地调查的方法对区域生物多样性进行评价，且MARXAN、MaxEnt等已经被广泛用于生物多样性热点及有限保护区域识别的模型多基于小尺度上物种调查数据和环境变量进行评估（马琪等，2021），但考虑到生物多样性调查工作成本较高、难度较大，多数地区生物多样性调查工作频次较低，甚至部分地区尚未开展相关工作，因此关于生物多样性的调查类指标难以满足本标准文件在大空间尺度、连续时间序列上的评价需求。为保证本标准文件中生态系统稳定性评价方法的可操作性，本标准文件用生物丰度指数作为衡量区域生物多样性的评价指标，计算方法如下：

$$BRI = A_{bio} \times \frac{0.35 \times A_F + 0.21 \times A_G + 0.28 \times A_W + 0.11 \times A_C + 0.04 \times A_S + 0.01 \times A_U}{A}$$

式中，BRI——生物丰度指数；

A_{bio} ——生境质量指数的归一化指数，参考值为 511.2642131067；

A_F ——评价单元内的林地面积；

A_G ——评价单元内的草地面积；

A_W ——评价单元内的水域湿地面积；

A_C ——评价单元内的耕地面积；

A_S ——评价单元内的建设用地面积；

A_U ——评价单元内的未利用地面积；

A ——评价单元总面积。

3) 净初级生产力

净初级生产力作为衡量生态系统支持能力的重要指标，也是生态系统能量的来源。通过该评价指标，可以了解生态系统的生产能力以及能量流动情况，进而评价生态系统的健康状况和可持续性，同时生产力也是生态系统稳定性评价实证研究中最常用的评价指标。根据多样性-稳定性假说，复杂多样的植物群落能够利用更多的有限资源，进而提高整个生态系统的生产力；同时长期的研究表明，生产力是受生物多样性影响的重要生态系统功能特征（王长庭等，2005），随着物种多样性的上升，群落生产力同时呈现逐渐上升的变化趋势。本标准文件选取净初级生产力作为衡量区域生产力的评价指标，其主要指在单位时间和单位面积上，绿色植物通过光合作用所固定的有机质总量扣除自养呼吸后的剩余部分，表征地表植被对区域生物生长繁殖的支撑能力，可以作为反映区域生态系统稳定性的替代指标。净初级生产力可通过遥感监测或地面监测手段获取相关数据并通过模型估算，计算方法参照《植被生态质量气象评价指数》（GB/T 34815）中附录B。

4) 归一化植被指数

植物物种利用太阳的能量通过光合作用固定碳，同时植被在其生长发育过程中又通过凋落物的归还以及根系的分泌等方式反过来影响土壤的理化性质，这一重要的生物过程为无数动物消费者提供了食物链的基础。而归一化植被指数作为应用最为广泛的表征植被状况的植被指数，能够反映区域地表植被覆盖情况、生长状况和生物量水平，可以用于衡量区域生态平衡。本标准文件选取归一化植被指数表征植被水平层面覆盖程度及其生长活力。归一化植被指数指近红外、红光两个波段的反射率之差除以二者之和，计算方式如下：

