

附件 5

《荒漠化地区生态质量评价技术规范  
(征求意见稿)》

编制说明

《荒漠化地区生态质量评价技术规范》编制组

2023 年 1 月

# 目 录

<b>1 项目背景</b> .....	<b>1</b>
1.1 任务来源.....	1
1.2 工作过程.....	1
<b>2 标准制订的必要性分析</b> .....	<b>2</b>
2.1 项目相关行业概况.....	2
2.2 相关生态环境标准和环境管理工作的需要.....	2
<b>3 国内外相关标准情况的研究</b> .....	<b>3</b>
3.1 主要国家、地区及国际组织相关标准情况的研究.....	3
3.2 国内标准情况的研究.....	4
3.3 本标准与国内外同类标准或技术法规的对比.....	14
<b>4 标准制订的基本原则和技术路线</b> .....	<b>14</b>
4.1 标准制订的基本原则.....	14
4.2 标准制定的技术路线.....	14
<b>5 标准主要技术内容</b> .....	<b>15</b>
5.1 标准适用范围.....	15
5.2 术语和定义.....	15
5.3 标准主要技术内容确定的依据.....	17
<b>6 标准实施建议</b> .....	<b>36</b>
<b>7 参考文献</b> .....	<b>36</b>

# 1 项目背景

## 1.1 任务来源

为进一步指导全国开展荒漠化防治工作，统一规范荒漠化地区生态质量评价的技术方法与技术流程，生态环境部自然生态保护司以标准制修订绿色通道的方式制订《荒漠化地区生态质量评价技术规范》。根据工作部署，本标准由生态环境部南京环境科学研究所牵头，中国环境科学研究院配合完成。

为进一步指导全国开展荒漠化防治工作，统一规范荒漠化地区生态质量评价的技术方法与技术流程，根据《关于开展 2021 年度国家环境保护标准项目实施工作的通知》（环办科技函〔2021〕312 号），按照《国家环境保护标准制修订工作管理办法》（国环规科技〔2017〕1 号）的有关要求，生态环境部自然生态保护司和法规与标准司下达了《荒漠化地区生态质量评价技术规范》国家环保标准制订任务，项目统一编号为 2021-52。项目由生态环境部南京环境科学研究所、中国环境科学研究院两家单位共同承担。

## 1.2 工作过程

本标准编制组成员通过调研并系统分析了荒漠化地区生态质量评价相关标准，结合国内外相关研究成果，在前期项目研究、文献资料分析和基础调研的基础上，编制组召开了研讨会，讨论并确定了开展技术规范编制工作的原则、程序、步骤和方法，形成了本标准初稿。

本标准在编制期间，标准编制组采取“周例会、半月调度、月总结”的工作模式，不断对标准文本和编制说明进行修改完善。同时，选取荒漠化典型地区—甘肃省酒泉玉门市开展现场调研和评价试算，不断完善各指标的赋分区间。对于指标选取和指标阈值等关键性问题，多次通过线上方式咨询中国科学院新疆生态与地理研究所、生态环境部卫星环境应用中心等单位的行业专家，确保评价指标体系和评价方法更具准确性和科学性。

2022 年 3 月 30 日，生态环境部自然生态保护司以线上形式召开了本标准的开题论证会。来自中国科学院西北生态环境资源研究院、中国科学院东北地理与农业生态研究所、中国科学院新疆生态与地理研究所、南京大学、生态环境部卫星环境应用中心、生态环境部环境工程评估中心和四川省生态环境科学研究所等单位的专家通过听取标准开题汇报、审核资料、提出意见及建议，经质询、讨论，一致认为本标准紧密结合荒漠化地区生态环境监管工作需要，技术内容翔实、完整，技术路线合理、可行，最终形成开题论证意见，结果为一致通过。

2022 年 7 月 21 日，生态环境部自然生态保护司以线上形式召开了本标准的征求意见稿技术审查会。来自中国科学院寒区旱区环境与工程研究所、中国科学院东北地理与农业生态研究所、中国科学院新疆生态与地理研究所、生态环境部卫星环境应用中心、生态环境部环境工程评估中心、中国环境监测总站、北京师范大学、中国林业科学研究所和青海省生态环境监测中心等单位的专家通过听取标准阶段性汇报、审核资料、提出意见及建议，经质询、讨论，一致认为本标准文本及编制说明资料齐全，内容完整，格式规范，符合标准征求意见稿审查的要求，专家组一致同意通过该标准的征求意见稿技术审查。标准编制组认真吸取专家意见，经过充分讨论和修改完善，形成标准征求意见稿。

## 2 标准制订的必要性分析

### 2.1 项目相关行业概况

荒漠化是全球问题，严重影响全世界的生态安全、粮食安全、经济社会稳定以及可持续发展。习近平总书记指出“人类只有一个地球家园，荒漠化防治是关系人类永续发展的伟大事业”。中国政府一直高度重视荒漠化防治和自然生态系统的保护与恢复。自上世纪八十年代起，陆续开展了三北防护林体系建设等相关工作，实施了石漠化综合治理等一系列重大生态工程，取得了显著成效。自2004年起，我国荒漠化土地面积开始出现缩减，荒漠化土地面积由上世纪末的年均扩展1.04万平方公里转变为目前的年均缩减2424平方公里，在荒漠化防治方面提前实现联合国2030年土地退化零增长的目标。

在荒漠化防治过程中，标准化和规范化是最基本要求，也是防治成效的重要标志。研究制定我国荒漠化地区生态质量评价技术规范，有助于我国土地荒漠化的防治工作和相关研究具有合理的、统一的评价基础，保障土地荒漠化防治工作高效开展，并为全球荒漠化防治工作提供中国经验。

近年来，针对荒漠化地区制订了一系列标准，包括《荒漠区盐渍化土地生态系统定位观测指标体系》（LY/T 2936—2018）、《西北干旱荒漠区河岸植被恢复技术规程》（LY/T 2540—2015）、《极端干旱区荒漠生态系统定位观测指标体系》（LY/T 2091—2013）、《干旱半干旱区荒漠（沙地）生态系统定位观测指标体系》（LY/T 2092—2013）、《荒漠生态系统服务评估规范》（LY/T 2006—2012）、《自然保护区自然生态质量评价技术规程》（LY/T 1813—2009）、《荒漠生态系统定位观测技术规范》（LY/T 1752—2008）、《土地荒漠化监测方法》（GB/T 20483—2006）、《陆地植被气象与生态质量监测评价等级》（QX/T 494—2019），这些标准化工作在我国荒漠化防治过程中起到了关键作用，为林业工程的建设以及荒漠化防治标准工作的开展奠定了基础。但上述标准主要由原林业部门提出与制定，没有直接围绕荒漠化地区生态质量监测等工作，制定的目的和适用范围不是支撑生态保护修复监管。因此，我国亟需制定荒漠化地区生态质量监测技术规范，为我国荒漠化地区生态质量监测和脆弱区生态保护修复成效评价提供科学合理、操作可行的评价指标体系和技术方法。

### 2.2 相关生态环境标准和环境管理工作的需要

#### 2.2.1 落实国家及生态环境主管部门职责的重要手段

开展荒漠化地区生态质量评价，是贯彻落实《中华人民共和国环境保护法》重要任务和生态环境部“拟订和组织实施生态保护修复监管政策、法律、行政法规、部门规章、标准……开展全国生态状况评估……监督野生动植物保护、湿地生态环境保护、荒漠化防治等工作”相关职责的重要手段，对于实施荒漠化地区生态保护修复，遏制生态系统退化，健全生态文明制度体系具有重要意义。

#### 2.2.2 摸清荒漠化地区生态质量状况的迫切需求

目前我国林业草原、气象等相关部门先后颁布实施了一系列荒漠化地区的标准和规范，有效指导了荒漠化防治工作的开展，为本标准的编写奠定了良好基础。但上述标准主要由原林业部门提出与制定，没有直接围绕荒漠化地区生态质量监测等工作，制定的目的和适用范

围无法支撑生态保护修复监管的需求。荒漠化地区生态质量评价是以能够真实、全面、准确反映荒漠化地区生态质量状况为直接目标,为荒漠化地区生态保护修复监管与决策服务的一项综合性的技术工作。通过制定统一科学的标准规范,指导各地全面、系统摸清当地荒漠化地区生态质量,为科学评判各地荒漠化地区的保护和管理成效提供可靠依据。

### 2.2.3 完善国家相关标准技术体系的现实要求

目前,环境保护标准体系中尚没有针对荒漠化地区生态质量评价的技术标准规范。制定本标准是保障荒漠化防治工作精度和质量,客观准确掌握荒漠化地区基础状况的基础保障,也是确保调查工作科学性和可操作性的重要保障。通过衔接各地区生态质量评价技术标准规范,制定荒漠化地区生态质量评价技术规范,为我国荒漠化地区生态质量监测提供依据,而且对脆弱区生态保护修复成效评价具有重大意义。因此,制定本标准是国家环境保护标准体系建设的客观要求。

## 3 国内外相关标准情况的研究

### 3.1 主要国家、地区及国际组织相关标准情况的研究

1977年,联合国荒漠化大会首次对全球荒漠化状况进行了评价,并共同编制了1:2500万世界荒漠化图。之后,世界各国出于对荒漠化监测的需要,先后进行了荒漠化分类评价指标体系的研究。

#### 3.1.1 美国

Berry和Ford(1977)最早以气候、土壤、植被、动物和人类等因子为依据,提出了适用于全球、地区、国家和地方的四级荒漠化指标体系。Reining(1978)考虑到自然因素和人为因素的相互联系,随后提出了一个由物理、生物和社会三方面指标组成的指标体系。RozaNov(2002)提出了荒漠化评价的技术方法:(1)用不同时期同一地区的荒漠化状况进行比较;(2)用同一时期不同地区的荒漠化状况进行比较。这些方法虽然较具体,但对荒漠化评价来说都比较初级,所提出的荒漠化评价指标都以宏观的定性指标为主,即使是部分直接的定量指标也没有给出分级的闭值,可操作性差,最大的贡献是提出了荒漠化评价研究的初步方法,从而开创了荒漠化研究的一个重要基础领域。90年代以来,利用遥感(RS)和地理信息系统(GIS)技术手段对荒漠化进行监测和评价成为主要的研究趋势。1992年Kharin将GIS技术应用到荒漠化评价中,从空间图像、航空调查和地面观测三个层次进行调查和监测,并利用GIS平台作出了荒漠化系列图。1995年Kuehl等结合土壤特征和植被特征及其光谱值构建出了一个综合的荒漠化评价指标体系,并以美国科罗拉多高原的草地、灌丛和针叶林为对象开展了动态评价研究。进入2000年后,一些学者为了改善监测评价与制图的效果提出了新的指标与概念—归一化植被指数(NDVI),其变化被认为是比较理想的适用于荒漠化动态评价的大尺度宏观指标。

#### 3.1.2 国际组织

1984年联合国粮农组织(FAO)和环境规划署(UNEP)为了进行全球性的荒漠化评价,组织专家共同确定了荒漠化评价与制图的暂行方法,该方法将荒漠化划分为植被退化、风蚀、

水蚀、盐渍化、土壤有机质降低、土壤板结及土壤有毒物质聚集 7 种类型，然后将每个指标细分为轻度、中度、严重和极严重 4 个不同等级，并从现状、速度和危险性 3 个方面对每种类型制定具体的评价指标，如荒漠化现状、荒漠化速率、危险程度、人口和牲畜压力等。不少学者认为，这一评价体系的指标选取合理，是迄今较为完善的指标体系。但对定量指标的阈值选择并不是来自于实测，多来自于专家意见，主观性强，而且该指标体系变量选择过多依赖土壤，实用性不足，所以只能够在各国编制指标体系时起到理论指导作用。20 世纪 90 年代初，经济合作与发展组织（OECD）开始汇编农业环境指标，依据压力—现状—响应模型（PSR）提出了一套实用的指标检验标准。同时，OECD 对它们的实用性在其成员国中进行了问卷调查，建立了数据库，组织专家会议讨论指标的具体分类，并针对不同环境进行了修改。

### 3.1.3 欧洲

20 世纪 90 年代，欧洲环境局（EEA）在 PSR 模型基础上引进介绍了驱动力—压力—现状—影响—响应模型（DPSIR），用来描述不同类型指标之间的作用评价反馈循环，并被 FAO 采用，用来为土壤退化评价建立一个标准理论框架的干旱地区土地退化评价项目（LADA）。LADA 项目组创新了指标的选取模式，他们将指标标准和 DPSIR 系统用法的说明以邮件形式发给所有感兴趣的用户，希望他们可以根据自身的目的来选择最好的指标并在一些地区进行测试，包括中国和非洲及南美等地区的国家。同时，EEA 修订了一系列相关主体和政治问题的指标，试图整合指标以减少指标的数量，但是其中一些指标并不能准确获得。随后，欧盟在吸取各组织的经验教训之后，开展了 DESER TLINKS 项目研究。该项目结合 DESER 系统及其他指标体系的优点开发了包括 150 个指标的地中海荒漠化监测和评价信息系统 DIS4ME，并自 2005 年起在地中海地区 19 个国家的荒漠化监测和评价等管理工作中广泛应用，该系统被认为是迄今为止国内外最先进和全面的荒漠化监测和评价系统。

