

DOI: 10.5846/stxb201804140856

高翔, 黄娉婷, 王可. 面向宁夏沙坡头干旱沙漠自然保护区的生态系统稳定性评估. 生态学报, 2019, 39(17): - .

Gao X, Huang P T, Wang K. Assessment of the ecosystem stability of Shapotou Arid Desert Nature Reserve in Ningxia, China. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(17): - .

# 面向宁夏沙坡头干旱沙漠自然保护区的生态系统稳定性评估

高翔\*, 黄娉婷, 王可

兰州大学资源环境学院, 兰州 730000

**摘要:** 稳定性是生态系统的基本特征之一,也是决定生态系统兴亡的重要特征。宁夏中卫沙坡头国家级自然保护区是位于干旱沙漠区以荒漠为背景的自然保护区,具有脆弱性(生态与环境)、过渡性(草原向荒漠、沙漠向城市)与复合性(自然与人工生态系统并存)的特点,对其进行生态系统稳定性评估研究,对于维护腾格里沙漠西南缘生态安全和实现宁夏中卫市社会经济持续发展具有重要意义。在总结国内外生态系统稳定性评估研究基础上,本文基于稳定性三维内涵(恢复力稳定性、抵抗力稳定性和演替稳定性)、评估指标构建(原则与逻辑框架及指标体系)、评估方法确立(红绿灯综合评估法)等,针对性地开展沙坡头国家级自然保护区生态稳定性示范性评估,发现:1)近20年19个单项指标中,多数指标情况趋于变好,少部分进一步恶化,保持基本稳定仅两个。2)影响生态系统稳定性的要素由群落组成为主转变为以生境条件为主;2001年、2005年、2007年、2010年、2012年和2014年6个关键年份中,生态系统稳定性3个内涵对稳定性的贡献基本以抵抗力稳定或恢复力为主。3)保护区整体生态稳定指数ESI由0.41增至0.661,稳定状态从临界到稳定,总体上保护区生态系统稳定性增强。这主要得益于长期的治沙防沙与生态修复工程实施、大规模推沙造林、各种生态监测和维护、大规模取黄河水灌溉等。

**关键词:** 干旱荒漠生态系统;稳定性评估;稳定性三维内涵;评估方法体系;宁夏沙坡头国家级自然保护区

## Assessment of the ecosystem stability of Shapotou Arid Desert Nature Reserve in Ningxia, China

GAO Xiang\*, HUANG Pingting, WANG Ke

Earth and Environmental Sciences Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

**Abstract:** Stability is an important characteristic of the ecosystem that determines the rise and fall of ecosystems. Ningxia Zhongwei Shapotou National Nature Reserve is a nature reserve in an arid desert area, with the desert as the background. This protected area has the characteristics of vulnerability (ecology and environment), transition (grassland to desert and desert to city), and complexity (coexistence of natural and artificial ecosystems). Evaluation of ecosystem stability in Shapotou Reserve is of great significance for maintaining the ecological security of the southwestern margin of Tengger Desert and sustainable and healthy development (social and economic) of Zhongwei City. On the basis of summarizing the research on the stability evaluation of ecosystems at home and abroad, in this paper, we have defined the three-dimensional connotation of stability (resilience, resistance, and succession stability). We also performed a demonstrative assessment of the ecological stability of Shapotou National Nature Reserve from three aspects: defined three-dimensional stability (resilience, resistance, and succession stability), constructed evaluation indicators (principle and logical framework), and established assessment methods (traffic light comprehensive assessment method). The results were as follows: (1) In

基金项目: 环保公益性行业科研项目(201209034); 国家自然科学基金(41530745)

收稿日期: 2018-04-14; 修订日期: 2018-12-17

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xgao@lzu.edu.cn

the past 20 years, of 19 individual indicators, most of the indicators tended to improve, a few deteriorated further, and two remained basically stable. (2) Factors that affect the stability of the ecosystem were changed from community composition to habitat conditions. In the six key years of 2001, 2005, 2007, 2010, 2012, and 2014, resistance or resilience contributed the most to ecosystem stability. (3) The overall ecological stability index of protected areas increased from 0.41 to 0.661, and the trend was from critical point to stable point. Overall, the stability of regional ecosystems has increased. This was mainly due to the implementation of long-term sand control and ecological restoration projects, large-scale reforestation projects, ecological monitoring and maintenance, and large-scale irrigation of the Yellow River water.

**Key Words:** arid desert ecosystem; stability assessment; three-dimensional connotation of stability; assessment method system; Ningxia Shapotou National Nature Reserve

稳定性是生态系统的基本特征之一,也是决定生态系统兴亡的重要特征,对于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。干旱沙漠自然保护区多处于干旱、半干旱乃至半湿润气候带,所特有的荒漠生态系统具有敏感性强、稳定性较差的特点,总体呈现脆弱状态。随着人类开发建设活动加剧以及气候变化影响,保护区生态系统在遭受沙漠化威胁同时面临着结构简化、自我调节和抗逆能力下降等问题,监测和评估生态系统的稳定性成为区域生态保护的重要内容。生态系统具有复杂性,其内部各组分非线性关联的特征,系统状态的涨落特征以及系统内部的时空异质性等复杂特征<sup>[1]</sup>,使得生态系统的稳定性评测面临许多困难。自 20 世纪 50 年代以来,大量学者对生态系统稳定性展开研究和评测,主要方法包括野外观测、模型分析与指标评判。由于指标的敏感性、信息多元性、复合性、动态性特点,指标评判已成为实践评估中常用的方法。又由于指标的内涵、生态意义和指标体系构建逻辑思路存在差异,可将指标法生态系统稳定性评估分为五类: 1) 基于生物多样性与稳定性关系的评估。King 和 Pimm 通过模拟系统发现高等植物多样性会导致更大生物量的稳定性<sup>[2]</sup>。Doak 等认为不同物种因对环境变化的反应不同,随物种多样性的增大其生态系统功能的变化将被缓冲,且物种之间相互关联越小,多样性对稳定性的影响则越大<sup>[3]</sup>。中国大多学者认为物种多样性是衡量生态系统稳定性、演替及可持续性的一个重要指标<sup>[4-10]</sup>。2) 基于阈值的评估研究。生态系统稳定性是不超过生态阈值的生态系统的敏感性和恢复力。不同的生态系统所承受的干扰水平不同、有不同的阈值<sup>[11]</sup>。如 Westman 对影响沼泽草地恢复的原油胁迫时间阈值的判断<sup>[12]</sup>、中国干旱内陆河流域维系天然植被生存的合理地下水位-生态水位的认知<sup>[13-16]</sup>。3) 基于结构与功能指标的评估。Odum 通过群落能量、群落结构、营养物质循环、生活史等 7 方面 22 项指标来评判生态系统的稳定性。这 7 个方面分别代表生态系统的结构、功能与能流状态<sup>[17]</sup>。国内学者也从结构与功能的不同侧面指标分析了不同生态系统的稳定性<sup>[18-20]</sup>。4) 基于内涵指标的评估。基于对稳定性内涵的不同解读,开展了针对不同类型生态系统的评价,代表性的成果包括针对农田生态系统<sup>[21]</sup>、森林生态系统<sup>[22]</sup>、保护区生态系统<sup>[23]</sup>等。5) 基于三效统一指标的生态系统稳定性评估。绿洲生态系统的可持续发展是干旱区发展所追求的基本目标,长期以来从自然、社会、经济 3 个层面指标综合研究绿洲稳定性的成果也较多,如针对张掖绿洲<sup>[24-26]</sup>、阜康绿洲<sup>[27]</sup>、精河绿洲<sup>[28-29]</sup>、额济纳绿洲<sup>[30]</sup>等的研究具代表性。