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}}$$

式中， $NDVI$ ——归一化植被指数；

ρ_{NIR} ——遥感影像近红外波段反射率；

ρ_{RED} ——遥感影像红光波段反射率。

5) 叶面积指数

叶片是植被进行光合作用与外界进行水汽交换的主要器官，叶片面积的大小及其分布直接决定地表植被光合作用强度和生产能力（王希群等，2005），而叶面积指数自上世纪40年代由英国农业生态学家Waston（1947）提出后，已在农业、林业、生物学以及生态学领域得到广泛应用，其可以用来定量描述群落水平上叶子的生长和叶子密度的变化。叶面积指数作为衡量生态系统与大气进行能量和物质交换能力的重要参数，控制着光合作用、呼吸作用、蒸腾作用、碳循环以及雨水拦截等植被生物物理过程（Chen et al., 1996），在大气与植被之间能量、动量和物质交换中发挥着重要作用，可以通过影响冠层的能量、水分平衡和碳光合固定决定植被的净初级生产力和生态系统的整体功能（黄玫等，2010），能够为植被冠层表面最初能量交换提供结构化定量信息。同时相关研究表明，在多种植物共存的情况下，不同树种通过占据不同的树冠空间，最大限度地利用光照和其他资源，减少了物种间的竞争，从而减少了死亡率并增加了总体生产力（Tatsumi et al., 2023）。因此考虑到叶片作为地表植被物质生产和能量转化的基础以及叶面积指数对地表植被生产力的决定作用（王希群等，2005），本标准文件通过该指标反映地表植被质量和垂直结构的复杂性，间接表征对区域生态系统结构和功能的稳定作用。

叶面积指数被定义为单位地表面积上单面植物光合作用面积的总和（Waston, 1947），通常可以通过地面测量或遥感定量反演的方式（方秀琴等, 2003；吴伟斌等, 2007；刘洋等, 2013），利用地物光谱特征通过叶面积指数测量仪器或者遥感影像，对叶面积指数进行直接或间接的测量。根据我国已有的标准规范文件，指数值可以通过遥感监测或者样方调查等方式获取。采用遥感监测手段获取时，计算方法可参照HJ 1172。采用样方调查方法时，统计单位土地面积上植物叶片总面积与土地面积的比值，样地选择、样方布置和观测方法可参照HJ 1167、HJ 1168、HJ 1169、HJ 1170相关要求执行。

（2）生态系统稳定性评价指标权重确定

相关标准文件中通常采用专家打分法，即由少数专家直接根据经验，从主观角度出发人为定义指标权重。但专家打分法依赖于专家的主观判断和经验，可能存在不同专家之间的主观差异，导致权重分配不一致，结果受专家主观因素影响，同时不适应数据的多样性。由于生态系统稳定性机制复杂，根据专家的经验和专业知识的评估指标的权重可能难以准确反映评价指标间重要程度的差别。而相较于专家打分法，熵权法不依赖专家主观判断，可以基于数据本身的信息熵计算权重，更好地反映不同评价指标间的差异，减少人为主观偏见的影响。

本标准文件在统计2000-2020年全国县级行政单元各指标参数数据的基础上，利用熵权法计算各年度各评价指标的权重，然后利用多年权重的平均值作为各评价指标权重，结果如表8所示。经计算，SNI、BRI、NPP、NDVI与LAI指标权重分别赋值为0.18、0.18、0.27、0.07和0.30。

表8 区域生态系统稳定性评价指标权重表

年份	SNI	BRI	NPP	NDVI	LAI
2000年	16.06%	16.12%	30.27%	7.28%	30.28%
2001年	15.29%	15.31%	31.38%	7.14%	30.89%
2002年	16.76%	16.75%	29.77%	6.63%	30.08%
2003年	16.30%	16.30%	27.34%	6.42%	33.63%
2004年	17.48%	17.54%	25.40%	7.09%	32.48%
2005年	17.98%	18.06%	27.56%	7.42%	28.98%
2006年	17.43%	17.52%	27.82%	7.15%	30.08%
2007年	17.18%	17.32%	29.43%	6.75%	29.31%
2008年	17.96%	18.15%	26.75%	6.99%	30.15%
2009年	16.90%	17.12%	26.84%	7.07%	32.07%
2010年	18.10%	18.41%	26.39%	6.93%	30.18%
2011年	17.82%	18.23%	26.76%	6.73%	30.46%
2012年	18.96%	19.47%	24.96%	6.47%	30.13%
2013年	17.92%	18.40%	26.25%	6.18%	31.26%
2014年	17.95%	18.43%	25.16%	6.66%	31.80%