## 3.2 国内标准情况的研究

我国荒漠化研究开始于 20 世纪 50 年代，而荒漠化监测和评价指标、标准体系研究则起步较晚。朱震达等（1984）最早对荒漠化指标开展了系统的理论研究，他基于沙漠化土地年增加率、流沙占地面积百分数和地表形态组合特征等 3 个指标，建立了一套我国北方沙漠化评价指标体系，为我国荒漠化评价奠定了理论基础。1995 年，原国家科委率先资助启动了“荒漠化监测评价指标体系及评估方法”的研究项目，之后大量学者和有关部门开展了荒漠化监测与评价指标体系框架及相应的标准和指标研究工作（表 3-1）。经文献调研，地面调查和遥感监测是荒漠化监测与评价的两种主要方式，选取的指标也各有侧重，我国当前已经综合使用这两种方式完成了五次荒漠化和沙化监测，正在进行第六次荒漠化和沙化监测。

表 3-1 荒漠化监测、评价主要研究举例

时间	研究者	指标	监测、评价目标
<b>荒漠化地面调查</b>			
1977	Berry and Ford	气候、土壤、植被、动物和人类	不同尺度的荒漠化过程
1978	Reining	物理、生物、社会	荒漠化过程
1984	联合国粮农组织和环境规划署	植被退化指标、荒漠化土地发展速度指标、内在危险性指标	荒漠化过程
1984	朱震达和刘恕	沙质荒漠化土地年均扩大率、流沙面积比例、植被覆盖度、生物生产量、农田系统的能量产投比	沙质荒漠化程度
1991	胡孟春	风沙地貌面积比例、植被盖度、沙土含水量、沙土有机质含量	沙质荒漠化类型和程度
1992	董玉祥和刘毅华	沙质荒漠化危险性监测指标（绿色覆被率、人口超载率等）、沙质荒漠化状态监测指标（沙质荒漠化土地比例、沙质荒漠化速率等）和沙质荒漠化危害监测指标（土壤肥力、粮食单产等）	沙质荒漠化危险性、状态和危害
1999	卢琦和郭剑亮	执行指标、状态指标、影响指标	风蚀、水蚀、盐碱化、冻融等过程
2001	贾宝全等	灌丛沙堆发育程度（结皮状况、沙堆高度、沙丘密度等）、土壤（物理、化学、生物性质）、植被（盖度、组成）、人为因素（社会、经济）、地貌形态及其发育（风蚀、风积）	绿洲沙质荒漠化
2004	丁国栋	植被盖度	沙地活化、土壤侵蚀、土壤盐碱化过程
2005	吴波等	荒漠化压力指标（自然和人为驱动因素）、状态指标（土地生态系统的物理、化学和生物特性）、影响指标和防治指标	监测荒漠化过程，评价荒漠化的影响，防治荒漠化
2009	张克斌等	土地利用类型、荒漠化类型、气候因素、土壤因素、植被因子、地形	荒漠化过程

		地貌因子、社会经济因素、人为因素	
<b>荒漠化遥感监测</b>			
2001	吴波和慈龙骏等	计算景观连接度、破碎度和景观形状等指数	揭示荒漠化地区景观格局的变化特征
2004	刘爱霞等	基于 NDVI 数据提取划分中国西部的荒漠化减轻、加重和未明显变化的区域	中国西部干旱半干旱地区沙漠界线
2005	Tsunekawa 等	以 NPP 作为生物生产力的关键因子，通过比较分析法确定潜在 NPP 和实际 NPP 之间的关系	评价亚洲干旱地区的荒漠化过程
2011	高志海等	土壤有机质含量	指示土壤退化程度
2015	Han L 等	改进的土壤调节植被指数、地表反照率、植被盖度、地表温度、温度—植被干燥指数构建了荒漠化程度评价指数	荒漠化程度
2018	Liu Q 等	基于 NDVI 和反照率构建了荒漠化差异指数	荒漠化程度
2018	Zhang C 等	目视解译青藏高原流动沙地、半流动沙地、半固定沙地	监测沙地动态



目前，与荒漠化地区相关的国家标准和行业标准共有 19 项，其中国家标准 7 项、行业标准 12 项。已发布实施的标准都是近年根据我国荒漠化防治的需要，由科研院所、大专院校、质检机构和有关生产企业在充分论证、多次试验的基础上，结合多年来国内外荒漠化防治的经验和方法制定的。这些标准在荒漠化防治中已经或正在发挥着重要作用。如 2006 年，中国气象局研究编制了国家标准《土地荒漠化监测方法》(GB/T 20483—2006)，提出了动态监测项目、选测项目和 5 年 1 次测定项目，同时给出了风蚀沙化程度指标、盐化土壤分级指标和碱化土壤分级指标以及水蚀程度评价计分表等来监测荒漠化程度。国家林业局和国家荒漠化监测办公室在 2011 年汇编了一册供部门内部使用的《全国荒漠化和沙化监测技术规定》(试行)，该规定确定了一套荒漠化监测调查指标体系，并在 6 次全国荒漠化监测中得以应用。中国气象局、国家林业局还编制发布了《沙尘暴天气监测规范》(GB/T 20479—2006)、《沙化土地监测技术规程》(GB/T 24255—2009) 等，为获取荒漠化现状数据和沙尘暴等自然灾害的发生、发展过程的信息提供了技术规范，极大地提高了我国预测、预报荒漠化及沙尘暴发展趋势的精确度和准确性。《封山(沙)育林技术规程》(GB/T 15163—2004)、《防沙治沙技术规程》(GB/T 21141—2007)、《京津风沙源治理工程社会效益监测与评价指标》(LY/T 1758—2008)，以及荒漠生态系统定位观测系列标准，已经或正在荒漠化防治和生态工程建设等领域得到广泛应用，并发挥着重要作用，有效地提高了工程建设、监测预警以及科学研究的质量和效益。然而，这些荒漠化地区标准主要由气象部门和原林业部门提出与制定，没有直接围绕生态质量评价工作，制定的目的和适用范围也不是支撑生态保护修复监管，无法真实、全面、准确的反映荒漠化地区生态质量状况。

表 3-2 已正式发布的荒漠化防治国家标准和行业标准

序号	标准名称	标准性质	标准类别	标准号
1	天然草地退化、沙化、盐渍化的分级指标	国家标准	方法标准	GB 19377—2003
2	封山(沙)育林技术规程	国家标准	方法标准	GB/T 15163—2004
3	土地荒漠化监测方法	国家标准	方法标准	GB/T 20483—2006
4	沙尘暴天气监测规范	国家标准	方法标准	GB/T 20479—2006
5	沙尘暴天气等级	国家标准	基础标准	GB/T 20480—2006
6	防沙治沙技术规程	国家标准	方法标准	GB/T 21141—2007
7	沙化土地监测技术规程	国家标准	方法标准	GB/T 24255—2009
8	飞机播种治沙技术要求	行业标准	方法标准	LY/T 1186—1996
9	绿洲防护林体系建设技术规程	行业标准	方法标准	LY/T 1682—2006
10	京津风沙源治理工程社会效益	行业标准	方法标准	LY/T 1758—2008

	监测与评价指标			
11	荒漠生态系统定位观测指标体系	行业标准	方法标准	LY/T 1698—2007
12	荒漠生态系统定位观测技术规范	行业标准	方法标准	LY/T 1752—2008
13	荒漠生态系统观测研究站建设规范	行业标准	方法标准	LY/T 1753—2008
14	荒漠生态系统服务评估规范	行业标准	方法标准	LY/T 2006—2012
15	荒漠区盐渍化土地生态系统定位观测指标体系	行业标准	方法标准	LY/T 2936—2018
16	西北干旱荒漠区河岸植被恢复技术规程	行业标准	方法标准	LY/T 2540—2015
17	极端干旱区荒漠生态系统定位观测指标体系	行业标准	方法标准	LY/T 2091—2013
18	干旱半干旱区荒漠（沙地）生态系统定位观测指标体系	行业标准	方法标准	LY/T 2092—2013
19	全国生态状况调查评估技术规范—荒漠生态系统野外观测	行业标准	方法标准	HJ 1170—2021

目前，针对生态质量评价工作的计算方法，国际上应用较多的为经济合作与发展组织（OECD）和联合国环境规划署（UNEP）共同提出的“压力—状态—响应”模型，但未见相关标准。国内主要有生态环境部开展的《全国生态状况调查评估技术规范—生态系统质量评估》（HJ 1172—2021）、《流域生态健康评估技术指南》，中国科学院曹春香研究员开展的环境健康遥感诊断研究工作，国家气象局开展的植被生态质量气象评价等。

生态环境部《全国生态状况调查评估技术规范—生态系统质量评估》（HJ 1172—2021）规定的生态系统质量评估是将遥感生态参数（植被覆盖度、叶面积指数、总初级生产力）作为指标，区分生态系统类型开展生态系统质量评估。具体过程如下：以每个生态功能区内森林、灌丛、草地和农田四类植被类型生态系统的生态参数最大值作为参照值，依次计算分区内每个植被类型生态系统参数值与其参照值的比值，得到该分区内该生态参数的相对密度，相对密度越接近 1 代表该像元该生态参数越接近参照值。生态系统质量反映区域生态系统质量整体状况，由植被覆盖度、叶面积指数和总初级生产力的相对密度来构建，具体计算方法如下：

$$EQI_{ij} = \frac{LAI_{ij} + FVC_{ij} + GPP_{ij}}{3} \times 100$$

式中， $EQI_{ij}$ ——第  $i$  年第  $j$  分区生态系统质量；

$LAI_{ij}$ ——为第  $i$  年第  $j$  分区叶面积指数相对密度；

$FVC_{ij}$ ——第  $i$  年第  $j$  分区植被覆盖度相对密度；

$GPP_{ij}$ ——第  $i$  年第  $j$  分区总初级生产力相对密度。

根据生态系统质量评估结果，将生态系统质量分为 5 级，即优、良、中、低、差。

表 3-3 生态系统质量分级

级别	优	良	中	低	差
生态系统质量	$EQI \geq 75$	$55 \leq EQI < 75$	$35 \leq EQI < 55$	$20 \leq EQI < 35$	$EQI < 20$
描述	生态系统质量为优	生态系统质量良好	生态系统质量为中等水平	生态系统质量较低	生态系统质量较差

生态环境部《流域生态健康评估技术指南》(试行)(环办函〔2013〕20号),规定的评估指标共计6类17项,水域生态健康评估指标主要包括生境结构、水生生物和生态压力三类,共8项指标;陆域生态健康评估指标主要包括生态格局、生态功能和生态压力三类,共9项指标。评估指标权重确定采用层次分析法,分评估对象、指标类型和评估指标3个层次,指标见表3-4和表3-5。该工作主要应用于流域生态健康评估,且需要搜集大量的地面数据。

表 3-4 流域生态健康评估指标体系

评估对象	指标类型	评估指标	指标权重
水域 (0.4)	生境结构 (0.4)	水质状况指数	0.4
		枯水期径流量占同期年均径流量比例	0.3
		河道连通性	0.3
	水生生物 (0.3)	大型底栖动物多样性综合指数	0.4
		鱼类物种多样性综合指数	0.4
		特有性或指示性物种保持率	0.2
	生态压力 (0.3)	水资源开发利用强度	0.5
水生生境干扰指数		0.5	
陆域 (0.6)	生态格局 (0.3)	森林覆盖率	0.2
		景观破碎度	0.2
		重要生境保持率	0.6
	生态功能 (0.3)	水源涵养功能指数	0.4
		土壤保持功能指数	0.3
		受保护地区面积占国土面积比例	0.3
	生态压力 (0.4)	建设用地比例	0.4
		点源污染负荷排放指数	0.3
		面源污染负荷排放指数	0.3

表 3-5 流域生态健康评估指标体系（含消落带）

评估对象	指标类型	评估指标	指标权重
水域 (0.4)	生境结构 (0.4)	水质状况指数	0.4
		枯水期径流量占同期年均径流量比例	0.3
		河道连通性	0.3
	水生生物 (0.3)	大型底栖动物多样性综合指数	0.4
		鱼类物种多样性综合指数	0.4
		特有性或指示性物种保持率	0.2
	生态压力 (0.3)	水资源开发利用强度	0.5
		水生生境干扰指数	0.5
陆域 (0.45)	生态格局 (0.3)	森林覆盖率	0.2
		景观破碎度	0.2
		重要生境保持率	0.6
	生态功能 (0.3)	水源涵养功能指数	0.4
		土壤保持功能指数	0.3
		受保护地区面积占国土面积比例	0.3
	生态压力 (0.4)	建设用地比例	0.4
		点源污染负荷排放指数	0.3
		面源污染负荷排放指数	0.3
消落带 (0.15)	生态结构 (0.4)	自然植被比例	0.6
		自然堤岸比例	0.4
	生态功能 (0.3)	污染阻滞功能指数	0.5
		生物多样性保护功能指数	0.5
	生态压力 (0.3)	人为干扰指数	0.6
		湿地退化指数	0.4