总体上,稳定性评估目前尚未形成一个完善统一的评估体系,对生态系统稳定性的理解和判别方法等仍处于广泛讨论的起步阶段,缺乏有力的理论基础与技术支撑。因此,本文将从生态系统的基本稳定性内涵出发,针对沙坡头干旱沙漠自然保护区实际,提出其生态系统稳定性评估方法体系,不仅能够完善和丰富我国荒漠生态系统稳定性评估技术,而且可为我国干旱沙漠自然保护区的生态管理与建设提供实践指导。

## 1 保护区生态系统稳定性评估指标体系构建

生态系统稳定性评估中指标体系的构建涉及到了多学科领域,且评估指标种类繁多,逻辑框架搭建思路并非唯一,所以应该遵循一定原则和依据选择适当的评估指标和逻辑框架,使得指标明确,便于数据采集的同

时能全面反映自然保护区的生态系统稳定性状况。

### 1.1 构建原则和筛选的标准

系统、科学地选取系统稳定性评估指标,确定各指标因子的贡献率,对于评估结果的可信度和准确度十分重要。因此需要遵循一定的原则合理选取指标:

1) 科学性原则:全面、系统、准确体现稳定性内涵特征,反映生态系统内部关系,生态系统所受外部干扰以及景观空间格局带来的影响。

2) 可持续性原则:指标选取在立足当下的同时考虑未来的可持续利用。

3) 代表性原则:选择具代表性的主导指标,同时能代表研究区域特殊环境。

4) 可行性原则:据实际选取敏感、可测、易得指标,注意定量和定性结合。

5) 综合性原则:综合考虑自然和人为、生态系统内部外部的各种影响。

在此构建原则基础上,可将指标筛选标准归纳为 8 个方面,见下表 1。

表 1 干旱沙漠自然保护区生态系统稳定性评估指标筛选标准

Table 1 The screening criteria for evaluation index of ecosystem stability in arid desert Nature Reserve

筛选标准 Selection criteria	具体含义 Specific meaning
与管理目标相关 Related to management objectives	指标能结合管理目标,提供具有指示意义的、明确的信息,服务生态系统保护与管理决策
与干旱沙漠自然保护区相关 Related to the arid desert nature reserve	指标用于评估干旱沙漠自然保护区内生态系统稳定性,能涵盖与之相关的自然与社会问题
方法完善 Perfect method	指标定义明确、科学,评估方法合理,数据获取方法可靠,便于进行长期、持续的测定
逻辑清晰 Clear logic	按照生态系统稳定性内涵逻辑关系组织指标
灵敏性 Sensitivity	指标对变化敏感,能密切跟踪环境及生态因子的变化
代表性 Representative	指标数量无需过多,但应能揭示生态系统稳定性评估中的重点问题
综合性与灵活性 Comprehensive and flexible	指标体系稳定,能最大限度地满足不同使用者的需求
适用性与推广性 Applicability and promotion	易于理解与掌握,评估结果不仅被研究者所掌握,也便于管理者所理解与认知

### 1.2 评估指标选取的依据与逻辑框架

稳定性是生态系统的重要特征之一,由于问题十分复杂,涉及内容包括生态系统的类型、组成、生态功能和一切干扰因素,因此目前尚无统一的生态系统稳定性测度与评估指标。目前比较认可基于稳定性内涵构建指标体系。因此评估生态系统稳定性时,从生态系统稳定性的三维内涵(抵抗力稳定性、恢复力稳定性、演替稳定性)出发,选取相应指标。

逻辑关系是构架指标体系的基础,通过确定逻辑框架以及对评估指标进行组织分类,有助于提取和归纳有价值信息,实现生态系统稳定性综合评估。指标体系构建逻辑思路有两条:主线是基于稳定性的三维内涵筛选出一系列复合指标;副线是在生态稳定性敏感影响因素辨识基础上,结合已有成果频度分析,形成指标族(图 1)。复合指标与指标族的综合形成初步指标体系,并向相关研究专家、保护区管理者等征询意见,进行调整。进一步实地验证部分指标的适宜性,形成最终指标体系。