年份	SNI	BRI	NPP	NDVI	LAI
2015年	18.22%	18.73%	26.07%	7.12%	29.87%
2016年	18.74%	19.28%	24.56%	6.38%	31.03%
2017年	17.97%	18.52%	25.89%	6.01%	31.61%
2018年	18.62%	19.32%	24.55%	5.79%	31.72%
2019年	18.11%	18.89%	26.23%	5.94%	30.83%
2020年	19.14%	19.97%	24.75%	6.17%	29.97%
平均权重	17.66%	17.99%	26.86%	6.68%	30.80%

(3) 生态系统稳定性综合指数计算

本标准参考国内生态系统评价相关标准文件中的评价方法,采用综合指数法计算生态系统稳定性指数,进而通过生态系统稳定性指数大小综合反映区域生态系统稳定性水平,计算方法如下:

$$ESI_i = 0.18 \times SNI_i + 0.18 \times BRI_i + 0.27 \times NPP_i + 0.07 \times NDVI_i + 0.30 \times LAI_i$$

式中: ESI_i ——第*i*个评价单元的生态系统稳定性指数;

SNI_i ——第*i*个评价单元的土壤养分指数;

BRI_i ——第*i*个评价单元的生物丰度指数;

NPP_i ——第*i*个评价单元的净初级生产力;

$NDVI_i$ ——第*i*个评价单元的归一化植被指数;

LAI_i ——第*i*个评价单元的叶面积指数。

(4) 生态系统稳定性等级划分

通常由于缺少足够的统计数据支撑和有效数据验证,生态系统评价相关的标准文件中,多采用等间隔分类法,即基于相同的数据间隔划分目标指数等级区间。而相较于等间隔分类法,自然间断点分段法能够依据数据特征,将数据划分成自然的、有意义的区间,同时有助于避免将相似的数据分到不同的类别中,从而减少了信息的丢失,该方法能够适应不同类型的数据分布。

本标准文件编制组基于提出的生态系统稳定性评价技术方法,计算了全国县级行政单元2000-2020年共21个年份的生态系统稳定性指数(ESI)。根据全国县级行政单元ESI的多年平均值,利用自然间断点分段法将生态系统稳定性划分为5个等级(见表9),分别为低($ESI \leq 0.20$)、较低($0.20 < ESI \leq 0.25$)、一般($0.25 < ESI \leq 0.30$)、较高($0.30 < ESI \leq 0.40$)和高($ESI > 0.40$)。

$ESI \leq 0.20$,表明生态系统结构单一,生态系统功能低,抵抗外界干扰能力低,生态系统整体处于不稳定状态。

$0.20 < ESI \leq 0.25$,表明生态系统结构较单一,生态系统功能较低,抵抗外界干扰能力较低,生态系统整体处于较不稳定状态。

$0.25 < ESI \leq 0.30$,表明生态系统结构较为简单,生态系统功能为中等水平,抵抗外界干扰能力一般,生态系统整体处于相对稳定状态。

$0.30 < ESI \leq 0.40$,表明生态系统结构较为复杂,生态系统功能较高,抵抗外界干扰能力

较高，生态系统整体处于较稳定状态。

ESI>0.40，表明生态系统结构复杂，生态系统功能高，抵抗外界干扰能力高，生态系统整体处于稳定状态。

表9 生态系统稳定性分级

级别	高	较高	一般	较低	低
ESI	0.4<ESI≤1	0.3<ESI≤0.4	0.25<ESI≤0.3	0.20<ESI≤0.25	0<ESI≤0.20
描述	生态系统结构复杂，生态系统功能高，抵抗外界干扰能力高，生态系统整体处于稳定状态。	生态系统结构较为复杂，生态系统功能较高，抵抗外界干扰能力较高，生态系统整体处于较稳定状态。	生态系统结构较为简单，生态系统功能为中等水平，抵抗外界干扰能力一般，生态系统整体处于相对稳定状态。	生态系统结构较单一，生态系统功能较低，抵抗外界干扰能力较低，生态系统整体处于较不稳定状态。	生态系统结构单一，生态系统功能低，抵抗外界干扰能力低，生态系统整体处于不稳定状态。