中国科学院曹春香研究员提出了森林和城市等不同生态系统健康评价指标（表 3-6，表 3-7），并提出环境健康遥感诊断综合指标体系（表 3-8），选取案例区开展示范应用。该工作主要应用于区域研究，采用指标较多，无法扩展至全国开展。

表 3-6 森林生态系统健康评价指标

目标	综合指标	要素指标
森林生态系统健康	生产力	净初级生产力
		光合速率
		吸收速率
		生物量
		蓄积量

		树高
		胸径
		冠幅
	组织结构灌木盖度	林分起源
		树龄结构
		乔、灌、草盖度
		凋落物
		物种多样性
	干扰	人为干扰
		病虫害
		火灾
	土壤状况	土壤类型
		土壤质地
		土壤结构
		土层厚度
		土壤水分
土壤空隙状况		
土壤有机质		
土壤全氮		
土壤全磷		
土壤全钾		

表 3-7 城市生态系统健康评价指标

指标类型	具体指标
活力	GDP 增长率
	城镇居民人均收入
	万元 GDP 能耗
	人均耕地面积
	第三产业 GDP
	全社会固定资产投资占 GDP 比重
组织结构	市区人口密度
	第三产业从业人员比例
	人均公共绿地面积
	组织结构
	建成区绿化覆盖率
恢复力	SO <sub>2</sub> 排放达标率
	城市生活污水处理率

	工业固体废物排放利用率
	环保投入占 GDP 比重
	饮用水质达标率
	空气质量达标及好于二级的天数
维持生态系统服务功能	人均居住面积
	人均生活用水量
	城市人口用水普及率
	维持生态系统服务功能
	万人拥有病床数
人群健康	恩格尔系数
	人口自然增长率
	万人拥有大学生数

表 3-8 环境健康遥感诊断综合指标体系

目标层	准则层	要素层	指标参数层
环境健康遥感诊断指标体系	生态环境健康状况	森林生态环境健康指数	冠层覆盖度
			森林叶面积指数
			森林蓄积量
			森林生物量
			森林结构参数
		草地生态环境健康指数	植被覆盖度
			草地生物量
			植被指数
			土壤湿度
		湿地生态环境健康指数	湿地面积
			湿地生物量
			水体指数
			生物多样性
		农业生态环境健康指数	农作物面积
			农作物多样性
			农田土壤指数
			农田灌溉资源指数
		城市生态环境健康指数	城市植被覆盖度
			人均水资源量
			人口密度
城市交通网密度			

			城市生物丰度
大气健康状 况	空气质量指数		气溶胶光学厚度
			颗粒物浓度
			温室气体含量
			污染气体含量
	大气特征参数		云特征
			大气温度
			大气湿度
	水体健康状 况	水网密度指数	
			水资源量
			河流长度
水体质量指数			水体悬浮物浓度
			水体叶绿素浓度
			水体有机物浓度
灾害影响程 度	自然灾害指数		地震
			气象灾害
			地质灾害
			森林火灾
			海洋灾害
	人为灾害指数		大型工业事故
			土地退化
			政治性灾害
人类健康状 况	人群身体健康指数		主要疟疾发病率
			主要疾病死亡率
			平均寿命
	文化素质综合指数		平均受教育水平
			科技人员比例

国家气象局采用植被生态质量指数反映植被生态质量状况，植被生态质量指数以植被净初级生产力（NPP）和覆盖度的综合指数来表示，其值越大，表明植被生态质量越好。计算方法如下：

$$Q_i = 100 \times \left( f_1 \times FVC_i + f_2 \times \frac{NPP_i}{NPP_m} \right)$$

式中：  $Q_i$  ——第  $i$  年植被生态质量指数；

$f_1$  ——植被覆盖度的权重系数；

$FVC_i$  ——第  $i$  年植被覆盖度；

$f_2$  ——植被净初级生产力的权重系数；

$NPP_i$  ——第  $i$  年植被的净初级生产力；

$NPP_m$  ——过去  $n$  年植被净初级生产力的最大值。

植被生态质量等级以植被生态质量指数的距平百分率表示，具体划分参照表 3-9。该工作主要用于气象评价，缺少人类活动对生态质量形成的压力方面的评价。

表 3-9 植被生态质量等级划分

距平百分比	<-10%	-10% - -3%	-3% - 3%	3% - 10%	>10%
等级	很差	较差	正常	较好	很好

### 3.3 本标准与国内外同类标准或技术法规的对比

通过归纳整理可以看出，与国内外同类标准相比，本标准的突出特点主要体现在：

(1) 紧密围绕荒漠化地区监管要求，更多地考虑指标选择的定量化、科学性和可操作性，支撑荒漠化地区生态保护修复监管定期评价的技术要求；

(2) 将生态状况评价与人类活动相结合，识别影响保护成效的具体措施，为进一步提升荒漠化地区管理质量提供科学依据；

(3) 使用多源数据叠加评价，使评价结果更加客观和准确。

## 4 标准制订的基本原则和技术路线

### 4.1 标准制订的基本原则

#### 4.1.1 综合性原则

导致荒漠化产生的气候、土壤、地质、地貌、植被、水文等多种自然因素是影响生态安全的最直接因子。在进行荒漠化地区生态质量评价时必须全面分析这些因素，尽可能全面、客观、准确地反映荒漠化的程度特征。

#### 4.1.2 主导性原则

影响荒漠化地区生态质量的因子是复杂众多的，需要在综合分析、研究的基础上，选取具有典型代表性、能够反映生态安全特征的主导性因子作为评价指标，根据系统分析方法，建立一个科学、完整的评价指标体系，既简便又准确地进行质量评价。

#### 4.1.3 实用性原则

生态质量评价的目的是为监测环境变化和综合治理服务，因此选取的评价指标，不但应具有典型代表性，更应具有科学实用价值，具有可操作性，在满足生态质量评价影响因子全面考虑的基础上，选取能直接反映不同等级生态质量特征的因子进行评价。

### 4.2 标准制定的技术路线

基于本标准总体框架设计的编制遵循以下技术路线（见图 4-1）。



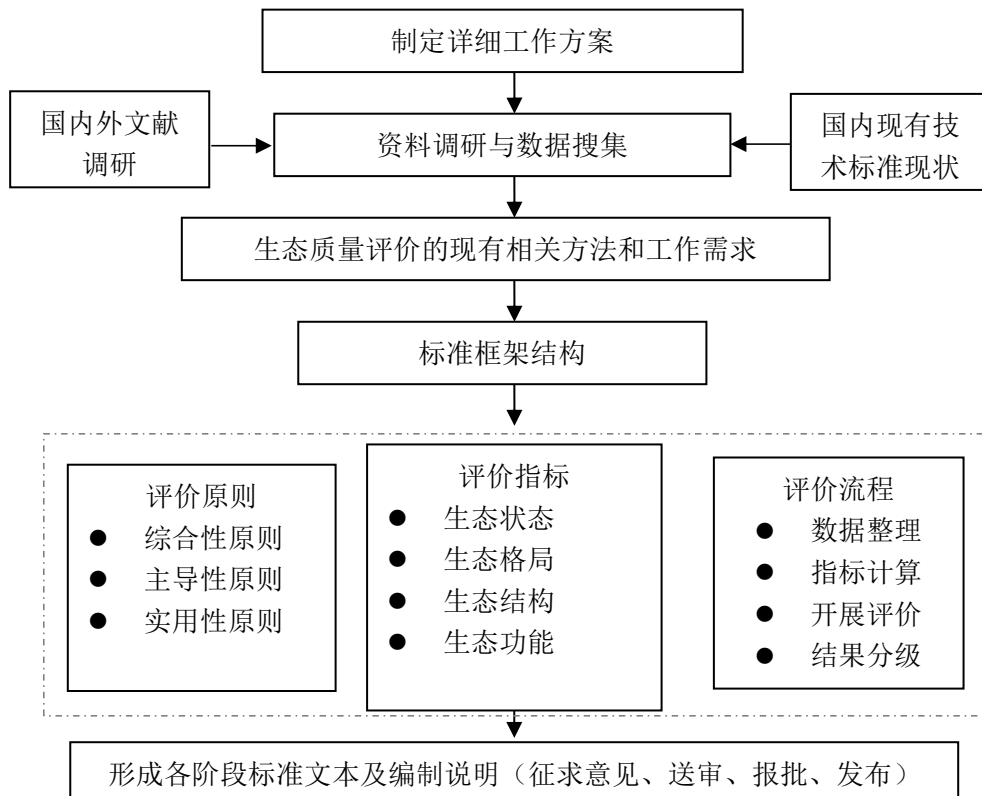


图 4-1 生态质量评价总体技术流程

## 5 标准主要技术内容

### 5.1 标准适用范围

国家林业和草原局发布的《中国荒漠化和沙化状况公报》依据《中华人民共和国防沙治沙法》和《联合国防治荒漠化公约》的有关要求，并结合我国荒漠化基本情况，将荒漠化类型划分为风蚀荒漠化土地、水蚀荒漠化土地、盐渍化土地和冻融荒漠化土地等四种类型。本标准遵照《中国荒漠化和沙化状况公报》对于荒漠化类型的分类标准，将全国荒漠化地区划分为风蚀荒漠化、水蚀荒漠化、冻融荒漠化、盐渍化等四种荒漠化土地开展生态质量评价，其他自然地理区域可参照本标准执行。

### 5.2 术语和定义

本部分为执行本标准制定的专门术语和对容易引起歧义的名词进行的定义。

#### 5.2.1 荒漠化

本标准所指荒漠化的定义，引自《联合国关于在发生严重干旱和/或荒漠化的国家特别是在非洲防治荒漠化的公约》，是指由于气候变化和人类活动等因素所造成的干旱、半干旱和亚湿润干旱地区的土地退化。该定义明确了 3 个问题：

- ① “荒漠化”是在包括气候变异和人类活动在多种因素的作用下产生和发展的。
- ② “荒漠化”发生在干旱、半干旱及亚湿润干旱区（指年降水量与可能蒸散之比在 0.05

至 0.65 之间的地区，但不包括极区和副极区)，这就给出了荒漠化产生的背景条件和分布范围。

③“荒漠化”是发生在干旱、半干旱及亚湿润干旱区的土地退化，将荒漠化置于宽广的全球土地退化的框架内，从而界定了其区域范围。

根据《中国荒漠化和沙化状况公报》，我国有风蚀荒漠化、水蚀荒漠化、冻融荒漠化、土壤盐渍化等 4 种类型的荒漠化土地。本标准也参照国家分类设定 4 种类型荒漠化土地并分别制定评价指标体系和评价方法。

### 5.2.2 风蚀荒漠化

本标准所指风蚀荒漠化的定义，引自《林学名词》(第二版)，是指以风力为主要侵蚀营力形成的荒漠化。

中国风蚀荒漠化土地面积 160.7 万平方公里，主要分布在干旱、半干旱地区，在各类型荒漠化土地中是面积最大、分布最广的一种。其中，干旱地区约有 87.6 万平方公里，大体分布在内蒙古狼山以西，腾格里沙漠和龙首山以北包括河西走廊以北、柴达木盆地及其以北、以西到西藏北部。半干旱地区约有 49.2 万平方公里，大体分布在内蒙古狼山以东向南，穿杭锦后旗、橙口县、乌海市，然后向西纵贯河西走廊的中—东部直到肃北蒙古族自治县，呈连续大片分布。亚湿润干旱地区约 23.9 万平方公里，主要分布在毛乌素沙漠东部至内蒙古东部和东经 106 度。

### 5.2.3 水蚀荒漠化

本标准所指水蚀荒漠化的定义，引自《林学名词》(第二版)，是指以水力(降水、流水)为主要侵蚀营力形成的荒漠化。

中国水蚀荒漠化总面积为 20.5 万平方公里，占荒漠化土地总面积的 7.8%。主要分布在黄土高原北部的无定河、窟野河、秃尾河等流域，在东北地区主要分布在西辽河的中上游及大凌河的上游。

### 5.2.4 冻融荒漠化

本标准所指冻融荒漠化的定义，引自《林学名词》(第二版)，是指在昼夜或季节温差较大的地区，在气候变异和/或人为活动的影响下，岩体或土壤由于剧烈的热胀冷缩而出现结构破坏或质量下降，形成植被衰退、土壤退化、地表裸露化、破碎化的土地退化过程。冻融荒漠化是青藏高原特有的荒漠化类型。