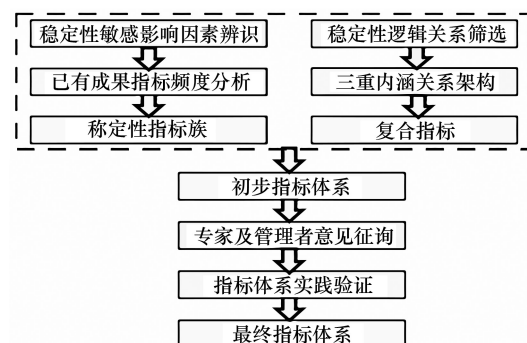


图 1 指标体系确立过程

Fig.1 The establishment process of the index system

### 1.3 评估指标体系

依据保护区生态系统稳定性评估指标体系构建原则、逻辑关系,并结合沙坡头自然保护区实际情况,构建的指标体系包括3个子系统、7个复合指标、19个具体指标(图2)。

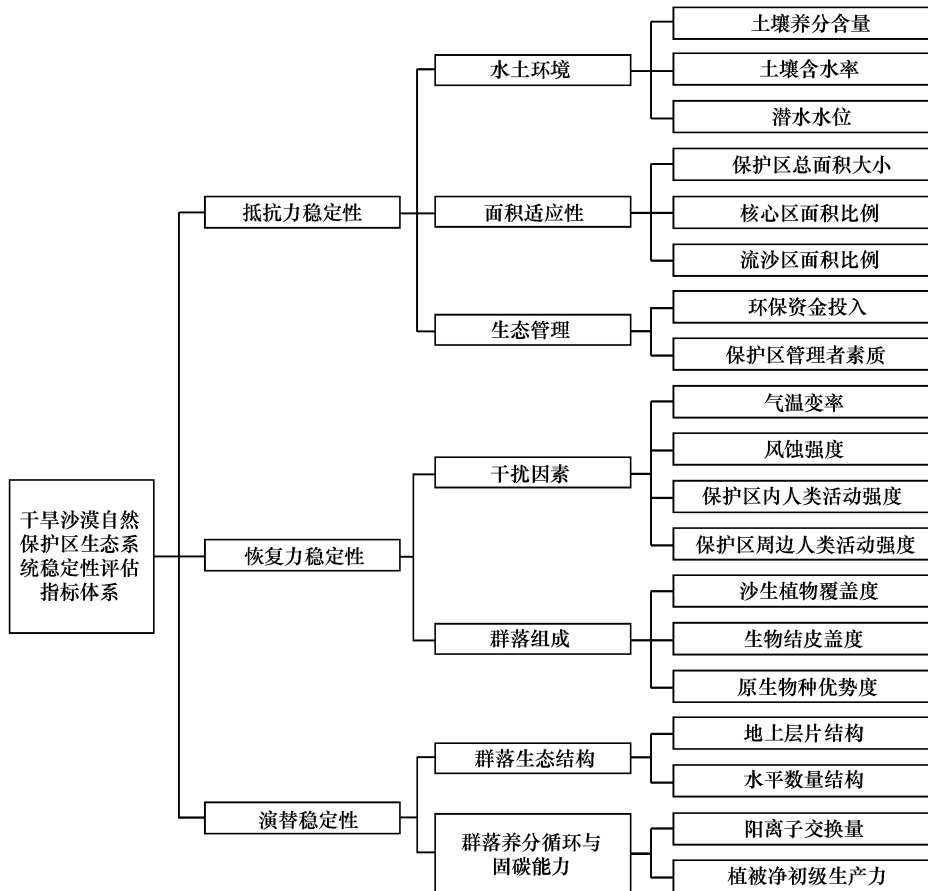


图2 干旱沙漠自然保护区生态系统稳定性评估指标体系

Fig.2 The evaluation index system of ecosystem stability in arid desert nature reserve

抵抗力稳定性是群落或生态系统在受到干扰后维持其原来结构和功能状态、抵抗干扰的能力。一方面生境的稳定为群落或生态系统的稳定奠定了良好基础,而生境中水土环境又是基本构成。水土环境是生态系统生境的重要组成部分,也是维持生态系统物质循环、生态功能的重要基础。自然保护区水土环境一定程度上决定了植被群落的空间选择与分布。考虑到水分运移过程中对植物生长的相对有效性,可选择土壤养分含量来反映“土”的信息,选择土壤含水量、潜水水位来反映水土环境中的“水”的信息。另一方面,尽管生态系统大小难以界定,但对自然保护区而言,为保证保护对象生态功能及社会价值等的可持续性,保护区面积上要达到一定规模,也要有一定适宜的结构。荒漠类型自然保护区处于沙漠向草原的过渡地带,流沙区分布也是影响生物生存、群落或景观格局的重要因素。面积适宜性选择相对性比例指标,包括保护区核心区面积比例、保护区总面积大小与保护区内流区面积比例。

恢复力稳定性是指群落或生态系统受到干扰后回到原来状态的能力。生态系统恢复能力很大程度上取决于植物群落组成,对于特殊沙漠地区来说沙生植物及原生种的发展状况是制约区域生态系统恢复力的重要方面。生活在以沙粒为基质的沙区的植物被称为沙生植物,这些沙生植物由于长期生活在风沙大、雨水少、冷热多变的严酷气候下,适应恶劣环境能力很强,对植被稳定的作用很大。原生物种在生态系统恢复中也起到重要作用。保留原生物种,才能保证物种多样性和遗传多样性,才能保证景观中总体生产力达到最高水平。



生物结皮(Biological soil crusts),是干旱半干旱区重要的地表覆盖类型(40%以上)。生物结皮的存在对沙漠的固定、土壤表面的物理化学与生物学特性、土壤抗风蚀水蚀等方面具有重要意义。在生境受破坏情况下,提高生物结皮的发育过程能极大地加速植被重建的进程。

此外,抵抗力稳定性与恢复力稳定性均属于干扰性稳定,因此干扰性因素必须加以考虑。前者主要考虑人文干扰,即保护区管理者的素质及建设干预。后者主要考虑自然干扰,即群落或生态系统响应敏感的气候及其变化影响。

演替稳定性指群落或生态系统在达到演替顶级后出现的能够进行自我更新和维持并使群落的结构、功能长期保持在一个较高水平的能力。相对稳定的生物群落其重要特征之一是具有一定的空间结构。群落结构分垂直结构和水平结构,群落的垂直结构指群落在垂直方向的地上成层和地下成层结构。群落的水平结构主要表现特征是镶嵌性。生态系统演替过程中,其基本功能(物质循环与能量流动)始终存在,其稳定态也体现在持续的物质循环与能量流动,前者可由阳离子交换指征,后者可由植被生产力指征。

## 2 保护区生态系统稳定性评估方法确立

评估方法的科学性是客观评估的基础,目前常用的综合评估方法有定性评估方法、野外验证法、统计分析法、数学法、指标法和系统工程分析法等,由于评估的立足点、适用对象和方法思路的不同,各有优缺点。其中综合指数法在生态系统评估中比较常用,如分维指数法<sup>[15]</sup>、粗糙集理论的综合评价法<sup>[30]</sup>、灰色关联分析法<sup>[31]</sup>、模糊集综合评价法<sup>[32]</sup>。

本研究采用的“红绿灯(Traffic light)综合评价法”的关键在于制定评判标准,将指标值与判断标准进行定量比较判断稳定状态的变化趋势。该方法较为简便,结果表达直观,是在干旱荒漠型自然保护区生态稳定评估中的首次应用。