6 实施本标准的管理措施、技术措施、实施方案建议

本标准首次建立了区域生态系统稳定性评价的技术指南，规定和明确了区域生态系统稳定性指标体系和评价方法，可有效评价县级及以上行政单元、国家重点生态功能区、自然保护区、生态保护红线以及生态保护和修复重大工程建设区域等一定地理空间范围内的陆域生态系统稳定性，可供生态环境保护等相关单位使用。

本标准由生态环境部自然生态保护司、法规与标准司组织制订，由中国环境科学研究院和生态环境部南京环境科学研究所起草，由生态环境部解释。本标准是生态环境部门关于区域生态系统稳定性评价的首个行业标准，是指南性文件，对推进实现区域生态系统稳定性准确评价及动态监管具有重要作用，建议尽快征求意见并发布实施，为未来区域生态系统稳定性的提升和长效监管提供科学依据。

7 实施本标准的环境效益及经济效益分析

目前，国际、国内尚无关于生态系统稳定性评价的同类标准，本标准文件参考了我国区域生物多样性评价、全国生态状况调查评估技术规范等生态系统评价相关的行业标准，引用了国内外相关文献资料中的相关方法，全面规范了我国区域生态系统稳定性评价的技术方法和分级标准，为生态环境保护等相关单位提供了可操作的生态系统稳定性评价的标准化方法，加大生态环境领域法规标准体系支撑力度，为加强生态保护监管工作提供重要保障。

8 主要参考文献

- [1] Ågren G I. Stoichiometry and nutrition of plant growth in natural communities[J]. Annual review of ecology, evolution, and systematics,2008,39:153-170.
- [2] Bai Y, Han X, Wu J, et al. Ecosystem stability and compensatory effects in the Inner Mongolia grassland[J]. Nature,2004,431:181-184.
- [3] Bardgett R D, van der Putten W H. Belowground biodiversity and ecosystem functioning[J]. Nature,2014,515:505-511.
- [4] Bradford M A, Jones T H, Bardgett R D, et al. Impacts of soil faunal community composition on model grassland ecosystems[J]. Science,2002,298:615-618.
- [5] Carroll O, Batzer E, Bharath S, et al. Nutrient identity modifies the destabilising effects of eutrophication in grasslands[J]. Ecology letters,2022,25(4):754-765.
- [6] Chen J M, Cihlar J. Retrieving leaf area index of boreal conifer forests using Landsat TM images[J]. Remote Sensing of Environment,1996,55:153-162.
- [7] Chen L, 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.
- [8] Cleland E E. Biodiversity and Ecosystem Stability[J]. Nature Education Knowledge,2011,3(10):14.
- [9] Craven D, Eisenhauer N, Pearse W D, et al. Multiple facets of biodiversity drive the diversity-stability relationship[J]. Nature Ecology & Evolution,2018,2:1579-1587.
- [10] De Deyn G B, Raaijmakers C E, Zoomer H R, et al. Soil invertebrate fauna enhances grassland succession and diversity[J]. Nature,2003,422:711-713.
- [11] Delgado-Baquerizo M, Reich P B, Trivedi C, et al. Multiple elements of soil biodiversity drive ecosystem functions across biomes[J]. Nature Ecology & Evolution,2020,4:210-220.
- [12] Elton C S. The Ecology of Invasions by Animals and Plants Chicago[M]. Chicago: University of Chicago Press, 1958.
- [13] Garcia-Palacios P, Gross N, Gaitan J, et al. Climate mediates the biodiversity-ecosystem stability relationship globally[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences USA,2018,115:8400-8405.
- [14] Gilbert B, MacDougall A S, Kadoya T, et al. Climate and local environment structure asynchrony and the stability of primary production in grasslands[J]. Global Ecology and Biogeography,2020,29:1177-1188.
- [15] Hautier Y, Tilman D, Isbell F, et al. Anthropogenic environmental changes affect ecosystem stability via biodiversity[J]. Science,2015,348:336-340.
- [16] Isbell F, Craven D, Connolly J, et al. Biodiversity increases the resistance of ecosystem productivity to climate extremes[J]. Nature,2015,526:574-577.
- [17] Ives A R, Carpenter S R. Stability and diversity of ecosystems[J]. Science,2007,317(5834):58-62.
- [18] Jing X, Sanders N J, Shi Y U, et al. The links between ecosystem multifunctionality and above- and belowground biodiversity are mediated by climate[J]. Nature Communications,2015,6:8159.
- [19] Jobbágy E G, Sala O E, Paruelo J M. Patterns and controls of primary production in the Patagonian steppe: a remote sensing approach[J]. Ecology,2002,83:307-319.