中国冻融荒漠化地的面积共 36.6 万平方公里，占荒漠化土地总面积的 13.8%。冻融荒漠化土地主要分布在青藏高原的高海拔地区。

### 5.2.5 盐渍化

本标准所指盐渍化的定义，引自《林学名词》(第二版)，是指土壤中积聚盐分形成盐渍土的过程。主要发生在干旱、半干旱区以及滨海地区。

中国盐渍化土地总面积为 23.3 万平方公里，占荒漠化总面积的 8.9%。土壤盐渍化比较集中连片分布的地区有柴达木盆地、塔里木盆地周边绿洲以及天山北麓山前冲积平原地带、河套平原、银川平原、华北平原及黄河三角洲。

## 5.2.6 生态质量

本标准所指生态质量的定义，引自《区域生态质量评价办法（试行）》，是指一定时空范围内通过生态要素的水平和垂直组合，保持生态系统结构完整性与稳定性、维持生态功能平衡，保障人类福祉，抵抗外界干扰的能力。

## 5.3 标准主要技术内容确定的依据

### 5.3.1 评价指标与计算方法

#### （1）荒漠化地区生态质量评价指标体系整体构成

生态质量实际反映的是区域内生态系统的总体质量。本标准构建的荒漠化地区生态质量评价指标体系包括生态状态、生态格局、生态结构和生态功能四类一级指标；根据各类指标所反映的生态学内涵，综合考虑指标获取能力、参考借鉴已有方法标准，分类细化提出 19 个二级指标。

生态环境指人类直接的生存和发展环境，也是一个多维的直接和间接、有形和无形相辅相成的生态空间，包括生物因子（如植物、动物等）和非生物因子（如光、水分、大气、土壤等），从人类生存与发展的角度可以分为水资源、土地资源、生物资源、气候资源等。这其中，非生物因子主要反映评价地区的生态本底状况，可以用理化指标进行表征。本标准结合荒漠化地区生态环境特性，选取 5 项指标构成生态状态评价子体系。

本标准所指生态格局是指景观生态格局，即大小和形状各异的景观要素在空间上的排列和组合，包括景观组成单元的类型、数目及空间分布与配置。荒漠化地区景观格局是指大小和形状不一的荒漠化地区特有景观斑块在空间上的排列，是各种生态过程在不同尺度上综合作用的结果，具有显著的景观异质性，对荒漠化地区景观的功能和过程有着重要的影响。景观格局指数是高度浓缩的景观格局信息，是反映景观结构组成、空间配置特征的简单量化指标，可划分为斑块水平指数、斑块类型水平指数和景观水平指数三个水平。目前反映景观格局变化的特征指数已有 200 个左右，但大部分指数之间景观格局信息重复，因此在荒漠化地区景观格局变化研究中，对各种景观指数筛选，选择其中具有代表性的景观指数是十分重要的。对荒漠化地区景观而言，通常根据不同类型荒漠化土地的特性选用一些最能反映荒漠化地区景观格局变化特征的指数，如景观多样性指数、不同斑块面积占比等指标来分析荒漠化地区景观格局，根据景观格局指数在不同时段内的动态变化来反映景观格局空间结构特征的变化。本标准结合荒漠化地区生态环境特性，选取 6 项指标构成生态格局评价子体系。

生态结构是生态系统的构成要素及其时、空分布和物质、能量循环转移的途径，是可被人类有效控制和建造的生物种群结构。不同的生物种类、种群数量、种的空间配置、种的时间变化具有不同的结构特点和不同功效。它包括平面结构、垂直结构、时间结构和食物链结构四种顺序层次，独立而又相互联系，亦是系统结构的基本单元。本标准结合荒漠化地区生态结构特性，选取 3 项指标构成生态结构评价子体系。绿色植被是生态环境的基础，也为人类社会经济发展提供了基本的物质基础。生物多样性一方面给人类提供基本的环境，另一方面又提供丰富的资源，直接影响生态系统的稳定性和持续性。因此，植被覆盖和生物多样性是生态结构评价的两个重要方面，本标准选取的植被覆盖指数可以反映区域的生态生产能力，选取的重点保护生物指数可以反映区域生态功能的支撑能力。植被净初级生产力指数（NPP）

反映的是植物固定和转化光能为化合物的效率，数值上与植物生长、发育、繁殖等自身生命活动相关，同时也为整个生态系统中其他生物的生命活动提供了不可或缺的物质基础。植被净初级生产力能够以统一的尺度标准来衡量区域土地利用/覆被变化过程对植被的影响程度，因此分析区域土地利用/覆被变化过程对植被净初级生产力 NPP 的影响是土地利用/覆被变化环境效应研究的重要组成部分。NPP 作为地表碳循环的重要组成部分，不仅直接反映了植被群落在自然环境条件下的生产能力，表征陆地生态系统的质量状况，而且是判定生态系统碳源/汇和调节生态过程的主要因子，在全球变化及碳平衡中扮演着重要的作用。

生态系统服务功能是指生态系统与生态过程所形成及所维持的人类赖以生存的自然环境条件与效用。它不仅包括各类生态系统为人类所提供的食物、医药及其他工农业生产的原料，更重要的是支撑与维持了地球的生命支持系统，维持生命物质的生物地化循环与水文循环，维持生物物种与遗传多样性，净化环境，维持大气化学的平衡与稳定。本标准结合荒漠化地区生态功能特性，选取 5 项指标构成生态功能评价子体系。

尺度性和等级性也是生态环境的一个重要特征，生态环境由若干个有序的系统组成，每一等级的生态环境都具有特定的空间范围和时间尺度，并由更小一级的生态环境组成，同时它又是更高级生态环境的组成部分，每个尺度的生态环境呈现不同的特征。这种等级性和尺度性决定了对其进行评价时必须从不同的尺度进行考虑，构建生态环境评价方法时也必须考虑到评价对象的尺度特征，在指标设定上，选择最能反映和代表不同尺度生态环境特征的指标。考虑到荒漠化地区土地面积占比大、分布广泛，因此，在构建荒漠化地区生态质量评价指标体系时，结合生态环境管理需求，评价单元采用自然地理单元，打破行政区划界线，建立区域尺度生态质量评价体系，从而能够更加完整、准确、全面地反映荒漠化地区生态质量。

## (2) 生态状态类型评价指标的选取

生态状态指标表征特定时间阶段的生态环境现状和生态环境变化情况，包括生态系统现状与自然环境本底等。

### ①有机质含量

荒漠化的表现特征就是土地退化，即土地理化性质的变化，其土地退化的程度是决定其生态安全程度非常重要的因素。影响土壤理化性质的因素有土壤有机质、全 N、速效 P、速效 K 含量等，如此众多的指标，如果一一进行鉴定很不方便，且给资料收集带来很大的困难。根据野外调查所采集的土样理化性质的检测结果和前人研究成果，土壤有机质、全 N、全 P、全 K 之间的相关程度都大于 75%，说明土壤理化性质的诸多因子互相关联，因此只需选取一个因子即可，本标准选取土壤有机质含量作为土壤理化因子（即土地退化标志）进行判别。

本标准所指有机质含量，是指单位质量土壤中含有的各种动植物残体与微生物及其分解合成的有机物质的质量。一般以有机质占干土重的百分数表示。

### ②侵蚀沟面积比例

本标准所指侵蚀沟的定义，引自《土壤学名词》（第二版），是指沟道纵断面与坡面不一致的沟状侵蚀。

水蚀荒漠化是以水力作用为主，伴随着其它因素的综合作用，导致土地生产力明显衰退，并出现荒漠或类似荒漠的景观。水蚀荒漠化主要特征是地表土壤物质大量流失，土层浅薄化，

粗砂残存，增加了对红外线的吸收，致使气温升高，蒸发量增大，不能涵养水分；土壤有机质含量减少，养分贫瘠，土地生产潜力衰退，甚至土地资源丧失、废弃；塬面被蚕食，沟谷面积不断扩大，切割越来越破碎；植被逆向演替，结构单一，覆被减少或者出现裸地。因此，评价水蚀荒漠化程度主要从植被、土壤、地质地貌、气候和社会经济等方面进行考虑。本标准选取最具有代表性的侵蚀沟面积比例作为水蚀荒漠化的评价指标，其值越大，反映地表被流水侵蚀破坏得越严重。

### ③粘沙比

风力是荒漠化地区风蚀、起沙的最直接动力，衡量风力作用的指标有平均风速和大风日数，但是针对每个地块，其资料收集却很困难，而且往往在相对较小的范围内，每个地块的风速、大风日数基本都相同。根据有关研究成果，地表物质的组成与抗风蚀效果具有很强的相关性，一般土壤粘粒含量大，或者土壤粘沙比大，其抵御大风的能力就强，因此对比以地块为单元，利用地表物质组成可以近似表达为风力因素，而且更能把风力对各个地块的影响作用的区别体现出来。因此本标准根据土壤粘粒含量或者粘沙比作为衡量风力因素的指标。

本标准所指粘沙比，是指单位质量土壤中粘土和沙土的比例。无量纲。

### ④气温年较差

本标准所指气温年较差的定义，引自《建筑学名词》（第二版），是指最热月月平均气温与最冷月月平均气温之差。

气候变化可导致地球表层土的冻结和融化作用，并在一定区域形成土壤季节冻融和多年冻土。气温是影响冻融作用与冻融侵蚀发生的最主要环境因素，温度可以调节冻结层与融化层的深度，温差越大，其深度也越大，持续时间越长，发生冻融侵蚀的可能性与程度也越大；反之则减少，这是冻融侵蚀发生的必要条件。另外，土壤中温度的变化，尤其是 0°C 上下温度的变化幅度与变化频率，直接影响着土壤冻结与融解的过程，进而影响了土壤的物理性质与土壤抗蚀稳定性，影响解冻期土壤侵蚀的发生与发展过程。因此，土壤温度变化的剧烈程度是影响冻融侵蚀的一个重要因素，在冻融区土壤温度变化越剧烈，冻融作用也就越强烈。土壤温度变化往往需要长期观测数据，目前研究区内缺乏这类数据，但研究发现土壤温度与气温具有极强的相关性，因此可以利用气温变化数据来反映土壤温度变化剧烈程度，本标准采用气温年较差表现气温变化，用于冻融侵蚀评价。

### ⑤土壤含盐量

本标准所指土壤含盐量的定义，引自《土壤学名词》（第二版），是指单位质量土壤中所含盐分（主要是氯化物、硫酸盐、碳酸盐）的质量。一般以盐分占干土重的百分数表示。单位：%。

土壤盐度是影响农业生产和环境质量的重要土壤性质之一。盐度指标是指土壤盐渍化的标志或特征。盐在土壤中自然存在，许多盐元素是植物必需的营养素。土壤中最常见的可溶盐包括主要的阳离子：钠（Na<sup>+</sup>）、镁（Mg<sup>2+</sup>）、钙（Ca<sup>2+</sup>）、钾（K<sup>+</sup>）和阴离子：氯化物（Cl<sup>-</sup>）、硫酸盐（SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>）、碳酸氢盐（HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>）和碳酸盐（CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>）。当土壤中的可溶性盐离子含量上升到较高水平时，土壤被认为是盐渍土。土壤盐度的测量表明了土壤中的含盐量。

盐渍土主要分布在干旱或半干旱地区，全球约有 7% 的土地受到高盐度的影响。大部分土地盐渍化是由水和（或）土壤中的 Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup> 和 Cl<sup>-</sup> 含量较高引起的。盐渍化可由自然过程（即原生盐渍化）或人类活动（即次生盐渍化）引起。自然产生的盐分来自于

矿物（如石灰和石膏）的风化和含盐地下水的长期连续排放。除了矿物风化作用外，盐分还可以通过空气中的盐分沉积作用进入到土壤中。人类活动，比如灌溉，经常改变当地的水流模式。由于地下水含盐量的变化，以前非盐化土壤会逐渐变成盐渍化土壤。灌溉会向农业土壤中增加可溶盐，尤其在干旱和半干旱环境中，因为蒸发量高，同时水分不足，无法从表层土壤和根区中淋洗出可溶盐。灌溉水质差、可溶盐含量升高以及土壤排水或渗透性差也可能导致盐分在表层土壤积累。当地下水含盐时，通过高蒸散后土壤中的毛管水运输以及盐沉淀作用，种植浅根作物的旱地地下水位也会上升，并将溶解的盐分带到根区或土壤表面。

### （3）生态格局类型评价指标的选取

生态格局是生态系统在自然、生态、人为多重作用下的现实表征。生态格局影响生态过程，进而对生态系统产生重大影响。本标准用 6 项指标表征荒漠化地区的生态格局状况。

#### ①各类荒漠化土地面积占比

本标准依据四类荒漠化土地类型，分别计算不同类型荒漠化土地面积占比，包括水蚀荒漠化土地面积占比、风蚀荒漠化土地面积占比、冻融荒漠化土地面积占比、盐渍化土地面积占比。具体是指各类荒漠化土地在地面的投影面积占统计区总面积的百分比。单位：%。