### 2.1 单项指标评估方法

首先确立评估标准,评估标准根据指标特点确定目标值、临界值、阈值范围或历史值。1)目标值:根据相关规划与计划所设具体目标确定的指定量的目标值。2)临界值:从一种状态转变为另一种状态时的风险值。3)阈值范围:指可接受的、不导致体系激变而产生不利影响的状态变动范围。4)历史值:指过去的一个时期中某一年或某一时刻的指标值。

其次根据历史文献资料和实测数据,利用对应数学模型,对19个具体指标分别进行指标值计算和多年变化的统计,判断各单项指标多年变化趋势和生态意义。

### 2.2 多指标综合评估方法

根据需要选择部分单项指标的系列数据,确定评估指标权重,最后进行指标合成,即多个指标对生态系统稳定性不同方面的综合评估结果。由于需要将指标放入同一模型进行合成,所以需要针对不同量级指标进行处理,同时根据指标重要程度设置权重进行综合评估,并对评估结果进行分级。

#### 2.2.1 多项指标处理

##### (1) 多参数指标

包含多参数的指标,在评估过程中根据参数之间的相互关系,分两种情况进行评估:1)参数间区分主次。评估结果一般取决于主要参数分析,若主要参数分析结果因为数据缺乏等原因不可获得,可用次要参数代替评估。2)参数相互平行。综合考虑内部所有参数,且对参数进行统一无量纲化处理,消除量纲差异或者水平差异。

##### (2) 指标值的量化

指标评估结果用数值形式表示是进行综合评分的基础。除了定量指标的评估结果使用数值表示外,定性指标也需要进行量化。但由于定性指标缺乏明确的测度方法,所以并没有公认的统一量化模式。

##### (3) 数值标准化

多目标决策指标体系需消除不同指标间的量纲差异,因此在使用指标体系进行综合评估前,需要将指标值做标准化处理。目前常用的指标标准化方法有:极差变换法、线性比例变换法、向量归一化法(列模等于1)、标准样本变换法、归一化法(列和等于1)、取倒数等。限于篇幅,具体计算公式不再列出。

### 2.2.2 权重设置——熵权法

指标权重的确定主要有主观法和客观法,主观法是根据决策分析者对各指标的重视程度对指标进行权重赋值,客观法则是根据评估对象各指标数据用数学计算准则得出评估指标的权重,二者相比,熵权法精度较高、客观性更强,因此选用熵权法确定权重。

熵权法是根据各指标的变异程度,利用信息熵计算各指标的熵权,再用熵权对各指标的权重进行修正,从而得出较为客观的指标权重。熵权法是综合指标的重要性的和指标提供的信息量两方面来确定各指标的最终权重。

### 2.2.3 红绿灯综合评估方法

基于单项指标评估结果,按照指标层次由下往上的顺序归纳汇总信息,最终获得评估结论。具体步骤为:

步骤1:将“指标层”指标( $D_k$ )的“红绿灯”的评估结果列表;

步骤2:将“复合指标层”指标( $C_j$ )统计汇总单项指标( $D_k$ )的评估结果,再以饼状图的形式表示。

步骤3:确定“准则层”指标( $B_i$ )的状态。具体地,首先统计指标  $B_i$  内“绿灯”、“黄灯”、“红灯”、“数据不充分或没有可参比的基础数据”,以及“无需评估”5种情况出现的比例,然后将这5种情况按其出现比例由高到低排列。排在首位的即为指标  $B_i$  的状态。

步骤4:评估最后一步是指标的合成,通过算式将多个指标对生态系统稳定性不同方面的评估综合在一起,得到一个整体性评估。可采用加权线性和法,其表达式如下:

$$ESI = \sum_{i=1}^n W_i D_i$$

式中,ESI(Ecological Stability Index)为干旱荒漠生态系统整体稳定性指数, $D_i$ 为第  $i$  项指标评估分级量值, $W_i$ 为第  $i$  项评估指标权重, $n$ 为评估指标个数。

### 2.2.4 稳定性评估结果分级

生态系统综合评估结果出来后要有一个分级判断,参照陈亚宁将荒漠生态系统稳定性五级等差划分<sup>[33]</sup>,并拟定不同生态系统稳定性分级标准及对应状态内容(表2)。

表2 荒漠生态系统稳定性评估分级标准

Table 2 Classification criteria for stability evaluation of desert ecosystems

级别 Level	很稳定 Very stable	稳定 Stable	临界状态 Criticality	脆弱 Vulnerable	很脆弱 Very vulnerable
指数 Index	$1 < S \leq 0.8$	$0.6 \leq S < 0.8$	$0.4 \leq S < 0.6$	$0.2 \leq S < 0.4$	$0 \leq S < 0.2$
状态 State	功能完备,结构很稳定,信息传递顺畅	功能良好,结构稳定,信息传递较顺畅	功能基本具备,结构基本稳定,信息传递基本无阻滞	功能缺失,结构不稳定,信息传递出现一定阻滞	功能基本丧失,结构单一、脆弱,信息传递中断

S:稳定性 Stability

生态系统稳定性变化程度则采用定量或半定量方式表述。难以定量的变化应采取专家评估的方式确定,也可通过历史资料的综合比较,采用背景比较分析方法确定,即对照历史上本系统的量值或经典文献提供的地球上本系统均值进行量算。根据保护区的性质、规模、保护区所在区域生态环境的敏感程度及生态系统的空间分布,对评估的级别可以作适当调整,但调整幅度上下不应超过一级。

## 3 沙坡头自然保护区概况与数据来源

### 3.1 沙坡头自然保护区概况

宁夏沙坡头国家级自然保护区(以下简称沙坡头保护区)地处宁夏中卫城区的西北部和腾格里沙漠的东

南缘的交接地带,地理坐标范围为  $104^{\circ}55'42''$ — $105^{\circ}11'54''E$ ,  $37^{\circ}26'06''$ — $37^{\circ}37'25''N$ ,海拔 1300—1500 m,地势西北高、东南低,具有典型的风沙地貌,属于干旱沙漠自然保护区类型。保护区总面积  $14043.09 \text{ hm}^2$ ,其中核心区面积  $3956.76 \text{ hm}^2$ ,缓冲区面积  $5414.12 \text{ hm}^2$ ,试验区面积  $4672.21 \text{ hm}^2$ (图 3)。

保护区属于荒漠和草原的生态过渡带,景观有荒漠、旱生超旱生的荒漠草原灌丛景观、沼泽、湖泊湿地、草甸景观、铁路沿线固沙林、速生杨人工林景观及黄河灌区农田景观。植物资源相当贫乏,裸子植物 4 科 8 属,14 种(包括种下等级),被子植物 75 科 220 属 426 种(包括种下等级);动物资源丰富度一般,脊椎动物 194 种,其中鱼类 18 种,两栖类 3 种,爬行类 5 种,鸟类 147 种,兽类 21 种,其中国家重点保护野生动物名录的种类有 23 种<sup>[34]</sup>。