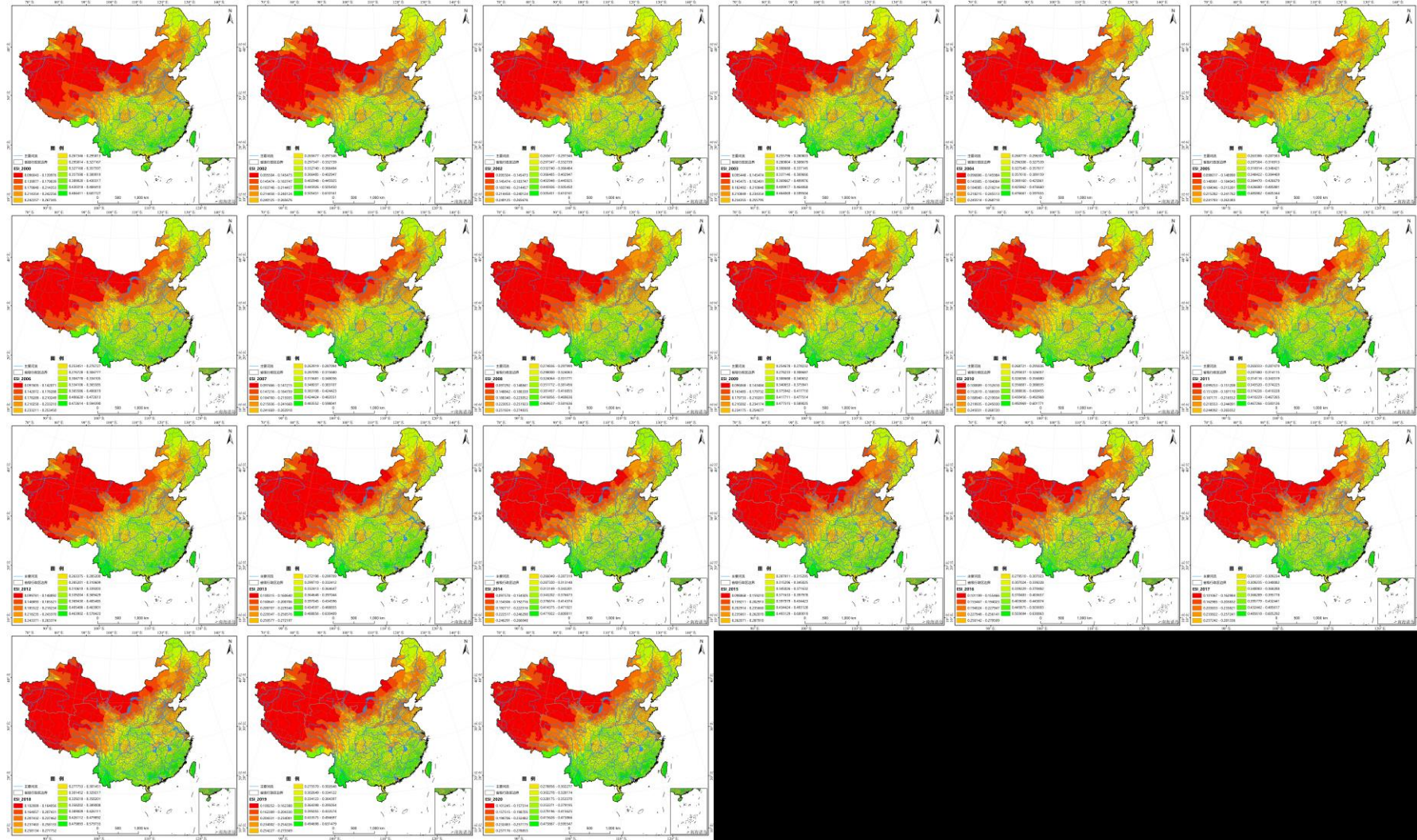
- [20] Liu S, Garc ía-Palacios P, Tedersoo L, et al. Phylotype diversity within soil fungal functional groups drives ecosystem stability[J]. *Nature Ecology & Evolution*,2022,6:900-909.
- [21] Liu Y, Wang X, Xin L, et al. Impact of Farmland Change on Vegetation NPP in the One River and Two Streams Region of Tibet[J]. *Land*,2022,11(12):2223.
- [22] MacArthur R. Fluctuations of animal populations and a measure of community stability[J]. *Ecology*,1955,36(3):533-536.
- [23] McGrady-Steed J, Harris P, Morin P. Biodiversity regulates ecosystem predictability[J]. *Nature*,1997,390:162-165.
- [24] Naeem S, Li S. Biodiversity enhances ecosystem reliability[J]. *Nature*,1997,390:507-509.
- [25] Niu D, Yuan X, Cease A, et al. The impact of nitrogen enrichment on grassland ecosystem stability depends on nitrogen addition level[J]. *Science of the Total Environment*,2018,618:1529-1538.
- [26] Odum E P. *Fundamentals of ecology*[M]. Philadelphia: WB Saunders company,1953.
- [27] Oehri J, Schmid B, Schaepman-Strub G, et al. Biodiversity promotes primary productivity and growing season lengthening at the landscape scale[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*,2017,114:10160-10165.
- [28] Olde Venterink H, van der Vliet R E, Wassen M J. Nutrient limitation along a productivity gradient in wet meadows[J]. *Plant and Soil*,2001,234:171-179.
- [29] Paruelo J, Epstein H E, Lauenroth W K, et al. ANPP estimates from NDVI for the central grassland region of the United States[J]. *Ecology*,1997,78:953-958.
- [30] Powell J R, Rillig M C. Biodiversity of arbuscular mycorrhizal fungi and ecosystem function[J]. *New Phytologist*,2018,220:1059-1075.