#### ②生态用地面积占比

生态用地面积占比可以反映森林、草地、湿地、农田等所有自然属性和半自然属性的生态要素数量。本标准所指生态用地面积比的定义引自《区域生态质量评价办法（试行）》，是指评价区林地、草地、湿地、农田、沙地等具有生态属性的用地面积占比情况，根据人类干扰程度对各生态系统的生态属性进行差异性分析。计算方法如下：

$$EL=100\times\left(\text{有林地面积}+\text{灌木林地面积}+\text{疏林地面积}+\text{草地面积}+\text{河流面积}+\text{湖泊面积}+\text{滩涂面积}+\text{永久性冰川雪地面}+\text{沼泽面积}+\text{沙地面积}+\text{其他林地面积}\times 0.7+\text{水库面积}\times 0.7+\text{水田面积}\times 0.7+\text{旱地面积}\times 0.5\right)/LA$$

式中：EL——生态用地面积占比；

LA——评价区国土面积，km<sup>2</sup>。

#### ③景观多样性指数

20 世纪 80 年代开始，为了测定景观格局对生态过程的影响，需要用简单数字描述复杂的景观格局，因而产生了景观格局指数。最初以信息论为基础的优势度与蔓延度以及分形几何学为基础的分维数等指数来描述描述景观格局，分析与生态过程之间的相关关系，认为优势度与分维数反映大尺度上的景观格局，而蔓延度则反映小尺度上的格局，分维数还能反映人类活动的影响。随着新学科和计算机技术的发展，提出了计算公式更复杂的孔隙度、聚合度等景观指数。近年来，应用在遥感领域，描述影像纹理特征的反差矩、角秒矩等指数越来越受到景观生态学家青睐，用来描述景观异质性。

景观空间格局分析作为景观生态学的重要组成部分，是研究景观格局—生态过程相互作用的基本方法。景观指数是生态格局分析的有力工具。生态弹性力是环境受干扰后生态系统的恢复能力，表征系统的抗干扰性，受气候、土地覆被、土壤、地形地貌、水文等多因子影响。本标准根据土地覆被计算景观多样性、高生态斑块密度，采用景观多样性指数、优势度、高生态斑块密度等反映系统的生态弹性力。景观多样性指数反映了研究区内景观类型的多样化程度及其比例变化。景观多样性指数越高，景观类型的多样性越大，其生态弹性力

也大，抗干扰能力强，生态系统活力也就越大。该指数主要依赖于像元大小、地貌尺度和土地利用分类。运用地理信息系统软件将土地利用图栅格化，再经景观指数计算软件计算可得，公式为：

$$H = - \sum_{i=1}^n P_i \ln(P_i)$$

式中：H——景观多样性指数；

$P_i$ ——景观类型 i 所占比例；

n——区域内景观类型数目。

#### (4) 生态结构类型评价指标的选取

本标准所指的生态结构包括形态和营养关系两方面的内容。1) 生态系统的形态结构：生态系统的生物种类、种群数量、种群的空间配置（水平分布、垂直分布）、种的时间变化等，构成了生态系统的形态结构。如一个森林生态系统，其中动物、植物、微生物的种类，以及每一生物种类的生物数量在一定的时间内相对稳定。在空间结构上，自上而下有明显的层次现象，高层有乔木，中层有灌木，中下层有草本植物，地面有苔藓、地衣类，地下有根系。2) 生态系统的营养结构：生态系统各组成成分之间建立起来的营养关系，就构成了生态系统的营养结构，它是生态系统中能量和物质流动的基础。本标准用 3 项指标表征荒漠化地区的生态结构状况。

##### ① 植被覆盖指数

植被覆盖度是植被群落覆盖地表状况的一个综合量化指标。它具有以下几个方面的重要意义：植被覆盖度是重要的生态气候参数，许多全球及区域气候数值模型中都需要植被覆盖度的信息，它也是描述生态系统的重要数据；植被覆盖度在水文生态模型研究中是一个重要参数，在全球循环的模型中需要它的时间动态与空间分布；植被覆盖度是环境与全球变化中的一个敏感因子，从区域到全球尺度上对植被覆盖变化进行监测，可以为环境变化提供有用的信息。在全球和区域土地覆盖变化监测的很多研究中都需要定量化的植被覆盖度信息；在考察地表植被蒸腾和土壤水分蒸发损失总量、光合作用的过程时，植被覆盖度都是一个重要的控制因子；植被覆盖度是水土流失的控制因子之一。植被覆盖度的高低很大程度上决定着水土流失的强度；植被覆盖度是评价土地退化、盐渍化和沙漠化的有效指数。

因此，可以说植被覆盖及其变化是区域生态环境变化的重要指示，对水文、生态、全球变化等都具有重要意义，而植被覆盖度是衡量地表植被状况的一个最重要的指标，同时它又是影响土壤侵蚀与水土流失的主要因子。植被覆盖度是生态学的重要参数，它是生态环境监测中最常用的监测指标之一，如黄河中上游地区生态环境遥感调查，利用植被覆盖度等生态环境因子对黄河中上游地区的环境进行了现状调查、动态研究和综合评价。

植被覆盖度的测量方法很多，最简单的就是目估法，但此方法主观性太强，因而产生了一系列的采样方法：样方法、样带法、样点法等，但这些方法操作不便，尤其是大区域植被覆盖度的研究中，而且数据更新慢。遥感技术的发展，为植被覆盖度的测量提供了一个新的发展方向，尤其是为大范围地区的植被覆盖度，甚至是全球的植被覆盖度的监测提供了可能。由遥感数据计算出的植被指数，可以直接反映地表植被的状况。在各地表特征参数中，NDVI

(Normalized Difference Vegetation Index, 归一化植被指数)对植被的生长势和生长量非常敏感,可以很好地反映地表植被的繁茂程度,在一定程度上能代表地表植被覆盖变化。大量研究表明,NDVI与绿色生物量、叶面积指数、植物光合能力、净初级生产力均有很好的相关性,广泛用于植被覆盖及其动态变化监测、地表生物物理参数与气候变化关系等方面的研究中。在植被变化研究中,常采用年或月平均NDVI的某一界限作为阈值,来排除非植被因素的影响。研究表明,生长季月平均NDVI可以更好地反映植被的年度生长态势。基于此,本标准中植被覆盖度的计算方法采用《区域生态质量评价办法(试行)》中推荐的植被覆盖指数来衡量评价区域内植物被保护的状态,区域生态环境质量评价中植被覆盖指数选择7-9月NDVI月最大值的平均值进行分析。计算公式如下:

$$C = A_{veg} \times \frac{\sum_{i=1}^n P_j}{10000 \times n}$$

式中:C——植被覆盖指数;

$A_{veg}$ ——植被覆盖指数的归一化系数,参考值为121.1651;

$P_j$ ——评价年7-9月像元NDVI月最大值的均值,无量纲;

$n$ ——区域像元数,个。

## ②重点保护生物指数

生物多样性是人类赖以生存的物质基础,为人类的衣、食、住、行提供了必要的物质保障。但是,由于资源的过度开发、气候变化、外来物种入侵、生境丧失等因素的影响,生物多样性受到严重威胁,生物多样性丧失已成为全球重大环境问题之一。生物多样性保护,不仅关系到地球上诸多物种的存在和延续,也关系到人类自身的生死存亡。随着全社会对生物多样性丧失问题的日趋重视,生物多样性保护也已成为当前国际上最为关注的热点。我国是世界上生物多样性最为丰富的国家之一,具有种类丰富、起源古老,多古老、孑遗种和特有种等特征,是世界上相对保存完整的古老区系之一。生物多样性维护功能是生态系统在维持基因、物种、生态系统多样性发挥的作用,是生态系统提供的最主要功能之一。

总结已有评价方法,全国生态环境十年变化(2000-2010年)遥感调查与评估中采用栖息地不可替代指数来评价评估生态系统对生物多样性保护的重要性,即在野生维管束植物和脊椎动物(包括哺乳类、鸟类、两栖类、爬行类和鱼类)中分别选择多种指示物种或代理种,利用单物种栖息地适宜性评估方法获取每个物种在区域的栖息地适宜性空间分布图,最后利用累积相乘法评估出整个区域的生境质量,进而确定生物多样性保护极重要和较重要地区。

为保护国家生态安全和提升生物多样性保护水平,2010年我国发布了《中国生物多样性保护战略与行动计划(2011-2030年)》,共划定32个内陆陆地及水域国家生物多样性保护优先区域,这些区域是目前中国在生物多样性保护领域最全面、系统的优先区,对全国生物多样性优先保护具有一定的指导意义,但目前划定的优先区面积还偏大,对于保护地网络优化还缺乏很强的操作性。《行动计划》采用的方法是通过筛选国家重要的保护对象(物种、群落和生态系统)并对其分布和状态进行分析,以量化的保护目标为驱动,用MARXAN物种分布模型结合专家意见,识别我国生物多样性优先保护区域,通过威胁因子和保护空缺分析,以提出关键的保护策略与行动计划。《行动计划》从692种重点保护动物和1852个重点保护植物中,确定了318个优先保护的指示物种;以1:100万植被图为基础,提取了683种生态系统类型,确定了96个优先保护的生态系统。建立了以物种和生态系统为核心的生



生物多样性数据库。同时以生态区划分为基础，结合全国重要物种和生态系统的状况分布，并参考国家级自然保护区以及其他现有国际国内认可的各种保护地的分布，以及 Koppen-Trewatha 气候区分类等相关数据，通过 MARXAN 物种分布模型计算和专家审核，在全国规划出生物多样性优先保护区域，总面积 315 万 km<sup>2</sup>，涵盖 26 个省（市、自治区）共 984 个县（市）和 196 个国家级自然保护区，占国土面积的 33%。实践证明，生态区评价方法和 MARXAN 物种分布模型可用于生态功能区规划等相关业务领域；此外，由项目产生的生物多样性数据库可进行二次或多次开发，并可广泛用于生态环境规划、环境影响评价、保护区管理、履行公约等生物多样性保护相关领域。

本标准采用《区域生态质量评价办法（试行）》中推荐的重点保护生物指数来衡量评价区域内生物物种被保护的状态，即评价区内列入《国家重点保护野生动物名录》和《国家重点保护野生植物名录》的高等植物、哺乳类、鸟类、爬行类和两栖类的物种数。数据来源为具有经纬度坐标的点面调查、监测数据。

计算公式：

$$KS_r = A_{KSr} \times AKS + 13.2142$$

式中： $KS_r$ ——重点保护生物指数；

$A_{KSr}$ ——重点保护生物指数的归一化系数，参考值为 0.1510；

$AKS$ ——评价区内列入《国家重点保护野生动物名录》和《国家重点保护野生植物名录》的高等植物、哺乳类、鸟类、爬行类和两栖类的物种数，种。

### ③植被净初级生产力指数

植被净初级生产力指数（Net Primary Productivity, NPP）是指绿色植物在单位时间、单位面积内所累积有机物数量，是由植物光合作用所产生的有机质总量（Gross Primary Productivity, GPP）中减去自养呼吸（Autotrophic Respiration, RA）后的剩余部分，也称净第一生产力。

植被净初级生产力指数（NPP）反映的是植物固定和转化光能为化合物的效率，数值上与植物生长、发育、繁殖等自身生命活动相关，同时也为整个生态系统中其他生物成员的生命活动提供了不可或缺的物质基础。植被净初级生产力能够以统一的尺度标准来衡量区域土地利用/覆被变化过程对植被的影响程度，因此分析区域土地利用/覆被变化过程对植被净初级生产力 NPP 的影响是土地利用/覆被变化环境效应研究的重要组成部分。NPP 作为地表碳循环的重要组成部分，不仅直接反映了植被群落在自然环境条件下的生产能力，表征陆地生态系统的质量状况，而且是判定生态系统碳源/汇和调节生态过程的主要因子，在全球变化及碳平衡中扮演着重要的作用。净初级生产力数据产品，采用光能利用率（GLOPEM）模型算法通过多种卫星遥感数据（Landsat、MODIS 等）反演得到的多种尺度栅格数据产品，该数据也是判定和调节生态过程的主要因子。

## （5）生态功能类型评价指标的选取

生态系统服务功能可以概略地分为两大类，一类是生态系统产品，如为人类提供食物、工业原材料、药品等可以商品化的功能；第二类是支撑与维持人类赖以生存的环境，如气候调节、水源涵养、水土保持、土壤肥力的更新与维持、营养物的循环、二氧化碳的固定等难以商品化的功能，这些主要表现为间接价值。

《全国主体功能区规划》（国发〔2010〕46号）中提出了限制进行大规模高强度工业化城镇化开发的重点生态功能区。国家层面限制开发的重点生态功能区是指生态系统十分重要，关系全国或较大范围区域的生态安全，目前生态系统有所退化，需要在国土空间开发中限制进行大规模高强度工业化城镇化开发，以保持并提高生态产品供给能力的区域。国家重点生态功能区的功能定位是：保障国家生态安全的重要区域，人与自然和谐相处的示范区。经综合评价，国家重点生态功能区包括大小兴安岭森林生态功能区等25个地区。总面积约386万km<sup>2</sup>，占全国陆地国土面积的40.2%。国家重点生态功能区分为水源涵养型、水土保持型、防风固沙型和生物多样性维护型四种类型。