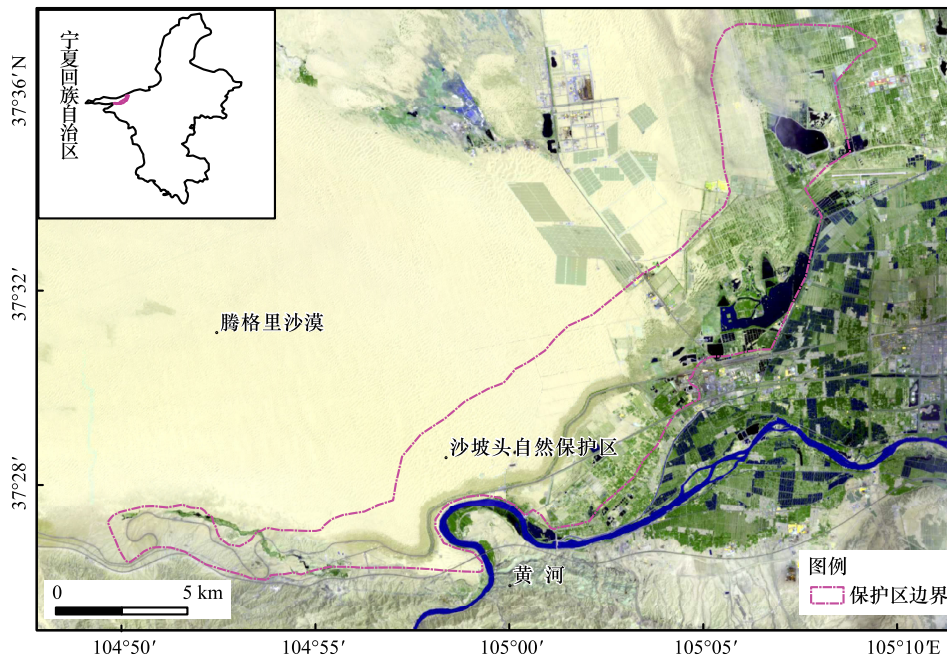


图 3 中卫沙坡头国家级自然保护区地理位置

Fig.3 The geographical location of Zhong Wei Shapotou National Nature Reserve

### 3.2 数据来源与处理

数据来源主要包括历史资料、统计数据、调查数据、野外考察、现场观测、遥感与模拟估算等。具体有:1) 成果资料:包括相关研究文献 2000 多篇,以《宁夏沙坡头国家级自然保护区综合科学考察》(2005)、《宁夏沙坡头国家级自然保护区二期综合科学考察》(2010)等为主的报告 20 余部。以上数据含保护区内部及毗邻区人类活动信息。2) 遥感数据:包括 20 世纪 70 年代末 80 m 分辨率 MSS 图像;20 世纪 90 年代末至 2014 年研究区 30 m 分辨率 TM 影像。3) 气象监测数据:沙坡头自然保护区附近的中卫市国家基准、基本气象站,记录 1951 年 1 月以来本站气压、气温、降水量、蒸发量、相对湿度、风向风速、日照时数和地表气温要素的日值数据。4) 生物及生态系统数据:采用地形、土壤和 1:50000 植被类型矢量图 3 个生态要素,进行多维空间的数据聚类 and 分区,确定了宁夏中卫沙坡头保护区 20 个典型群落样地,进行植物、群落多类型信息采集。时间从 2012 年初到 2015 年末,每年安排至少 4 次调查,每次调查时间持续 10—15 天。5) 土壤及其水分数据:和群落样地一致,在 20 个区域分别确定 3 个平行样点,取 1—200 不同深度土壤样品 3000 余份,通过室内试验分析,获取相关数据信息。

## 4 红绿灯法评估结果与分析

### 4.1 单项指标评估结果

19 个单项指标的计算依据方法参考去年的工作<sup>[35]</sup>,限于篇幅,不再一一列出。单项指标近 20 年的变化



趋势及指征见下表 3,具体数值变化也来自去年的工作<sup>[35]</sup>。总体上,近 20 年多数指标情况趋于变好,少部分进一步恶化,保持基本稳定的有两个。经过多方努力,未来保护区的水土环境、植被情况等都会有所改善、发展或维持在一个较合理水平。

表 3 稳定性单项指标评估结果

Table 3 Single-indicator evaluation result of ecosystem stability

复合指标( $C_j$ ) Composite index( $C_j$ )	稳定性指标( $D_j$ ) Stability index ( $D_j$ )	近 20a 变化 Changes in the past 20 years
水土环境 Water and soil environment	土壤养分含量	指标值增大,状况改善 <sup>[35]</sup>
	土壤含水量	指标值降低,状况恶化 <sup>[35]</sup>
	地下水水位	指标值降低,状况恶化 <sup>[35]</sup>
面积适宜性 Area suitability	核心区面积比例	指标值增大,状况改善 <sup>[35]</sup>
	保护区总面积大小	没有或几乎没有变化 <sup>[35]</sup>
	流沙区面积比例	指标值降低,状况改善 <sup>[35]</sup>
生态管理 Ecological management	环保资金投入	指标值增大,状况改善 <sup>[35]</sup>
	保护区管理者素质	指标值增大,状况改善 <sup>[35]</sup>
	干扰强度 Disturbance intensity	气温变率
风蚀强度		指标值降低,状况改善 <sup>[35]</sup>
保护区内人类活动强度		指标值增大,状况恶化 <sup>[35]</sup>
生物多样性 Biodiversity	保护区周边地区人类活动强度	指标值增大,状况恶化 <sup>[35]</sup>
	沙生植物覆盖度	指标值增大,状况改善 <sup>[35]</sup>
	生物结皮盖度	指标值降低,状况恶化 <sup>[35]</sup>
群落生态结构 Community structure	原生植物优势度	指标值降低,状况恶化 <sup>[35]</sup>
	地上层片结构	指标值降低,状况恶化 <sup>[35]</sup>
	水平数量结构	没有或几乎没有变化 <sup>[35]</sup>
群落养分循环与固碳能力 Community nutrient cycling and carbon sequestration capacity	阳离子交换量	指标值增大,状况改善 <sup>[35]</sup>
	植被净初级生产力	指标值增大,状况改善 <sup>[35]</sup>