- [31] Tatsumi S, Loreau M. Partitioning the biodiversity effects on productivity into density and size components[J]. *Ecology Letters*,2023,26(11):1963-1973.
- [32] Tedersoo L, Bahram M, Zobel M. How mycorrhizal associations drive plant population and community biology[J]. *Science*,2020,367:eaba1223.
- [33] Teste F P, Kardol P, Turner B L, et al. Plant-soil feedback and the maintenance of diversity in Mediterranean-climate shrublands[J]. *Science*,2017,355:173-176.
- [34] Tilman D, Reich P, Knops J. Biodiversity and ecosystem stability in a decade-long grassland experiment[J]. *Nature*,2006,441:629-632.
- [35] van der Heijden M G A, Bardgett R D, van Straalen N M. The unseen majority: Soil microbes as drivers of plant diversity and productivity in terrestrial ecosystems[J]. *Ecology Letters*,2008,11:296-310.
- [36] van der Heijden M G A, Klironomos J N, Ursic M, et al. Mycorrhizal fungal diversity determines plant biodiversity, ecosystem variability and productivity[J]. *Nature*,1998,396:69-72.
- [37] Wagg C, Bender S F, Widmer F, et al. Soil biodiversity and soil community composition determine ecosystem multifunctionality[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*,2014a,111:5266-5270.
- [38] Wagg C, Schlaeppi K, Banerjee S, et al. Fungal-bacterial diversity and microbiome complexity predict ecosystem functioning[J]. *Nature Communications*,2019b,10:4841.
- [39] White H J, Gaul W, León - Sánchez L, et al. Ecosystem stability at the landscape scale is primarily associated with climatic history[J]. *Functional Ecology*,2022,36(3):622-634.
- [40] Wang S P, Loreau M. Ecosystem stability in space: α , β and γ variability[J]. *Ecology*