参照《全国主体功能区规划》，并结合荒漠化地区实际生态环境特点，本标准选择水土保持功能、防风固沙功能等功能作为开展生态功能评价的类型，选取简单易操作，可信度高且适用于大中尺度区域的评价方法。

#### ①水土保持指数

土壤侵蚀是全球性环境问题之一，严重威胁国家与区域生态安全。土壤保持是生态系统通过其结构与过程减少由于降水所导致的土壤侵蚀的作用，是生态系统重要调节服务之一。综合国内外相关研究，生态系统保持土壤的生态学机制可以概括为：①植被层截留、阻滞重新分配降水，降低降水的能量和侵蚀能力，减缓降水对土壤的冲刷；②凋落物层吸收降水、减少地表径流，缓冲降水能量，保护土壤不受降水的直接侵蚀；③土壤层动物活动增加土壤孔隙度，提高土壤的渗透性和蓄水能力，抑制地表径流形成，植被根系缠绕、固持土壤，提高土壤抗蚀性，从而减少土壤侵蚀。

水土保持功能的评价方法采用《生态保护红线监管技术规范 生态功能评价（试行）》中推荐的修正通用水土流失方程（RUSLE）的水土保持服务模型。

水土保持功能评价的具体计算公式如下：

$$A_c = A_p - A_r = R \times K \times L \times S \times (1 - C)$$

式中： $A_c$ ——水土保持量，t/hm<sup>2</sup>·a；

$A_p$ ——潜在土壤侵蚀量，t/hm<sup>2</sup>·a；

$A_r$ ——实际土壤侵蚀量，t/hm<sup>2</sup>·a；

$R$ ——降雨侵蚀力因子，MJ·mm/hm<sup>2</sup>·h·a；

$K$ ——土壤可蚀性因子，t·hm<sup>2</sup>·h/hm<sup>2</sup>·MJ·mm；

$L$ 、 $S$ ——地形因子， $L$ 表示坡长因子， $S$ 表示坡度因子；

$C$ ——植被覆盖因子。

生态系统通过其结构和过程，改变侵蚀营力和土体抵抗力的相对大小，减少或避免土壤侵蚀发生，从而实现土壤资源的保护和土壤侵蚀的控制。因土壤保持无法直接量化，一般以生态系统减少的土壤侵蚀量（即潜在土壤侵蚀与实际土壤侵蚀的差值）来表征生态系统土壤保持量。土壤保持=潜在侵蚀-实际侵蚀。潜在土壤侵蚀是气候、土壤、地形等自然因素决定的土壤侵蚀量，即假定没有植被保护情况下的土壤侵蚀状况；实际土壤侵蚀则为气候、土壤、地形、植被等因素共同决定的土壤侵蚀量，即现有植被覆盖状态下的土壤侵蚀状况。

#### ②防风固沙指数

防风固沙是生态系统（如森林、草地等）通过其结构与过程减少由于风蚀所导致的土壤

侵蚀的作用，是生态系统提供的重要调节服务之一。防风固沙功能主要与风速、降雨、温度、土壤、地形和植被等因素密切相关。通常以防风固沙量（潜在风蚀量与实际风蚀量的差值）作为生态系统防风固沙功能的评价指标。

风蚀模型是防风固沙功能分析的常用技术手段，英国科学家 Bagnold（1990）提出的输沙率方程是最早的风蚀模型。随着地理信息系统、遥感、模型模拟等技术的发展与综合应用，基于统计和经验的风蚀模型研究也随之发展（张国平等，1956），相继提出了通用风蚀方程（WEQ）（Woodruff, 1965）、基于风速廓线发育的德克萨斯侵蚀分析模型（TEAM）（Gregory, 1998）、涉及人类活动因素的 Bocharov 模型（Bocharov, 1984）、修正风蚀方程模型（RWEQ）（Fryrear et al, 1998, 2000）以及以过程为基础的风蚀预报系统（WEPS）（Hagen, 2004）等主要风蚀模型。国内学者应用风蚀模型进行了诸多的研究与探讨，通过实验提出了各自的模型（董治宝，1998），并对塔里木河下游（程皓等，2007）、黑河下游（韩永伟等；2011）等地区的防风固沙功能进行了评价（李晶和任志远，2011；莫宏伟等，2003）。其中，RWEQ 模型充分考虑气候条件、植被覆盖状况、土壤可蚀性、土壤结皮、地表粗糙度等因素，经过验证，通过参数的修正和公式调整可以应用到我国北方草地风蚀评价中，如巩国丽等（2014）应用 RWEQ 模型分析了锡林郭勒盟防风固沙服务功能的时空变化趋势，并取得较好结果。

防风固沙功能的评价方法采用《生态保护红线监管技术规范 生态功能评价（试行）》中推荐的采用修正风蚀模型来计算防风固沙量，公式如下：

$$SR = S_{L_{潜}} - S_L$$

$$S_L = \frac{2 \cdot z}{s^2} Q_{MAX} \cdot e^{-(z/s)^2}$$

$$S = 150.71 \cdot (WF \times EF \times SCF \times K' \times C)^{-0.3711}$$

$$Q_{max} = 109.8 [WF \times EF \times SCF \times K' \times C]$$

$$S_{L_{潜}} = \frac{2 \cdot z}{s_{潜}^2} Q_{MAX_{潜}} \cdot e^{-(z/s_{潜})^2}$$

$$Q_{MAX_{潜}} = 109.8 [WF \times EF \times SCF \times K']$$

$$S_{潜} = 150.71 (WF \times EF \times SCF \times K')^{-0.3711}$$

式中：SR——固沙量，t km<sup>2</sup> a<sup>-1</sup>；

$S_{L_{潜}}$ ——潜在风力侵蚀量，t km<sup>2</sup> a<sup>-1</sup>；

$S_L$ ——实际风力侵蚀量，t km<sup>2</sup> a<sup>-1</sup>；

$Q_{MAX}$ ——最大转移量，kg/m；

Z——最大风蚀出现距离，m；

WF——气候因子，kg/m；

K'——地表粗糙度因子；

EF——土壤可蚀因子；

SCF——土壤结皮因子；

C——植被覆盖因子。

### ③冻融侵蚀指数

冻融侵蚀是高寒地区由于温度变化,导致土体或岩石中的水分发生相变,体积发生变化,以及由于土壤或岩石不同矿物的差异胀缩,造成土体或岩石的机械破坏并在重力等作用下被搬运、迁移、堆积的整个过程。冻融侵蚀的形成过程十分复杂,其主要动力是寒冻风化和雪蚀的作用,而寒冻风化作用又存在岩石和土体的物理、化学和生物风化,其中物理风化和化学风化是冻融侵蚀最主要动力,前者表现为土体或岩石中水分相变引起的土体或岩石的破碎,后者则表现为土壤或岩石中不同矿物与水分结合后体积变化引起的土壤或岩石的破碎。而冻融侵蚀在中国分布较广,面积较大,全国水土流失总面积 356 万  $\text{km}^2$  中,存在冻融侵蚀的面积就有 126.89 万  $\text{km}^2$ ,所占比例为 35.6%,占全国总面积的 13.36%,青藏高原及其附近高山区是中国冻融侵蚀最集中和最强烈的区域。

国内外学者对土壤侵蚀的研究主要集中在水蚀和风蚀领域,而冻融侵蚀由于其复杂的形成机理和研究区恶劣的地理条件受到限制,研究相对较少。李瑞平等利用野外实验测量数据研究了季节性冻融土壤水盐运移特征,分析了冻融期气温、低温等因子与土壤水盐运移的关系。张立新等利用地基微波辐射计在黑河流域上游对典型地物的微波辐射进行了连续观测,获取了 3 种典型土地类型的冻融过程中 2 个频率双极化的微波辐射特征,计算和分析了土壤冻融过程中发射率和亮温梯度的时序特征,认为土壤冻结会引起土壤发射率的变化,因而可以利用微波遥感数据获取冻融侵蚀过程中土壤水分变化;根据冻土和融土的地表发射率不同的原理,利用 AMSR-E 亮温数据产品计算相邻两日发射率变化来判断一日之内是否发生冻融循环过程,得到全国各年的冻融日循环天数;根据土壤水分和冻土介电常数的相关性计算一日内冻融发生过程中土壤水分的变化,即“日相变水量”来表示冻融作用的程度。杜二计等利用探地雷达在祁连山地区进行了多年冻土的调查,认为降水量大和植被良好的地区多年冻土下界的分布海拔低,反之则高。然而大尺度冻融侵蚀区域的定量研究和分析较缺乏,主要有张建国等人在西藏和四川开展了冻融侵蚀范围的界定和分级评价,张瑞芳等探讨中国气候环境条件中的温度、降水对冻融作用与冻融侵蚀的影响关系,初步确定中国冻融区的总体分布,吴万贞等对三江源地区冻融侵蚀动力进行了定性分析,李成六等对三江源保护区冻融侵蚀情况的分级研究,盛煜等对疏勒河流域上游进行了基于纬度、高程、太阳辐射的流域尺度等效高程模型、辐射调整模型和区域多年冻土分布模型的研究。已有研究表明反复的冻融过程会影响土壤的物理性质,加快土壤侵蚀产沙,如王随继指出黄河中游皇甫川流域沉积基岩的产沙量主要是冻融分化作用造成,也就是说,作为黄河、长江和澜沧江的源头的三江源地区,其冻融侵蚀在一定程度上影响了三大河流的泥沙输移,同时由于西高东低的地势特点每年春季的融化过程往往容易造成洪水泛滥,严重威胁着下游的生态环境。

目前土壤冻融侵蚀定量研究主要采用分级赋权重评价模型,该方法对选取的各冻融侵蚀因子划分等级用于评价,尽管这种方法没有试验测量数据精准,但它适用于大尺度的宏观研究,而且如果影响冻融的因子选择合理的话,结果也是比较理想的。已有研究表明,冻融侵蚀与气候、地形、水文和植被等因素密切相关,因此本标准选择冻融日循环天数、冻融期降水量、坡度和植被覆盖指数 4 个因子进行模型计算。

气候变化可导致地球表层土的冻结和融化作用,并在一定区域形成土壤季节冻融和多年冻土。气温是影响冻融作用与冻融侵蚀发生的最主要环境因素,温度可以调节冻结层与融化

层的深度，温差越大，其深度也越大，持续时间越长，发生冻融侵蚀的可能性与程度也越大；反之则减少，这是冻融侵蚀发生的必要条件。另外，土壤中温度的变化，尤其是 0℃ 上下温度的变化幅度与变化频率，直接影响着土壤冻结与融解的过程，进而影响到了土壤的物理性质与土壤抗蚀稳定性，影响解冻期土壤侵蚀的发生与发展过程。因此，土壤温度变化的剧烈程度是影响冻融侵蚀的一个重要因素，在冻融区土壤温度变化越剧烈，冻融作用也就越强烈。土壤温度的变化往往需要长期观测数据，目前研究区内缺乏这类数据，但研究发现土壤温度与气温具有极强的相关性，因此可以利用气温变化数据来反映土壤温度变化剧烈程度，本标准采用冻融日循环天数表现气温变化，用于冻融侵蚀评价研究中。

降水是影响冻融侵蚀的另一主要因素，降水对冻融作用主要通过影响土壤和岩石中水分含量来影响冻融作用的。在冻结过程中，降水量越大使得土体中含水量越大，水体液相态转化对土体的破坏作用就越大；在融化过程中，降水量越大不仅会加快坡面水流对土壤的搬运作用，而且可以通过改变土体的物理性质从而改变土壤的抗蚀性。

坡度影响着冻融侵蚀的数量和侵蚀位移的大小，坡度越大，冻融侵蚀物质输移的距离越远，输移的物质也越多。而且，坡度较大的地区在降水和重力的综合作用下，其冻融侵蚀程度会大大提高。因此，坡度对冻融侵蚀也十分重要。

植被对冻融侵蚀的影响主要表现在根系的对土壤的固结作用、阻碍地表水的冲刷作用和减小温差的作用。因此植被盖度较大的地区在一定程度上可以减弱冻融侵蚀作用，反之植被较少的区域冻融侵蚀强度较大。

#### ④盐渍化指数

目前，土壤侵蚀的速率在很多区域大大超过了生产速率，土壤资源面临巨大挑战。土壤资源安全和合理利用是构建陆地生态系统结构的关键要素，是推动区域社会经济可持续发展的重要保障。盐渍化主要是由于气候干旱、排水不畅、地下水位过高及不合理灌溉方式形成的。随着全球气候变暖和人类活动的不断加剧，使得土壤盐渍化已成为多国关注的热点生态环境问题。气候干旱，蒸发强度大，地下水位高且含有较多可溶性盐是土壤盐渍化形成的必要条件。