单项指标评估结果红绿灯直观表达见下图 4,具体来说,向好的情况包括:土壤养分改善、保护区核心区面积比较适宜、流沙区面积在减少、环保资金投入增加、保护区管理者素质提高、风蚀强度减弱、沙生植物覆盖扩展、根系物质交换相对旺盛、植被平均生物产出增大。恶化的情况包括:由于暖干化、地下水开发,保护区多个区域沙层含水率减小、地下水位下降;保护区内外人类活动强度有加大趋势;生物结皮在靠近试验区的区域有所退化;由于生境大变化,加上过多引种外来植物,使得原生植物优势度有所降低;受降水异常(降水少、变率大)的影响,多个年份植被恢复缓慢,生物量积累不足,物种组成和地上成层趋于简单化。

#### 4.2 各层指标贡献分析

由图 5 可知诸复合指标对生态系统稳定性的贡献情况:总体上,2001—2007 年间群落生态结构,特别是保护区西部自然植被区群落结构的稳定与发展对维持保护区的生态稳定性贡献最大。2007—2014 年间,由于生态建设不断加强,特别是多种途径干预改善保护区人工植被区的水土条件,使得其成为影响生态系统稳

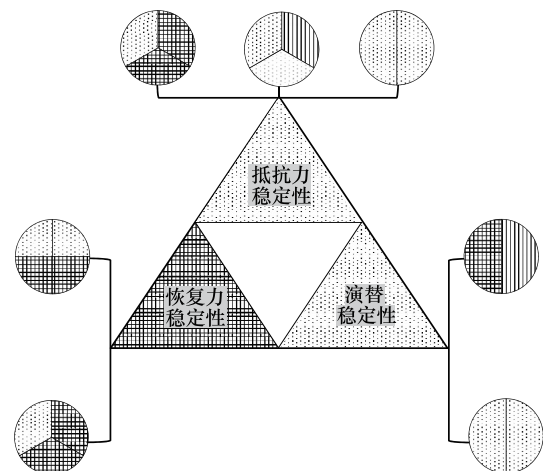


图 4 单项指标红绿灯评估汇总结果

Fig. 4 Summary results of the single-indicator traffic lights evaluation



定性的主要方面。

6 个年份中 3 种内涵稳定性对整体稳定性贡献相差不是很大,说明保护区生态系统稳定是一个综合结果,受多方面的影响。说到差异,就是抵抗力稳定和恢复力稳定贡献稍突出一些,特别是前者。

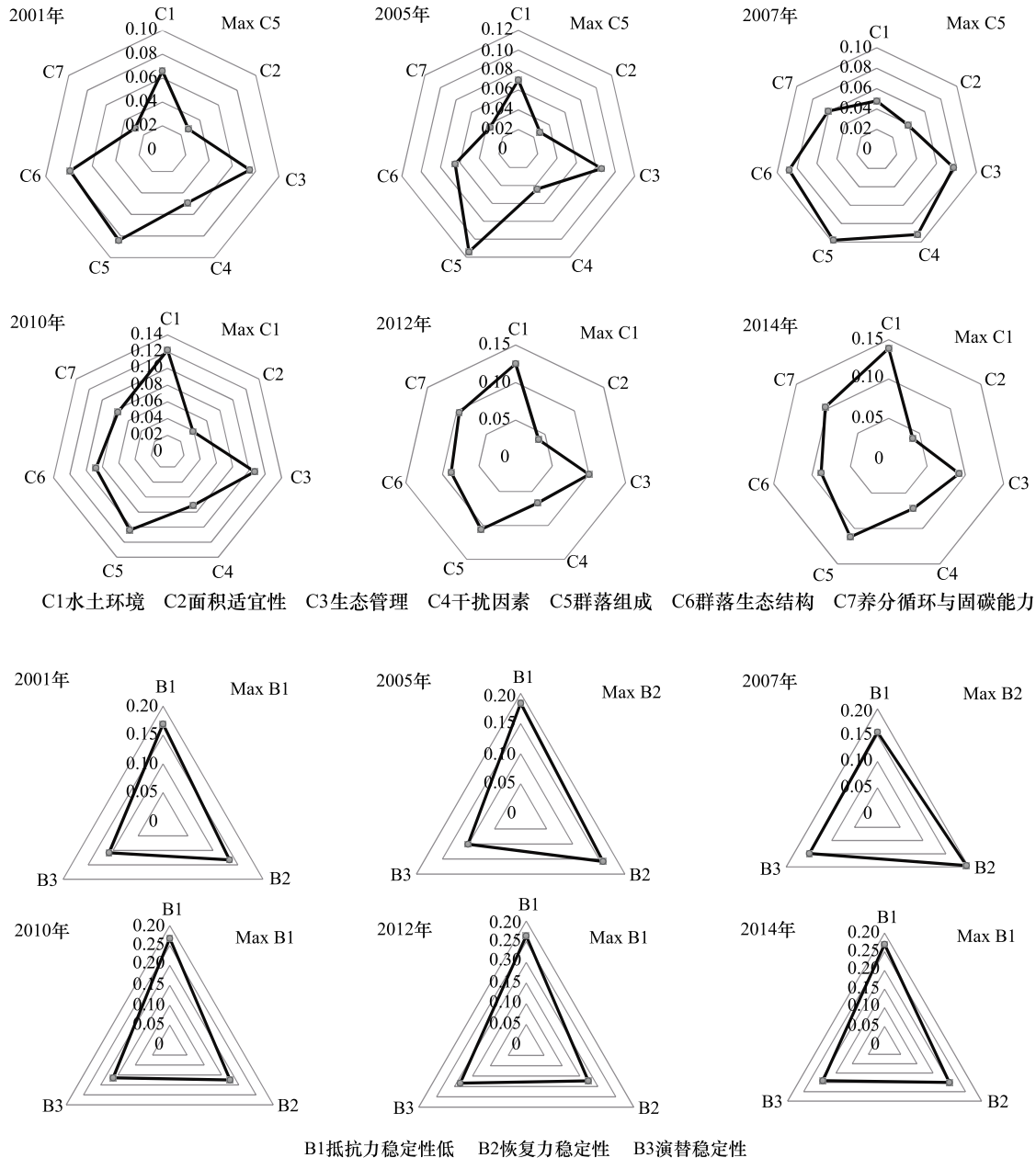


图5 沙坡头自然保护区稳定性复合指标贡献与内涵稳定性贡献

Fig.5 Contribution of multiple factors and three aspects of stability to the ecosystem stability