Letters,2014,17(8):891-901.

- [41] Wang Y F, Cadotte M W, Chen Y X, et al. Global evidence of positive biodiversity effects on spatial ecosystem stability in natural grasslands[J]. *Nature Communications*,2019,10:3207.
- [42] Wardle D A, Bonner K I, Barker G M. Stability of ecosystem properties in response to above-ground functional group richness and composition[J]. *Oikos*,2000,89:11-23.
- [43] Waston D J. Comparative physiological studies on the growth of field crops I. Variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years[J]. *Annals of Botany*,1947,11:41-76.
- [44] Wu L, Chen H, Chen D, et al. Soil biota diversity and plant diversity both contributed to ecosystem stability in grasslands[J]. *Ecology Letters*,2023,26(6):858-868.
- [45] Yang G W, Wagg C, Veresoglou S D, et al. How soil biota drive ecosystem stability[J]. *Trends in Plant Science*,2018,23:1057-1067.
- [46] Zhang M, Zhang L, He H, et al. Improvement of ecosystem quality in National key Ecological Function Zones in China during 2000–2015[J]. *Journal of Environmental Management*,2022,324:116406.
- [47] Zhang R, Zhang X, Yang J, et al. Wetland ecosystem stability evaluation by using Analytical Hierarchy Process (AHP) approach in Yinchuan Plain, China[J]. *Mathematical and Computer Modelling*,2013,57(3-4):366-374.
- [48] Zhu L, Chen Y, Sun R, et al. Resource-dependent biodiversity and potential multi-trophic interactions determine belowground functional trait stability[J]. *Microbiome*,2023,11:95.
- [49] 陈集景,周蕾,迟永刚.陆地生态系统稳定性空间格局及影响机制研究综述[J].*中国农业气象*,2021,42(7):552-560.
- [50] 方秀琴,张万昌.叶面积指数(LAI)的遥感定量方法综述[J].*国土资源遥感*,2003,15(3):58-62.
- [51] 冯海波.煤矿开采影响下草原生态系统稳定性及其生态地质学机制研究[D].武汉:中国地质大学,2021.
- [52] 高贝.氮素添加和刈割对草甸草原地上净初级生产力时间和空间稳定性的影响[D].沈阳:辽宁大学,2022.
- [53] 高江平.降水变化对黄土高原西部半干旱荒漠草原生态系统稳定性的影响研究[D].兰州:西北师范大学,2021.
- [54] 韩博平.生态系统稳定性:概念及其表征[J].*华南师范大学学报(自然科学版)*,1994(02):37-45.
- [55] 黄建辉,韩兴国.生物多样性和生态系统稳定性[J].*生物多样性*,1995,3(1):31-37.
- [56] 黄玫,季劲钧.中国区域植被叶面积指数时空分布——机理模型模拟与遥感反演的比较[J].*生态学报*,2010,30(11):3057-3064.
- [57] 康萨如拉,牛建明,张庆,等.羊草草原退化演替中的状态转变和可持续性[J].*生态学杂志*,2020,39(09):3147-3154.
- [58] 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.
- [59] 梁燕,葛忠强,马安宝,等.森林生态系统稳定性研究进展[J].*山西林业科技*,2018,47(04):32-34+60.
- [60] 廖玉静,宋长春,郭跃东,等.三江平原湿地生态系统稳定性评价指标体系和评价方法[J].*干旱区资源与环境*,2009,23(10):89-94.
- [61] 刘洋,刘荣高,陈镜明,等.叶面积指数遥感反演研究进展与展望[J].*地球信息科学学*