生态敏感性是区域生态环境对自然变化和人类活动干扰程度的反映，对区域生态环境问题发生的难易程度和可能性大小具有指示作用。近年来，国内外学者在生态环境敏感性评价的研究主要侧重区域突出的生态敏感性与基于特定生态过程的敏感性问题两个方面。土地盐渍化敏感性是指旱地灌溉土壤发生盐渍化的可能性。可根据地下水位来划分敏感区域，再采用蒸发量、降雨量、地下水矿化度与地形等因素划分敏感性等级。

本标准采用盐渍化侵蚀指数来表征土地盐渍化敏感性，评价方法以《生态保护红线划定指南》（环办生态〔2017〕48号）中推荐的方法为基础，参考国内外相关资料文献，并多次邀请国内盐渍化研究领域专家进行咨询讨论，形成了盐渍化指数计算方法。

《规范》中的盐渍化敏感性评价因子，除选取了常规模型中的蒸发量/降雨量、地下水矿化度外，又增加了地下水埋深、土壤质地等因子，以充分反映土壤盐渍化敏感性程度。利用地理信息系统的空间叠加功能，将各单因子敏感性影响分布图进行乘积运算，得到盐渍化敏感性等级分布图，公式如下：

$$S_i = \sqrt[4]{I_i \times M_i \times D_i \times K_i}$$

式中： $S_i$ —— $i$  评价区域盐渍化敏感性指数；

$I_i$ —— $i$  评价区域蒸发量/降雨量的敏感性等级值，各地区可根据实际对分级评价标准作相应的调整；

$M_i$ —— $i$  评价区域地下水矿化度的敏感性等级值，各地区可根据实际对分级评价标准作相应的调整；

$D_i$ —— $i$  评价区域地下水埋深的敏感性等级值，各地区可根据实际对分级评价标准作相应的调整；

$K_i$ —— $i$  评价区域土壤质地的敏感性等级值，各地区可根据实际对分级评价标准作相应的调整。

### ⑤生态系统调节指数

生态系统调节指数指生态环境系统的自我维持、自我调节及其抵抗各种压力与扰动的能力的大小。生态环境系统调节功能大小取决于系统的自身状态，植被、气候、地形地貌、土壤、水分等状况基本决定了生态环境系统的性质，因而也决定了生态环境调节功能的大小。根据生态系统调节指数的定义，我们也可以将其等同理解为“生态系统弹性力”。

“弹性力”一词最早由 Holling 引入到生态学的研究当中，被定义为生态系统承受外界干扰并保持静止状态的能力。而后，部分学者对于弹性力的定义更倾向于稳定性的概念，即系统经外界干扰后在一定时间内恢复稳定状态的能力。随着区域可持续发展研究的不断深入，生态系统弹性力的定义也得到丰富和发展，生态系统具有自我调节和自我恢复能力的观点也逐步得到广大学者的认同。其中，Walker 和 Takehiro 等人认为生态系统在一定时间内保持原有结构、特性不变的抗干扰能力就是生态系统弹性力。而高吉喜、王文婕等人认为生态系统在偏离平衡状态以后恢复到初始状态的自我调节能力就是弹性力。可以说，生态系统弹性力包含了弹性强度系数和弹性限度两个方面，即生态系统弹性力的高低与弹性范围。

国内外关于生态系统弹性力的研究方法较多，如浅水湖泊模型和牧场模型。2011 年，López 等人提出功能与状态的转换模型 (SFSTM)，定义了生态系统弹性限度与弹性力间的相关关系；2013 年，Guillermo 等人以生态系统的水分利用效率来表征其弹性强度；Stephen 等人则依据物种性状特征构造了“响应—效果”框架模型来评价其弹性力。在国内，高吉喜、张宝秀等人以特定区域与时段内的生态系统弹性强度系数不变为前提，通过弹性限度反映研究区生态系统弹性力的大小；而王云霞等人则以主成分分析法来确定指标权重，采用目标分层法构建了生态系统弹性力指标体系。

对单一的自然生态环境系统，生态系统调节指数分值主要取决于植被的发育状况，对复合生态环境系统，包括多种植被类型，更准确的方法是通过生态环境系统的组成结构和各组分情况来判断生态系统调节功能大小。一般情况，系统组成越复杂、多样化，各构成类型的健康与安全状况就越好，系统的调节功能就越大，如由林地、水域、农田共同构成的复合生态环境系统，其调节功能高于由单一农田组成的生态环境系统，如单一农田只能抵御 1-3 级风力，而农、水、林复合生态环境系统可抵御 1-8 级大风。生态系统调节指数可用模型定量描述。计算方法如下：

$$EAI = SHDI \sum_{i=1}^n S_i \times P_i$$

式中，EAI——生态系统调节指数；

$i$ ——不同地类；

$S_i$ ——地类  $i$  的覆盖面积比例；

$P_i$ ——地类  $i$  的调节指数分值；

SHDI——多样性指数。

### 5.3.2 生态质量指数计算及评价分级

将每项指标根据其阈值范围划分为五级，具体见下表。

表 5-1 评价指标分级标准

指标类别	评价指标	20分	40分	60分	80分	100分
生态状态	有机质含量	$X < 0.6$	$0.6 \leq X \leq 2.0$	$2.0 < X \leq 3.0$	$3.0 < X \leq 4.0$	$X > 4.0$
	侵蚀沟面积比例	$X > 20$	$15 < X \leq 20$	$10 < X \leq 15$	$5 < X \leq 10$	$X \leq 5$
	粘沙比	$X < 15$	$15 \leq X < 21$	$21 \leq X < 25$	$25 \leq X < 27$	$X \geq 27$
	气温年较差	$X > 22$	$20 < X \leq 22$	$18 < X \leq 20$	$16 < X \leq 18$	$X < 16$
	土壤含盐量	$X > 1.5$	$1.3 < X \leq 1.5$	$1.0 < X \leq 1.3$	$0.5 < X \leq 1.0$	$0.1 < X \leq 0.5$
生态格局	水蚀荒漠化土地面积占比	$X \geq 60$	$40 \leq X < 60$	$20 \leq X < 40$	$10 \leq X < 20$	$X < 10$
	风蚀荒漠化土地面积占比	$X \geq 60$	$40 \leq X < 60$	$20 \leq X < 40$	$10 \leq X < 20$	$X < 10$
	冻融荒漠化土地面积占比	$X \geq 60$	$40 \leq X < 60$	$20 \leq X < 40$	$10 \leq X < 20$	$X < 10$
	盐渍化土地面积占比	$X \geq 60$	$40 \leq X < 60$	$20 \leq X < 40$	$10 \leq X < 20$	$X < 10$
	生态用地面积占比	$X \leq 10$	$10 < X \leq 20$	$20 < X \leq 35$	$35 < X \leq 50$	$X > 50$
	景观多样性指数	$X \leq 0.6$	$0.6 < X \leq 0.8$	$0.8 < X \leq 1.0$	$1.0 < X \leq 1.2$	$X > 1.2$



指标类别	评价指标	20分	40分	60分	80分	100分
生态结构	植被覆盖指数	$X \leq 10$	$10 < X \leq 30$	$30 < X \leq 40$	$40 < X \leq 60$	$X > 60$
	重点保护生物指数	$X \leq 14$	$14 < X \leq 16$	$16 < X \leq 18$	$18 < X \leq 20$	$X > 20$
	植被净初级生产力指数 (NPP)	$X \leq 200$	$200 < X \leq 300$	$300 < X \leq 400$	$400 < X \leq 600$	$X > 600$
生态功能	水土保持指数	不重要	较不重要	一般重要	较重要	极重要
	防风固沙指数	不重要	较不重要	一般重要	较重要	极重要
	冻融侵蚀指数	$X \leq 0.3$	$0.3 < X \leq 0.4$	$0.4 < X \leq 0.5$	$0.5 < X \leq 0.6$	$X > 0.6$
	盐渍化指数	极敏感	较敏感	一般敏感	较不敏感	不敏感
	生态系统调节指数	$X \leq 0.2$	$0.2 < X \leq 0.4$	$0.4 < X \leq 0.6$	$0.6 < X \leq 0.8$	$X > 0.8$

### (1) 指标的评价分级

#### ①有机质含量

根据多篇文献的研究成果（见表 5-2），土壤有机质含量小于 0.6%的为最低级，赋予 20 分；土壤有机质含量大于 0.6%小于等于 2%的为次低级，赋予 40 分；土壤有机质含量大于 2%小于等于 3%的为中级，赋予 60 分；土壤有机质含量大于 3%小于等于 4%的为次高级，赋予 80 分；土壤有机质含量大于 4%的为最高级，赋予 100 分。

表 5-2 文献搜集有关土壤有机质含量量级标准

等级	土壤含盐量
较弱	小于 0.6%
中等	0.6-2.0%
较强	2.0-4.0%
很强	>4.0%

注：文献来源《荒漠化地区生态安全评价—以首都圈怀柔县为例》（陈浩等，2003）、《首都圈多伦地区荒漠化生态安全评价》（周金星等，2003）、《大兴县荒漠化生态安全评价研究》（周金星等，2009）

#### ②侵蚀沟面积比例

根据《第四次全国荒漠化和沙化监测技术规定》以及《土地监测方法》（GB/T 20483—2006）中关于水蚀类型侵蚀沟面积比例的划分标准，将侵蚀沟面积比例小于 5%的视为最高级，赋 100 分；将侵蚀沟面积比例大于 5%小于等于 10%的视为次高级，赋 80 分；将侵蚀沟面积比例大于 10%小于等于 15%的视为中级，赋 60 分；将侵蚀沟面积比例大于 15%小于等于 20%的视为次低级，赋 40 分；将侵蚀沟面积比例大于 20%的视为最低级，赋 20 分。

#### ③粘沙比

根据有关研究成果，地表物质组成与地表抗风蚀效果具有很强的相关性，一般土壤粘沙比大，其抵御大风的能力就强；因此，以地块为单元，利用地表物质组成可以近似反映风力的影响程度，而且更能把各个地块的地表抗蚀性效果区别体现出来。所以，本标准选择以土壤粘沙比作为衡量风蚀型荒漠化状态的指标。根据多篇文献的研究成果，粘沙比小于 15%的为最低级，赋予 20 分；粘沙比大于等于 15%小于等于 21%的为次低级，赋予 40 分；粘沙比大于等于 21%小于 25%的为中级，赋予 60 分；粘沙比大于等于 25%小于 27%的为次高级，赋予 80 分；粘沙比大于等于 27%的为最高级，赋予 100 分。

#### ④气温年较差

一个地区发生不同强度冻融侵蚀的可能性受多种因素的影响，其中起主要作用的因素为温度、地形、地表覆盖、降水量、海拔、土壤等。在“生态状态”指标里选择气温年较差作为表征冻融侵蚀的状态指标。根据《大渡河流域冻融侵蚀监测与分析》《高寒山区冻融侵蚀荒漠化形成及防治》等文献数据，将气温年较差大于 22℃的区域视为最低级，赋予 20 分；将气温年较差大于 20℃小于等于 22℃的区域视为次低级，赋予 40 分；将气温年较差大于 18℃小于等于 20℃的区域视为中级，赋予 60 分；将气温年较差大于 16℃小于等于 18℃的区域视为次高级，赋予 80 分；将气温年较差小于 16℃的区域视为最高级，赋予 100 分。

#### ⑤土壤含盐量

根据《第四次全国荒漠化和沙化监测技术规定》中关于盐渍荒漠化类型的评价指标划分标准，土壤含盐量根据亚湿润干旱区（东部）、干旱半干旱区（西部）划分为四个等级（详见下表 5-3）。根据《荒漠区盐渍化土地生态系统定位观测指标体系》（LY/T 2936—2018）中关于盐渍化土地等级划分标准，分为四个等级（详见下表 5-4）。

本标准在《第四次全国荒漠化和沙化监测技术规定》和《荒漠区盐渍化土地生态系统定位观测指标体系》（LY/T 2936—2018）的基础上，将土壤含盐量划分为五个等级，同时为了确保开展实际评价工作时计算简便，不区分东部西部地区，进行统一赋值：比例大于 0.1% 且小于等于 0.5% 的视为最高级，赋 100 分；比例大于 0.5% 且小于等于 1% 的视为次高级，赋 80 分；比例大于 1% 且小于等于 1.3% 的视为中级，赋 60 分；比例大于 1.3% 且小于等于 1.5% 的视为次低级，赋 40 分；比例大于 1.5% 的视为最低级，赋 20 分。

表 5-3 《第四次全国荒漠化和沙化监测技术规定》中关于盐渍荒漠化类型的评价指标划分标准

区域	轻度	中度	重度	极重度
草地、林地和未利用地				
亚湿润干旱区 (东部)	0.1-0.3%	0.3-0.7%	0.7-1.0%	>1.0%
干旱半干旱区 (西部)	0.5-1.0%	1.0-1.5%	1.5-2.0%	>2.0%
耕地				
亚湿润干旱区 (东部)	0.1-0.3%	0.3-0.7%	—	—
干旱半干旱区 (西部)	0.5-1.0%	1.0-1.5%	—	—