### 4.3 保护区生态系统整体稳定性指数 ESI

基于以上部分单项指标的系列数据,运用综合评估方法,计算出沙坡头自然保护区几个关键年份(2001、2005、2007、2010、2012、2014)的生态系统稳定性指数(ESI)和变化趋势(表4、图6)。

对照稳定性分级可知,沙坡头自然保护区经过近15年发展,总体上沙坡头自然保护区生态系统稳定性得到加强,已由过渡态进入到稳定态。

尽管背景区域气候干旱化,但由于长期治沙防沙与生态修复工程实施、大规模推沙造林、各种生态监测和维护、合理水资源配置(大规模取黄河水灌溉、节水灌溉)、人类活动的调控努力,沙坡头自然保护区生态状况

总体趋好,稳定性增强。

表 4 沙坡头自然保护区生态系统整体稳定性指数 ESI 变化

Table 4 Changes of the ESI in Shapotou Nature Reserve

年份 Years	2001	2005	2007	2010	2012	2014
ESI	0.410	0.443	0.503	0.607	0.621	0.661
分级 Level	临界 Critical	临界 Critical	临界 Critical	稳定 Stable	稳定 Stable	稳定 Stable

ESI: 生态系统稳定性指数 Ecosystem stability index

权衡保护区生态系统稳定性评估指标中权重较大的 7 个指标潜水水位、气温变率、原生物种比例、地上层片结构、净初级生产力、保护区核心区面积比例、保护区管理者素质,发现研究时段内这些指标中除气温变率、净初级生产力有较明显波动、保护区管理者素质明显提高外,其他指标均相对变化不大,说明保护区的生态稳定是一个多因素综合作用的结果,单个指标的好坏只能在某些方面影响生态稳定。因此在制定保护区生态恢复和发展政策与措施时,应从综合角度出发,制定比较全面的生态环境修复策略。

## 5 结论与讨论

### 5.1 主要结论

基于生态系统稳定性的三维内涵(恢复力稳定性、抵抗力稳定性和演替稳定性)构建其评估指标逻辑关系是清晰的、信息覆盖是较全面的。红绿灯综合评估方法在干旱沙漠区自然保护区生态稳定性评估中的运用也是适宜的。针对沙坡头国家级自然保护区而言,1)近 20 年 19 个单项指标中,多数指标情况趋于变好,少部分进一步恶化,保持基本稳定的两个。2)影响生态系统稳定性的要素由群落组成为主转变为以生境条件为主;2001 年、2005 年、2007 年、2010 年、2012 年和 2014 年 6 个关键年份中,生态系统稳定性 3 个内涵对稳定性的贡献以抵抗力稳定或恢复力为主。3)保护区整体生态稳定指数 ESI 由 0.41 增至 0.661,稳定状态从临界到稳定,总体上保护区生态系统稳定性增强。

### 5.2 讨论

(1)评估研究对比。目前针对沙漠区荒漠生态系统类型的自然保护区生态稳定性评估研究相对较少,对宁夏沙坡头这样的人工和自然生态系统并存、内部异质性明显、且人类活动影响相对较大的非典型自然保护区来说,运用综合指标法进行评估是适宜的,可集成反映多方面因素的综合影响。而且人为干预指标具有一定指向性,即需要反映保护区管理机构—保护区管理局对保护区管护、建设等方面的干预能力,这是一般生态系统指标法评估所没有的。对西北干旱区的生态系统稳定性评价因尺度、类型不同而存在差异,如陈亚宁<sup>[33]</sup>基于分形理论对宏观区域(阿拉善荒漠区、柴达木盆地荒漠区、塔里木盆地荒漠区、准格尔盆地荒漠区及河西走廊荒漠区)的生态系统稳定性进行的分析,并基于荒漠生态系统生产力指数进行了稳定性比较。对西北干旱荒漠区分布的独特的生态系统类型——绿洲的稳定性研究相对较多,方法也多样,包括基于系统指标、景观生态学指数的评估,基于生态需水量及区域小气候影响的研究等,其中具代表性的如王耀斌<sup>[30]</sup>对额济纳旗绿洲从自然资源环境、社会经济、自然灾害三子系统构建指标体系进行其稳定性评价。但此评价体系对以自然演替为主、严格限制经济社会活动干预的保护区来说是不适宜的。

(2)指标、分级标准适用性的动态判断。虽对选取指标的逻辑关系和依据进行了一定说明,但需要进一步对这些指标随着环境胁迫的变化趋势进行说明和预判;稳定性评估分级标准借鉴了已有成果,也需进一步

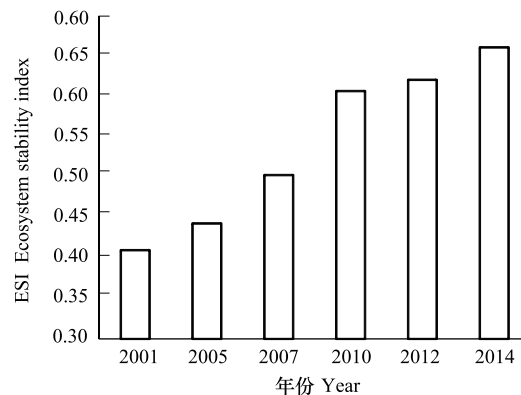


图 6 沙坡头保护区生态系统整体稳定性时间变化

Fig. 6 Changes in the overall stability of the ecosystem in Shapotou Nature Reserve over time

分析影响因素的隶属关系并结合保护区实际情况确定或基于单项指标的离散标准确定。

(3) 评估验证。验证是检验评估结果科学性的重要环节,由于生态系统稳定性内涵的多样性、不同尺度稳定性解释又不一致,因此验证也存在很大难度,可以实现的验证方法包括:1)与已有评价结果相比较。如王耀斌等<sup>[30]</sup>将其对2010年额济纳旗绿洲稳定性评价结果与2007年裴源生等<sup>[36]</sup>的评价结果相比较和说明自身评价的可靠性。2)野外验证。这种方法比较适合对生态系统稳定性单一内涵或稳定性单一指征的验证。3)整个评估体系的适用性还可以通过多个同类型自然保护区(如甘肃连古城国家级自然保护区、内蒙哈腾套海国家级自然保护区)的实践比较来验证。