- 报,2013,15(05):734-743.
- [62] 刘增文,李雅素.生态系统稳定性研究的历史与现状[J].生态学杂志,1997(02):59-62.
- [63] 柳新伟,周厚诚,李萍,等.生态系统稳定性定义剖析[J].生态学报,2004,24(11):2635-2640.
- [64] 罗恒春,魏安超,张超.森林生态系统脆弱性评价概述[J].亚热带农业研究,2017,13(1):66-72.
- [65] 马琪,潘秋玲,涂纯.生物多样性维护功能评估及其空间尺度效应分析——以陕西省为例[J].自然资源学报,2021,36(8):1937-1948.
- [66] 莫莉.露天煤矿开采对典型草原土壤环境及生态系统稳定性的影响[D].呼和浩特:内蒙古大学,2019.
- [67] 潘根兴,丁元君,陈硕桐,等.从土壤腐殖质分组到分子有机质组学认识土壤有机质本质[J].地球科学进展,2019,34(5):451-470.
- [68] 宋文璐,张华.基于 CNKI 的森林生态系统稳定性研究现状与热点分析[J].林业科技通讯,2022,591(03):48-52.
- [69] 田鹏.江苏盐城滨海湿地生态系统稳定性评价及未来景观模拟研究[D].宁波:宁波大学,2020.
- [70] 王希群,马履一,贾忠奎,等.叶面积指数的研究和应用进展[J].生态学杂志,2005,24(5):537-541.
- [71] 王长庭,龙瑞军,丁路明,等.草地生态系统中物种多样性、群落稳定性和生态系统功能的关系[J].草业科学,2005,22(6):1-7.
- [72] 王忠武.载畜率对短花针茅荒漠草原生态系统稳定性的影响[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2009.
- [73] 邬建国.生态学范式变迁综论[J].生态学报,1996,16(5):449-460.
- [74] 吴伟斌,洪添胜,王锡平,等.叶面积指数地面测量方法的研究进展[J].华中农业大学学报,2007,26(02):270-275.
- [75] 姚晓寒.吉林龙湾泥炭沼泽湿地生态系统稳定性研究[D].长春:东北师范大学,2021.
- [76] 姚秀粉.黄河三角洲湿地生态系统稳定性评价[D].泰安:山东农业大学,2013.
- [77] 尹逊霄,华珞,张振贤,等.土壤中磷素的有效性及其循环转化机制研究[J].首都师范大学学报(自然科学版),2005(03):95-101.
- [78] 张磊,李绍才,缪宁,等.基于信息熵的四川盆地周山杉木生态系统稳定性评价[J].中南林业科技大学学报,2020,40(07):79-88.
- [79] 张梦弢,张青,亢新刚,等.长白山云冷杉林不同演替阶段群落稳定性[J].应用生态学报,2015,26(06):1609-1616.
- [80] 张明霞,王得祥,彭舜磊,等.秦岭松栎混交林群落的稳定性[J].生态学报,2015,35(08):2564-2573.
- [81] 张型东.鄱阳湖生态系统空间结构与湿地功能分析及稳定性评价[D].南昌:南昌大学,2016.
- [82] 张学玲,余文波,蔡海生,等.区域生态环境脆弱性评价方法研究综述[J].生态学报,2018,38(16):5970-5981.
- [83] 张子琦,焦菊英,陈同德,等.拉萨河流域洪积扇不同植被类型土壤化学计量特征[J].生态学报,2022,42(16):6801-6815.

附图一 2000-2020 年全国县域生态系统稳定性指数空间分布图



附图二 2000-2020 年全国县域生态系统稳定性等级空间分布图