表 5-4 《荒漠区盐渍化土地生态系统定位观测指标体系》（LY/T 2936—2018）中关于盐渍化土地等级划分标准

等级	土壤含盐量
轻度	0.2-0.3 (0.4) %
中度	0.3 (0.4) -0.5 (0.6) %
强度	0.5 (0.6) -1.0 (2.0) %
盐土	>1.0 (2.0)

#### ⑥水蚀荒漠化土地面积占比

根据文献数据和科研积累经验，将水蚀荒漠化土地面积占比分为五个等级，小于 10% 的视为最高级，赋 100 分；大于等于 10% 小于 20% 的视为次高级，赋 80 分；大于等于 20% 小于 40% 的视为中级，赋 60 分；大于等于 40% 小于 60% 的视为次低级，赋 40 分；大于等于 60% 视为最低级，赋 20 分。

#### ⑦风蚀荒漠化土地面积占比

根据文献数据和科研积累经验，将风蚀荒漠化土地面积占比分为五个等级，小于 10%

的视为最高级，赋 100 分；大于等于 10%小于 20%的视为次高级，赋 80 分；大于等于 20%小于 40%的视为中级，赋 60 分；大于等于 40%小于 60%的视为次低级，赋 40 分；大于等于 60%视为最低级，赋 20 分。

#### ⑧冻融荒漠化土地面积占比

根据文献数据和科研积累经验，将冻融荒漠化土地面积占比分为五个等级，小于 10%的视为最高级，赋 100 分；大于等于 10%小于 20%的视为次高级，赋 80 分；大于等于 20%小于 40%的视为中级，赋 60 分；大于等于 40%小于 60%的视为次低级，赋 40 分；大于等于 60%视为最低级，赋 20 分。

#### ⑨盐渍化土地面积占比

根据文献数据和科研积累经验，将盐渍化土地面积占比分为五个等级，小于 10%的视为最高级，赋 100 分；大于等于 10%小于 20%的视为次高级，赋 80 分；大于等于 20%小于 40%的视为中级，赋 60 分；大于等于 40%小于 60%的视为次低级，赋 40 分；大于等于 60%视为最低级，赋 20 分。

#### ⑩生态用地面积占比

本指标源自《区域生态质量评价办法（试行）》，将评级区域内生态用地面积占比分为五级：比例大于 50%的视为最高级，赋 100 分；大于 35%小于等于 50%的视为次高级，赋 80 分；大于 20%小于等于 35%的视为中级，赋 60 分；大于 10%小于等于 20%的视为次低级，赋 40 分；小于等于 10%的视为最低级，赋 20 分。

#### ⑪景观多样性指数

根据文献《榆林地区生态系统弹性力评价分析》（刘晓平等，2016），选取景观多样性指数作为衡量生态格局的一项指标，指数越高，景观类型的多样性越大，越有利于防治荒漠化。将评价区域内景观多样性指数分为五级：指数大于 1.2 的视为最高级，赋 100 分；指数大于 1.0 小于等于 1.2 的视为次高级，赋 80 分；指数大于 0.8 小于等于 1.0 的视为中级，赋 60 分；指数大于 0.6 小于等于 0.8 的视为次低级，赋 40 分；指数小于等于 0.6 的视为最低级，赋 20 分。

#### ⑫植被覆盖指数

根据《区域生态质量评价办法（试行）》对全国各省份开展的试算结果，将植被覆盖指数划分为五个等级：指数大于 60 的视为最高级，赋 100 分；大于 40 小于等于 60 的视为次高级，赋 80 分；大于 30 小于等于 40 的视为中级，赋 60 分；大于 10 小于等于 30 的视为次低级，赋 40 分；小于等于 10 的视为低级，赋 20 分。

#### ⑬重点保护生物指数

本指标源自《区域生态质量评价办法（试行）》，将评级区域内重点保护生物指数分为五级：指数大于 20 的视为最高级，赋 100 分；指数大于 18 小于等于 20 的视为次高级，赋 80 分；指数大于 16 小于等于 18 的视为中级，赋 60 分；指数大于 14 小于等于 16 的视为次低级，赋 40 分；指数小于等于 14 的视为最低级，赋 20 分。

#### ⑭植被净初级生产力指数（NPP）

植被净初级生产力指数（NPP）作为“生态结构”的一项指标，反映的是植物固定和转化光能为化合物的效率，数值上与植物生长、发育、繁殖等自身生命活动相关，同时也为整

个生态系统中其他生物成员的生命活动提供了不可或缺的物质基础。根据课题组长期研究资料积累,统计分析 2000-2021 年 NPP 全国年月数据后,数值大多稳定在 370-450 g·C/m<sup>2</sup> 之间,对比文献《中国西北地区 NPP 变化及其对干旱的响应分析》(张振宇等, 2019)中关于 2000-2015 年中国西北地区各省 NPP 数据,本标准最终确定将评级区域内植被净初级生产力指数分为五级:指数大于 600 g·C/m<sup>2</sup> 的视为最高级,赋 100 分;指数大于 400 g·C/m<sup>2</sup> 小于等于 600 g·C/m<sup>2</sup> 的视为次高级,赋 80 分;指数大于 300 g·C/m<sup>2</sup> 小于等于 400 g·C/m<sup>2</sup> 的视为中级,赋 60 分;指数大于 200 g·C/m<sup>2</sup> 小于等于 300 g·C/m<sup>2</sup> 的视为次低级,赋 40 分;指数小于等于 200 g·C/m<sup>2</sup> (或无数据)的视为最低级,赋 20 分。

#### ⑮ 水土保持指数

参照《生态保护红线监管技术规范 生态功能评价(试行)》中的划分等级标准进行。

#### ⑯ 防风固沙指数

参照《生态保护红线监管技术规范 生态功能评价(试行)》中的划分等级标准进行。

#### ⑰ 冻融侵蚀指数

参照文献《基于 GIS 的三江源区冻融侵蚀评价与分析》的分级方法(见表 5-5),将冻融侵蚀指数分为五级:指数小于 0.3 的是微度侵蚀,视为最高级,赋 100 分;指数大于等于 0.3 小于等于 0.4 的是轻度侵蚀,视为次高级,赋 80 分;指数大于 0.4 小于等于 0.5 的是中度侵蚀,视为中级,赋 60 分;指数大于 0.5 小于 0.6 的是强烈侵蚀,视为次低级,赋 40 分;指数大于等于 0.6 的是极强烈侵蚀,视为最低级,赋 20 分。

表 5-5 冻融侵蚀指数分级标准

等级	冻融侵蚀指数
微度侵蚀	<0.3
轻度侵蚀	0.3-0.4
中度侵蚀	>0.4-0.5
强烈侵蚀	>0.5-0.6
极强烈侵蚀	≥0.6

#### ⑱ 盐渍化指数

参照《生态保护红线划定指南》(环办生态〔2017〕48 号)中的划分等级标准进行。

#### ⑲ 生态系统调节指数

根据文献《榆林地区生态系统弹性力评价分析》(刘晓平等, 2016),选取生态系统调节指数作为衡量生态功能的一项指标,指数越高,区域生态系统更倾向于稳定性,即系统经外界干扰后在一定时间内恢复稳定状态的能力越强。因此,将评价区域内生态系统调节指数分为五级:指数大于 0.8 的视为最高级,赋 100 分;指数大于 0.6 小于等于 0.8 的视为次高级,赋 80 分;指数大于 0.4 小于等于 0.6 的视为中级,赋 60 分;指数大于 0.2 小于等于 0.4 的视为次低级,赋 40 分;指数小于等于 0.2 的视为最低级,赋 20 分。

### (2) 生态质量指数计算的评价分级

荒漠化地区生态质量指数(DEQI)总分为 100 分,由生态状态指数(EC)、生态格局指数(EP)、生态结构指数(ES)、生态功能指数(EF)4 个分指数的得分组成。

根据生态质量指数，把生态质量等级划分为5级：优（生态环境好，无须治理）、良（存在潜在荒漠化现象，需要采取保护措施）、中（已经产生荒漠化现象，需要采取防护措施）、低（有明显荒漠化现象，需要进行治理）、差（荒漠化现象严重，需要重点治理）。见表5-6。

表 5-6 荒漠化地区生态质量状况分级

级别	优	良	中	低	差
指数	DEQI $\geq$ 80	60 $\leq$ DEQI $<$ 80	40 $\leq$ DEQI $<$ 60	20 $\leq$ DEQI $<$ 40	DEQI $<$ 20
描述	生态系统稳定，有一定生产力，生态胁迫低。	生态系统较为稳定，生产力相对较高，生态威胁程度相对较低。	生态系统稳定处于中等，生产力处于一般水平，生态胁迫处于中等水平。	生态系统稳定性较差，生态系统生产力较低，存在明显生态胁迫因素，荒漠化存在恶化趋势。	生态系统退化严重，荒漠化程度严重。

## 6 标准实施建议

本标准首次建立了荒漠化地区生态质量的技术规范，可有效提高全国荒漠化地区生态系统研究相关基础能力和生态保护修复评价综合能力，便于生态环境保护等相关单位使用。

本标准由生态环境部自然保护生态司、法规与标准司组织制订，由生态环境部南京环境科学研究所和中国环境科学研究院联合起草，由生态环境部解释，建议尽快采用本标准。

## 7 参考文献

- [1] Berry L, Ford R B. Recommendations for a system to monitor critical in areas prone to desertification[M]//Worcester M. Program for international development. Massachusetts: Clark University, 1977.
- [2] Kuehl RO, Breckenridge RP, Panda M. Integrated response plot designs for indicators of desertification[M]. Proceedings of the international symposium and workshop in Tucson, Arizona, USA, 1994.
- [3] NG Kharin and Natsag. Results of studying desertification of arid territories in Mongolia[J]. Problems of Desert development, 1992, 5: 52-55.
- [4] Reining P. Handbook on desertification indicators[M]. Washington DC: AAAS Publication, 1978.
- [5] Rozanov B G, Zone I S. The definition diagnose and assessment of desertification in relation to experience[J]. The USSR Desertification Control Bulletin, 2002, 4: 15-18.
- [6] 崔亚莉, 邵景力. 西北地区地下水位的地质生态环境调节作用研究[J].地学前缘, 2001. 8(1): 191-192.
- [7] 丁国栋. 荒漠化评价指标体系的研究-以毛乌素沙区为例[D]. 北京: 北京林业大学, 1998.
- [8] 董玉祥, 刘毅华. 土地沙漠化监测指标体系的探讨[J]. 干旱环境监测, 1992, 6(3):

179-182.

- [9] 段怡春, 陈建平, 厉青, 等. 沙漠化:从圈层耦合到全球变化[J]. 地学前缘, 2002, 2: 277-285.
- [10] 方创琳. 西北干旱区生态安全系统结构与功能的监控思路初论[J]. 中国沙漠, 2000, 20(3): 326-328.
- [11] 高尚武, 王葆芳, 朱灵益, 等. 中国沙质荒漠化土地监测评价指标体系[J]. 林业科学, 1998(2): 1-10.
- [12] 李瑞敏, 鞠建华, 等. 生态环境地质指标研究[M]. 北京: 中国大地出版社, 2009: 40-70.
- [13] 刘星辰, 吴波. 荒漠化评价指标体系与动态评估研究进展和展望[J]. 林业科技管理, 1998(2): 32-34.
- [14] 刘玉平. 荒漠化评价的理论框架[J]. 干旱区资源与环境, 1998(3): 74-81.
- [15] 孙保平. 荒漠化防治工程学[M]. 北京: 中国林业出版社, 2000.
- [16] 王君厚, 孙司衡. 荒漠化类型划分及其数量化评价体系[J]. 干旱环境监测, 1996(3): 129-138.
- [17] 王涛, 吴薇, 赵哈林, 等. 科尔沁地区现代沙漠化过程的驱动因素分析[J]. 中国沙漠, 2004, 24(5): 519-528.
- [18] 王涛, 朱震达. 中国沙漠化研究[J]. 中国生态农业学报, 2001, 9(2): 7-12.
- [19] 王涛. 中国沙漠与沙漠化[M]. 石家庄: 河北科学技术出版社, 2003: 32-140.
- [20] 张长春, 邵景力, 李慈君, 等. 地下水位生态环境效应及生态环境指标[J]. 水文地质工程地质, 2003, 3: 6-10.
- [21] 赵哈林, 赵学勇, 张铜会, 等. 科尔沁沙地沙漠化过程及其恢复机理[M]. 北京: 海洋出版社, 2003: 193-216.
- [22] 朱震达. 中国的脆弱生态带与土地荒漠化[J]. 中国沙漠, 1991(4): 11-21.