**致谢:**感谢王乃昂教授在研究思路方面提出的宝贵建议,感谢姜红梅老师及研究生王旭、曹蕾、孙杰、赵浩等在野外考察基础数据获取方面所做的辛苦工作。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] 王萍. 陆地生态系统稳定性及其判别[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2008.
- [ 2 ] King A W, Pimm S L. Complexity, diversity, and stability: a reconciliation of theoretical and empirical results. *The American Naturalist*, 1983, 122(2): 229-239.
- [ 3 ] Doak D F, Bigger D, Harding E K, Marvier M A, O'Malley R E, Thomson D. The statistical inevitability of stability-diversity relationships in community ecology. *The American Naturalist*, 1998, 151(3): 264-276.
- [ 4 ] McCann K S. The diversity-stability debate. *Nature*, 2000, 405(6783): 228-233.
- [ 5 ] Tilman D. Functional diversity. *Encyclopedia of Biodiversity*, 2001, 3(1): 109-120.
- [ 6 ] 钟军弟, 李先琨, 吕仕洪, 刘晟源, 陆茂新, 陈燕, 成夏岚. 广西弄岗喀斯特区域不同群落的稳定性评价分析. *中国岩溶*, 2012, 31(1): 16-22.
- [ 7 ] 白永飞, 陈佐忠. 锡林河流域羊草草原植物种群和功能群的长期变异性及其对群落稳定性的影响. *植物生态学报*, 2000, 24(6): 641-647.
- [ 8 ] 周华坤, 周立, 赵新全, 刘伟, 李英年, 古松, 周兴民. 青藏高原高寒草甸生态系统稳定性研究. *科学通报*, 2006, 51(1): 63-69.
- [ 9 ] 张继义, 赵哈林. 短期极端干旱事件干扰后退化沙质草地群落恢复力稳定性的测度与比较. *生态学报*, 2011, 31(20): 6060-6071.
- [ 10 ] 张景慧, 黄永梅. 生物多样性与稳定性机制研究进展. *生态学报*, 2016, 36(13): 3859-3870.
- [ 11 ] 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.
- [ 12 ] Westman W E. *Ecology, Impact Assessment, and Environmental Planning*. New York: Wiley, 1985: 532-532.
- [ 13 ] 陈昌毓. 河西走廊实际水资源及其确定的适宜绿洲和农田面积. *干旱区资源与环境*, 1995, 9(3): 122-128.
- [ 14 ] 陈曦. *中国干旱区土地利用与土地覆被变化*. 北京: 科学出版社, 2008: 28-54.
- [ 15 ] 陈亚宁, 郝兴明, 李卫红, 陈亚鹏, 叶朝霞, 赵锐锋. 干旱区内陆河流域的生态安全与生态需水量研究——兼谈塔里木河生态需水量问题. *地球科学进展*, 2008, 23(7): 732-738.
- [ 16 ] 郭巧玲, 杨云松, 陈志辉, 鲁学纲. 额济纳绿洲植被生态需水及其估算. *水资源与水工程学报*, 2010, 21(3): 80-84.
- [ 17 ] Odum E. P. Properties of agroecosystems. in Lowrance R, Stinner BR, House GJ, eds. *Agricultural Ecosystems: Unifying Concepts*. New York: John Wiley, 1984: 5-12.
- [ 18 ] 曹文志, 王磐基. 区域农业生态系统稳定性分析与评价的理论和方法. *河南大学学报: 自然科学版*, 1998, 28(1): 70-75.
- [ 19 ] 王玲玲, 曾光明, 黄国和, 苏小康, 徐敏. 湖滨湿地生态系统稳定性评价. *生态学报*, 2005, 25(12): 3406-3410.
- [ 20 ] 夏继红, 严忠民, 蒋传丰. 河岸带生态系统综合评价指标体系研究. *水科学进展*, 2005, 16(3): 345-348.
- [ 21 ] 李新旺, 门明新, 王树涛, 齐跃普, 杜博洋, 许皞. 基于过程的河北平原农田生态系统稳定性评价. *自然资源学报*, 2008, 23(3): 430-439.
- [ 22 ] 任平, 洪步庭, 程武学, 周介铭. 长江上游森林生态系统稳定性评价与空间分异特征. *地理研究*, 2013, 32(6): 1017-1024.
- [ 23 ] 李霞, 杜世勋, 桑满杰, 郭新亚. 山西省自然保护区生态系统格局及稳定性变化趋势研究. *自然资源学报*, 2018, 33(2): 208-218.
- [ 24 ] 刘振波, 赵军, 倪绍祥. 绿洲生态环境质量评价指标体系研究——以张掖市绿洲为例. *干旱区地理*, 2004, 27(4): 580-585.
- [ 25 ] 杜巧玲, 许学工, 刘文政. 黑河中下游绿洲生态安全评价. *生态学报*, 2004, 24(9): 1916-1923.
- [ 26 ] 樊华, 卞玮, 雍会, 王开勇, 张凤华. 新疆玛纳斯河流域绿洲生态环境可持续发展的综合评价——以石河子市绿洲为例. *干旱区资源与环境*, 2007, 21(9): 25-28.
- [ 27 ] 周跃志, 潘晓玲, 吕光辉, 刘建平, 肖英. 现代绿洲稳定性评价——以新疆阜康绿洲为例. *农业系统科学与综合研究*, 2005, 21(3):

178-181.

- [28] 韦如意. 绿洲稳定性及其评价指标体系的研究[D]. 南京: 南京气象学院, 2004.
- [29] 毋兆鹏. 博、精河流域绿洲稳定性及其时空动态模拟研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2008.
- [30] 王耀斌, 冯起, 刘光琇, 司建华. 极端干旱区额济纳绿洲稳定性评价研究. 生态经济, 2015, 31(9): 162-165, 190-190.
- [31] 张金萍, 张静, 孙素艳. 灰色关联分析在绿洲生态稳定性评价中的应用. 资源科学, 2006, 28(4): 195-200.
- [32] 高润梅, 石晓东, 郭跃东. 山西文峪河上游河岸林群落稳定性评价. 植物生态学报, 2012, 36(6): 491-503.
- [33] 陈亚宁. 干旱荒漠区生态系统与可持续管理. 北京: 科学出版社, 2009: 40-61.
- [34] 刘迺发, 郝耀明, 吴洪斌. 宁夏沙坡头国家级自然保护区综合科学考察. 兰州: 兰州大学出版社, 2005: 16-34.
- [35] 高翔. 干旱沙漠自然保护区生态系统稳定性评估技术. 北京: 中国环境出版社, 2017: 57-67, 148-164.
- [36] 裴源生, 孙素艳, 陆垂裕. 绿洲生态稳定性预测. 水利学报, 2007, 38(04): 434-442.